Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 1, pp. 57-68, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.1.57

Original article

감마선 조사에 의해 유도된 유색밀 돌연변이 계통의 믹소랩 특성 및 농업형질 평가

홍민정[1] · 고찬섭[1] · 김대연[2,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]국립공주대학교 식물자원학과

Assessment of Mixolab Properties and Agronomic Traits of Colored Wheat Mutant Lines Derived from Gamma irradiation

Min Jeong Hong[1], Chan Seop Ko[1], and Dae Yeon Kim[2,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu, Jeongeup 56212, Republic of Korea
[2]Department of Plant Resources, Kongju National University, 54 Daehak-ro, Yesan-eup, Chungnam 32439, Republic of Korea

ABSTRACT This study was conducted to evaluate the functional properties, processing quality, and agronomic traits of gamma-irradiation-induced colored wheat mutant lines and to assess the industrial applicability of radiation-based breeding of colored wheat. Colored wheat seeds were subjected to gamma irradiation to generate mutant lines, and selected lines were evaluated for agronomic traits, total anthocyanin content, protein content, and dough rheological properties using Mixolab analysis. The gamma irradiated mutant lines exhibited diverse variations in agronomic traits compared with the control, and several lines showed significantly increased anthocyanin content. Mixolab analysis revealed that certain mutant lines exhibited improved dough stability and enhanced viscosity retention during thermal processing, indicating improved processing performance. These results suggest that gamma irradiation can effectively induce favorable variations in both functional components and processing properties of colored wheat. Overall, this study demonstrates that radiation-induced mutation breeding is a promising approach for developing colored wheat with enhanced functional and industrial value, and the findings provide fundamental information for the development of value-added wheat products and functional food materials.

Key words: Mixolab, Gamma irradiation, Colored wheat, Anthocyanin, Protein

1. 서 론

밀(*Triticum aestivum* L.)은 전 세계적으로 가장 중요한 식량작물로서 제분·제빵·제면 등 다양한 식품 산업의 원료로 이용되고 있다[1]. 최근에는 단순한 열량 공급원을 넘어 건강 기능성 및 고부가가치 식품 소재로서의 활용 가능성이 주목받고 있으며, 이러한 흐름 속에서 안토시아닌과 같은 기능성 색소를 함유한 유색밀(colored wheat)에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다[2,3]. 유색밀은 항산화 활성, 기능성 식품 원료 및 천연 색소 자원으로서의 잠재력이 높아 기능성 농산물 및 가공식품 산업에서 활용 가능성이 크다[4-6].

그러나 유색밀은 기능성 성분 측면에서 장점을 가지는 반면, 가공 적성이나 농업형질 측면에서는 기존 백색 또는 적색 밀 품종에 비해 한계를 보이는 경우가 많다[2]. 특히 단백질 및 전분의 물리적 특성 변화로 인해 반죽 안정성이나 가열·냉각 과정에서의 품질 유지가 저하될 수 있으며, 이러한 특성은 산업적 활용을 제한하는 주요 요인으로 작용한다[7,8]. 따라서 유색밀의 산업적 활용을 확대하기 위해서는 기능성 성분 강화와 더불어 가공 적성 및 농업형질을 동시에 개선할 수 있는 육종 전략이 요구된다.

방사선육종은 이러한 요구에 부합하는 효과적인 육종기술로 평가받고 있다. 감마선과 같은 물리적 돌연변이원은 DNA 수준에서 무작위적인 변이를 유도하여 기존 품종에서는 확보하기 어려운 형질 변이를 창출할 수 있으며, 외래 유전자를 도입하지 않는 비유전자변형(non-GMO) 기술이라는 점에서 산업적 수용성이 높다[9,10]. 특히 감마선은 조사선량과 조건을 정밀하게 제어할 수 있어 실험 설계의 재현성이 우수하고, 투과력이 높아 다양한 작

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Dae Yeon Kim
Tel: +82-41-330-1205, Fax: +82-41-330-1209, E-mail: dykim@kongju.ac.kr

Received 9 February 2026 **Revised** 13 March 2026 **Accepted** 16 March 2026

물에서 안정적으로 활용되어 왔으며 국제적으로도 다수의 작물 품종개발에 기여해 왔다[11,12,13]. 이러한 특성으로 인해 방사선 육종은 기능성 작물 개발과 품질 개량을 동시에 달성할 수 있는 실용적 수단으로 주목받고 있다[14,15].

유색밀 관련 기존 연구는 주로 안토시아닌 함량과 같은 기능성 성분 분석 또는 제분·제빵 특성에 대한 단편적인 평가에 집중되어 왔다[16,17]. 반면, 방사선 돌연변이 유색밀을 대상으로 기능성 성분, 단백질 함량, 가공 적성(Mixolab 특성) 및 농업형질을 통합적으로 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

밀 품종의 산업적 활용 가능성을 평가하기 위해서는 농업형질뿐만 아니라 가공 과정에서의 반죽 특성을 함께 고려할 필요가 있다. 특히 단백질과 전분의 물리적·열적 특성은 밀가루의 제분 및 가공 적성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요인이다[18]. 믹소랩(Mixolab)은 반죽의 혼합, 가열 및 냉각 과정에서 발생하는 토크 변화를 연속적으로 측정함으로써 단백질과 전분의 거동을 동시에 평가할 수 있는 장비로, 밀 품종 간 가공 특성 비교에 널리 활용되고 있다[19]. 기존의 반죽 물성 평가 장비가 주로 반죽 형성 단계에 초점을 맞춘 데 비해, 믹소랩 분석은 반죽 형성 능력, 단백질의 열적 안정성, 전분의 호화 및 열 안정성, 그리고 냉각 후 재결정화 특성까지 포괄적으로 평가할 수 있다는 장점을 가진다[20,21]. 이러한 특성은 기능성 밀이나 신규 육종 계통의 산업적 활용 가능성을 판단하는데 중요한 지표로 활용될 수 있다. 방사선육종을 통해 개발된 유색밀 계통은 기능성 성분의 변화뿐만 아니라 단백질 및 전분 구조의 변화를 동반할 가능성이 있으나, 이에 따른 가공 적성 변화에 대한 연구는 제한적이다. 따라서 믹소랩 분석을 활용한 가공 특성 평가는 감마선 조사에 의해 유도된 유색밀 돌연변이 계통의 품질 특성을 종합적으로 이해하고, 산업적 활용 가능성을 제시하는데 필수적인 접근이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 감마선 조사에 의해 유도된 유색밀 돌연변이 계통을 대상으로 농업형질, 안토시아닌 함량 및 단백질 함량을 평가하고, 믹소랩 분석을 통해 가공 적성을 비교·분석하고자 하였다. 이를 통해 유색밀 돌연변이 계통의 품질 특성과 산업적 활용 가능성을 종합적으로 제시하고, 향후 기능성 및 고부가가치 밀 품종개발을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 식물 재료 및 감마선 조사

본 연구에 사용된 식물 재료는 종피색이 진한 자색(deep-purple)을 나타내는 유색밀 계통으로 감마선 돌연변이 육종을 위한 초기 재료로 활용하였다[22]. 감마선 조사는 한국원자력연구원(전라북도 정읍시)에 설치된 ^{60}Co 감마선 조사시설(150 TBq; Noridon, Ottawa, ON, Canada)을 이용하여 수행하였다. 유색밀 종자 200 g을 대상으로 선량률 25 Gy/h 조건에서 조사하여 총 200 Gy의 감마선을 처리하였다. 감마선 조사 후 처리 종자는 방사선육종 시험포장에 파종하였으며, M_1 세대에서는 외형적 특성이 기존 모본과 뚜렷하게 구분되는 개체를 중심으로 선발하여 수확하였으며, 이후 세대에서는 단수선발(single spike selection) 방식을 적용하여 형질의 유전적 안정성을 확보하였다. 초형, 이삭구조, 종자색상, 출수일수 등 다양한 표현형 차이를 기준으로 계통 선발을 진행하였으며, 최종적으로 감마선 조사로부터 유래된 M_{10} 세대 돌연변이 13계통을 선발하여 모본인 유색밀, 국내에서 주로 재배되는 일반 밀 품종인 '금강'을 사용하여 실험을 수행하였다.

2.2. 시험포 재배 조건 및 농업형질 조사

선발된 돌연변이 계통과 모본, 금강은 방사선육종 시험포장에서 재배하였다. 각 계통은 2반복으로 재배하였으며, 반복당 5열(row)로 구성되었고 계통 번호 순서대로 배치하여 재배하였다. 농업형질 평가는 각 시험구의 중앙부 3열을 대상으로 실시하였다. 개화기(flowering time)는 해당 계통의 전체 이삭의 50% 이상이 출수된 시점을 기준으로 기록하였다. 간장(stem height)은 지면에서 이삭 기부까지의 길이를 측정하였으며, 까락은 측정에서 제외하였다. 수장(spike length)은 첫 번째 소수의 기부부터 최상단 소수까지의 길이를 기준으로 산출하였다. 백립중(100-kernel weight)은 계통별로 무작위 선별한 종자 100립의 무게를 측정하여 계산하였다. 총수량(total seed yield)은 수확한 종자를 m^2당 g으로 환산하여 계산하였고, 리터중(test weight)은 메스실린더 1 L에 측정한 종자의 무게를 측정하여 나타냈다.

2.3. 종자 색도 측정

밀가루 및 밀기울의 색도는 색차계(colorimeter)를 이용하여 정량적으로 평가하였다. 색도 측정은 Lab 색공간의 *L**값(명도), *a**값(적색-녹색), *b**값(황색-청색)을 적용하였다. 색도 분석은 Colormate 색차계(Scinco, Seoul, Korea)를 사용하여 수행하였으며, 측정 전 장비의 정확도를 확보하기 위해 D65 광원을 기준으로 흑색 및 백색 표준 타일을 이용해 보정을 실시하였다. 색도 측정을 위해 각 시료는 전용 시료 용기에 균일하게 배치한 후 분석을 진행하였다. *L**, *a**, *b**값은 ColorMaster 소프트웨어(2017 version, Scinco)를 통해 기록 및 분석하였으며, 이를 바탕으로 계통간 밀기울 및 밀가루색 특성을 비교하였다.

2.4. 총 안토시아닌 함량 측정

총 안토시아닌 함량은 Mita 등(1997)이 제시한 분광광도법을 참고하여 분석하였다[23]. 분쇄한 밀가루 및 밀기울 시료 0.5 g을 취하여 1% 염산이 포함된 메탄올 용액 10 mL와 혼합한 후, 4°C 조건에서 24시간 동안 추출하였다. 추출이 완료된 시료는 14,000 rpm에서 20분간 원심분리하였으며, 상등액을 회수하여 0.2 μm 멤브레인 필터(Advantec Toyo Kaisha, Ltd., Tokyo, Japan)로 여과하였다. 여과된 추출액의 흡광도는 자외선-가시광선 분광광도계(UV-Vis spectrophotometer; Evolution 260 Bio, Thermo

Scientific, Waltham, MA, USA)를 이용하여 530 nm와 657 nm 파장에서 측정하였다. 총 안토시아닌 함량은 측정된 흡광도 값을 이용하여 다음 식에 따라 계산하였다.

$$Q=(A_{530}-0.25\times A_{657})\times M^{-1}$$

여기서 Q는 총 안토시아닌 농도를 의미하며, A_{530}과 A_{657}은 각각 530 nm와 657 nm에서의 흡광도 값을 나타내고, M은 사용된 시료의 무게(g)을 의미한다.

2.5. 수분, 탄수화물, 단백질 함량 측정

밀 종자의 수분, 탄수화물 및 단백질 함량은 근적외선 분광(NIR) 기반의 곡물 분석 장비인 GrainSense (GrainSense Oy, Finland)를 이용하여 측정하였다. 각 계통의 종자 시료는 장비 제조사에서 제시한 측정 절차를 따라 분석하였으며, 분석 전 별도의 화학적 전처리는 수행하지 않았다. 측정은 계통별로 반복 수행하여 평균값을 산출하였고, GrainSense 장비에 내장된 보정 모델을 이용하여 수분, 탄수화물 및 단백질 함량을 정량화 하였다. 분석 결과는 계통 간 성분 조성 차이를 비교하기 위한 지표로 활용하였다.

2.6. 상관관계 및 주성분 분석(Correlation and Principal Component Analysis)

농업형질, 색도 특성 및 기능성 성분 간의 상호 연관성을 분석하기 위해 피어슨 상관계수(Pearson's correlation coefficient)를 산출하였다. 각 형질별로 반복수가 상이한 점을 고려하여 계통별 평균값을 분석에 활용하였다. 또한, 다수의 형질 변이를 종합적으로 평가하고 계통 간 유전적 유연관계를 규명하기 위해 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)을 수행하였다. 데이터의 단위 차이에 의한 왜곡을 방지하기 위해 각 변수를 정규화(Scaling)한 후 분석을 진행하였으며, 주성분 분석 결과는 Biplot으로 시각화하여 제1주성분(PC1)과 제2주성분(PC2)을 기준으로 계통의 분산 양상과 형질 간의 기여도를 분석하였다. 모든 분석은 R(version 4.5.0) 환경에서 수행되었으며, 상관관계 히트맵 작성에는 corrplot 패키지를, PCA 시각화에는 factoextra 및 ggplot2 패키지를 사용하였다

2.7. 밀가루 제분 및 믹소랩 분석

각 계통별로 수확한 종자 약 500 g을 확보한 후, 실험실용 제분기(Brabender Quadrumat Junior mill, Germany)를 사용하여 백분으로 제분하였다. 밀가루 반죽의 가공 특성을 평가하기 위해 Mixolab® 장비(Chopin Technologies, France)를 이용하여 분석을 수행하였다. 믹소랩 분석은 AACCI Approved Method 54-60.01 (2010)과 Mixolab 사용자 메뉴얼에 제시된 절차를 참고하여 진행하였다. 분석에는 수분 함량을 14% 기준으로 환산한 밀가루 47 g을 사용하였으며, 증류수를 가하여 총 시료 무게가 75 g이 되도록 조절하였다. 반죽 혼합 과정에서 반죽 발단단계의 최대 토크가 1.1±0.07 Nm 범위 내에서 유지되도록 설정하였고, 반죽 회전 속도는 80 rpm으로 고정하였다. 믹소랩 분석을 통해 온도 변화에 따른 반죽 토크 변화를 연속적으로 측정하였으며, 얻어진 데이터는 Chopin Mixolab 전용 소프트웨어(Chopin Mixolab software, Version 3.14, Chopin Technologies, France)를 이용하여 분석하였다. 믹소랩 지표는 반죽 특성을 직관적으로 평가할 수 있도록 흡수(absorption), 혼합(mixing), 글루텐 특성(gluten), 점도(viscosity), 아밀레이즈 활성(amylase), 노화(retrogradation) 등 6개 항목으로 구분하여 산출하였으며, 이를 바탕으로 계통 간 가공 특성 차이를 비교하였다.

2.8. 통계분석

본 실험의 모든 데이터는 R(version 4.5.0) 프로그램을 사용하여 분석하였다. 백립중, 종자 영양성분(수분, 탄수화물, 단백질) 및 색도 관련 형질(Lab 데이터)은 3 반복으로 측정되었으며, 초형 및 이삭 관련 형질(Stem height, Spike length)은 10 반복 측정치를 분석에 사용하였다. 각 형질에 대해 분산분석(ANOVA)을 실시하여 계통 간 유의성을 검정하였으며, 유의미한 차이가 인정되는 경우 Tukey의 HSD 검정을 통해 1% 유의수준($p<0.01$)에서 사후분석을 수행하였다.

3. 결 과

3.1. 농업형질 특성

감마선 조사에 의해 유도된 유색밀 돌연변이 계통들은 원품종 유색밀(PL1) 및 대조품종 금강(Keumkang)과 비교했을 때 농업형질에서 뚜렷한 변이를 나타냈으며, 분산분석(ANOVA) 결과, 조사된 모든 농업형질에서 계통 간 고도의 유의미한 차이가 확인되었다($p<0.01$) (Table 1). 원품종 PL1의 간장은 75.4±4.48 cm였으며, 금강은 92.2±5.29 cm를 나타낸 반면, 돌연변이 계통의 간장은 87.3~131.3 cm 범위로 분포하여 전반적으로 더 큰 변이 폭을 보였다. 특히 PL42, PL43, PL44 및 PL46은 간장이 117 cm 이상으로 증가하여 초형 변화가 뚜렷하게 나타났으며, Tukey 사후검정 결과 가장 큰 간장을 보인 PL44 (131.3±6.63 cm)는 대조구 및 원품종과 통계적으로 명확히 구분되는 최상위 그룹(group a)에 속하는 것으로 나타났다(Table 1). 수장 역시 계통 간 유의한 차이를 보였다. 원품종(PL1)과 금강의 수장은 각각 7.01±0.41 cm와 5.77±0.25 cm였으나, 돌연변이 계통에서는 5.49~10.69 cm 범위로 나타나 수장 형질에서도 폭넓은 표현형 변이가 관찰되었다(Table 1). 특히 PL43, PL44 및 PL46은 9 cm 이상의 긴 수장을 나타내어 이삭 형태의 변화가 확인되었는데, 통계분석 결과 PL46(10.69±0.72 cm)이 가장 높은 유의성을 가진 그룹(group a)으로 분류되었으며, 반면 PL12(5.49±0.3 cm)는 대조구인 금강과 함께 최하위 그룹(group h)에 속해 계통 간 극명한 수장 차이

Table 1. Agronomic traits of colored wheat mutant lines, the parental line (PL1), and the control variety (Keumkang: K)

Line	Flowering Time	Stem height (cm)	Spike Length (cm)	Total seed yield (g/m^2)	Test weight (g/L)	100-kernel weight (g)
PL1	4/24	75.4 ± 4.48^{f}	7.01 ± 0.41^{efg}	312	811.15	4.06 ± 0.07^{bc}
PL2	4/13	87.3 ± 4.06^{e}	6.3 ± 0.32^{gh}	240	832.7	4.26 ± 0.18^{b}
PL8	4/24	107.3 ± 5.76^{d}	7.6 ± 0.32^{cde}	355	884.25	4.13 ± 0.05^{bc}
PL12	4/20	103.1 ± 3.70^{d}	5.49 ± 0.30^{h}	334	820.05	3.76 ± 0.18^{c}
PL13	4/21	111.8 ± 5.77^{cd}	7.97 ± 0.48^{cd}	427	816.2	4.24 ± 0.10^{b}
PL14	4/21	109.9 ± 9.56^{cd}	8.3 ± 0.48^{c}	403	789.25	4.23 ± 0.02^{b}
PL36	4/21	112 ± 5.16^{cd}	7.69 ± 0.32^{cde}	358	809.2	4.33 ± 0.16^{b}
PL39	4/26	90 ± 6.16^{e}	7.94 ± 0.51^{cd}	317	846.65	5.08 ± 0.25^{a}
PL42	4/25	117.5 ± 4.38^{bc}	8.09 ± 0.18^{cd}	335	830.5	3.02 ± 0.01^{d}
PL43	4/24	118 ± 4.35^{c}	9.72 ± 0.80^{b}	328	798.9	3.78 ± 0.12^{c}
PL44	5/10	131.3 ± 6.63^{a}	10.58 ± 0.74^{ab}	233	824.05	4.24 ± 0.07^{b}
PL45	4/27	93.2 ± 4.39^{e}	6.7 ± 0.61^{fg}	335	842.7	3.05 ± 0.16^{d}
PL46	5/3	126.6 ± 3.92^{ab}	10.69 ± 0.72^{a}	307	846.95	4.40 ± 0.11^{b}
PL48	4/17	90.4 ± 3.34^{e}	7.25 ± 0.33^{def}	332	857.1	4.15 ± 0.08^{bc}
K	4/13	92.2 ± 5.29^{e}	5.77 ± 0.25^{h}	340	824.75	4.28 ± 0.05^{b}

Statistical significance was determined by one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test at the 1% level ($p<0.01$).

를 보였다. 출수기는 4월 중순부터 5월 초까지 분포하여 계통 간 개화 시기의 차이가 확인되었으며, 일부 계통(PL44, PL46)은 상대적으로 늦은 출수 특성을 보였다. 총수량은 233~427 g/m^2 범위로 계통 간 변이가 컸으며, PL13과 PL14는 비교적 높은 수량을 나타냈다. 백립중은 3.02~5.08 g 범위로 나타났으며, 통계분석 결과 PL39 (5.08±0.25 g)가 통계적으로 가장 무거운 그룹(group a)으로 분류되어 대립 특성을 입증하였고, PL42와 PL45는 가장 낮은 그룹(group d)으로 분류되어 백립중 형질에서도 유의미한 변이가 확보되었음을 확인하였다. 이러한 결과는 감마선 돌연변이 육종을 통해 유색밀에서 초형, 이삭 형태 및 생육 시기와 관련된 농업형질 다양성이 효과적으로 확보될 수 있음을 보여준다.

3.2. 종자, 밀가루 및 밀기울의 색도 특성 및 안토시아닌 함량

감마선 조사로부터 유래된 유색밀 돌연변이 계통들은 종자, 밀가루 및 밀기울에서 색도(L^*, a^*, b^*) 특성과 안토시아닌 함량 모두에서 계통 간 뚜렷한 차이를 나타냈으며, 통계분석 결과, 모든 시료의 색도 지표에서 계통 간 고도의 유의성이 인정되었다 ($p<0.01$) (Fig. 1, Table 2). 밀가루의 경우, 종자에 비해 전반적으로 높은 L^*값을 나타내어 제분 과정에서 밀기울의 탈락으로 인해 색도가 밝아지는 경향을 보였고, a^* 및 b^*값에서는 계통 간의 차이가 유지되어 고유의 색 특성이 일부 반영됨을 확인할 수 있었다(Table 2). 종자의 명도(L^*)는 PL2, PL43, PL44, PL48에서 높게 나타났으며(group a-d), 밀가루 제분 후에도 동일계통에서 높은 L^* 수치(group a-c)를 기록하며 모든 계통 중 가장 밝은 색도를 유지하였다. 종자의 a^*, b^*는 밀가루와 마찬가지로 계통 간 변이를 보였다. 밀기울에서도 L^*값은 PL2, PL43, PL44, PL48 계통에서 높게 나타났으며(group a-c), a^*, b^*는 다른 조직에서와 마찬가지로 계통 간 변이를 보였다(Table 2). 안토시아닌 분석 결과, 밀가루와 밀기울 모두에서 돌연변이 계통 간 유의한 차이가 관찰되었으며, 밀기울의 안토시아닌 함량은 밀가루에 비해 전반적으로 높은 수준을 나타냈다(Fig. 2). 특히 일부 돌연변이 계통에서는 밀기울에서 높은 안토시아닌 함량과 함께 상대적으로 낮은 L^* 값이 관찰되어, 색도 변화와 기능성 색소 축적 간의 연관성이 시사되었다. 특히 통계적으로 가장 높은 안토시아닌 함량을 나타낸 PL36 (밀기울 함량 11.29±0.37, group a)과 PL13 (group a) 및 PL1 (group a) 계통은 종자의 L^* 값이 45.1-45.8 범위(group j, k)로 낮게 관찰되어, 기능성 색소 축적과 명도 감소 간의 통계적 연관성이 명확히 확인되었다(Table 2, Fig. 2). 반면, 모든 계통에서 색도 지표와 안토시아닌 함량이 일대일로 대응되지는 않아, 색 특성은 안토시아닌 뿐만 아니라 기타 색소 및 조직 구성 요소의 영향을 함께 받는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 감마선 돌연변이 육종을 통해 유색밀에서 색도 특성과 기능성 성분 축적이 동시에 다양화될 수 있음을 보여주며, 종자뿐만 아니라 밀기울과 같은 부산물에서도 기능성 소재로서의 활용 가능성이 확대될 수 있음을 시사한다.

3.3. 종자 영양 성분 비교

종자 영양성분 분석 결과, 유색밀 돌연변이 계통들은 수분, 탄

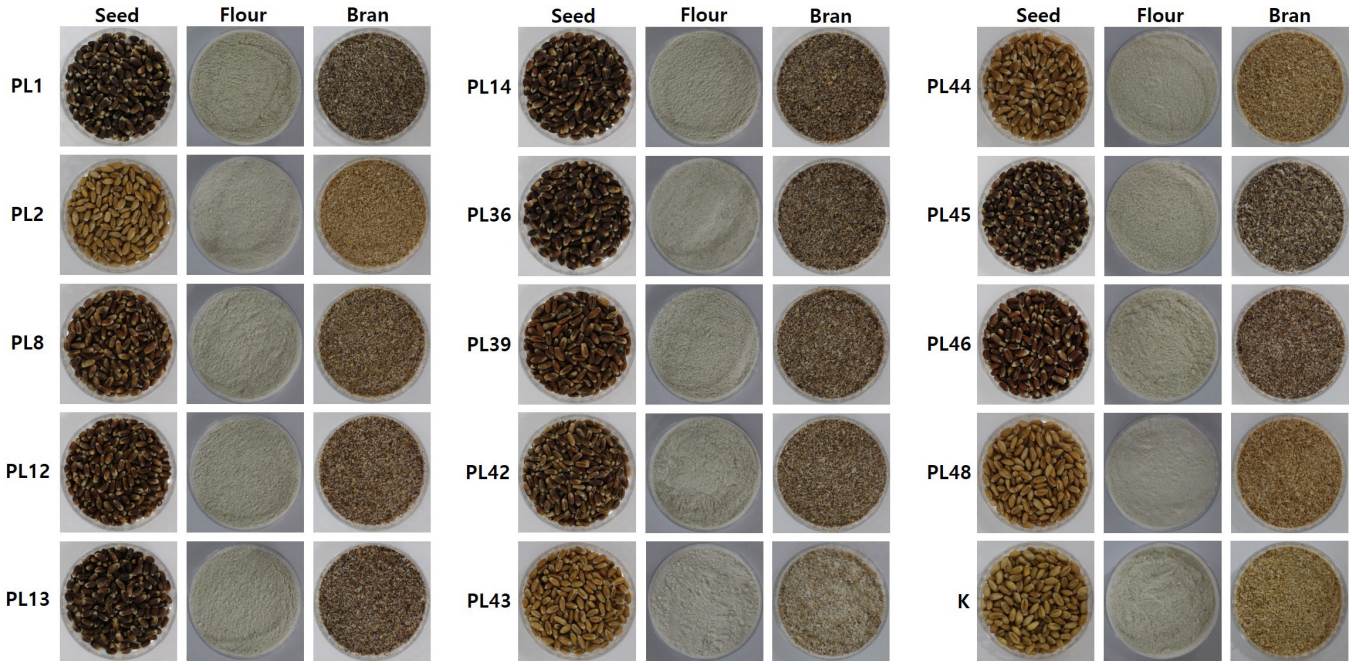

Fig. 1. Morphological features of colored wheat mutants. Whole seeds, Milled flour, and Separated bran from various mutant lines. PL1 represents the parental line, and K denotes 'Keumkang', the control variety.

수화물 및 단백질 함량에서 계통 간 뚜렷한 변이를 나타냈다(Table 3). 통계 분석 결과, 모든 영양성분 항목에서 계통 간 유의미한 차이가 확인되었다($p<0.01$). 모든 종자의 수분 함량은 9.3~10.9% 범위 내에 분포하고 있어 곡물의 장기 저장 및 유통에 적합한 표준 수분 함량(보통 12% 이하)을 만족하는 수치로, 모든 계통이 수확 후 관리 측면에서 안정적인 특성을 가졌고, 분석 시료 간 수분 상태의 균일성이 확보되었음을 보여주었다(Table 3). 수분함량은 PL2 (10.9±0.01%, group a)에서 가장 높고 PL1 (9.3±0.26%, group f)에서 가장 낮았으나, 전 계통이 통계적으로 유사한 범위 내에 있음이 확인되었다. 단백질 함량은 계통 간 12.03%에서 18.63%까지 폭넓은 변이를 나타냈다. 특히 PL36 (18.63%), PL13 (17.5%), PL14 (17.3%) 및 PL46 (17.13%) 계통은 원품종(PL1, 16.07%) 및 대비품종인 금강밀(15.73%)보다 높은 단백질 함량을 보유하여, 고단백 기능성 밀 품종 육성을 위한 중간 모본으로서 가치가 높을 것으로 판단된다. Tukey 사후검정 결과, PL36은 단백질 함량에서 최상위 그룹(group a)에 속해 대조구인 금강밀(group de)과 통계적으로 뚜렷한 차이를 보였으며, PL13 (group ab) 및 PL14, PL46 (group bc) 또한 유의미하게 높은 단백질 축적 능력을 나타냈다(Table 3). 반면, PL8 (12.03%)과 PL2 (12.23%)는 상대적으로 낮은 단백질 함량을 보여 단백질 함량에 따른 용도별(제과용 등) 활용 가능성을 제시할 수 있다. 탄수화물은 단백질 함량과 상반되는 경향을 나타낸다. 단백질 함량이 낮았던 PL8 (85.97%), PL2 (85.77%)에서 가장 높은 탄수화물 함량이 관찰되었다. 이들은 통계적으로 가장 높은 탄수화물 함량을 보인 PL8 (85.97±0.38 %, group a)과 PL2 (group ab)는 단백질 함량이 가장 낮았던 계통들로, 두 성분 간의 상반된 변이가 유의미함을 확인해 주는 결과라 판단된다. 원품종인 PL1 (81.93%)에 비해 대부분의 계통이 80~85% 범위의 탄수화물 함량을 유지하고 있어, 기본적인 에너지 공급원으로서의 기능은 안정적으로 유지되고 있다. 이러한 결과는 기존 국내 밀 품종에서 보고된 단백질 함량 변이 폭보다 상대적으로 넓은 범위를 나타낸 것으로, 방사선 돌연변이 육종을 통해 종자 성분의 다양성을 효과적으로 확보할 수 있음을 보여준다.

3.4. 형질 간 상관관계 및 주성분 분석(PCA)을 통한 변이계통의 유연관계 규명

농업형질과 종자 성분 및 색도 특성 간의 상호 연관성을 분석한 결과, 다양한 형질 조합에서 통계적으로 유의미하고 밀접한 상관관계가 확인되었다(Fig. 3A). 특히 절대값 0.7 이상의 높은 상관계수를 나타내는 주요 형질들을 중심으로 분석한 결과는 다음과 같다. 양(+)의 상관관계에서는 영양성분 중 탄수화물과 단백질 함량 사이에서 가장 높은 수준의 음의 상관관계($r=-1.000$)가 확인되었으나, 이는 두 성분이 종자 구성의 대부분을 차지하며 상보적인 관계를 형성하기 때문으로 판단된다. 색도 특성에서는 밀기울의 명도(P_L)와 밀가루의 명도(F_L) 사이($r=0.905$), 그리고 종자의 명도(S_L)와 황색도(S_b) 사이($r=0.984$)에서 매우 높은 정적 상관이 관찰되어 종자 외부의 색상이 가공 후의 색도에도 직접적인 영향을 미침을 보여주었다. 농업형질 간에는 간장(SH)과

Table 2. Color coordinates (L^*, a^*, b^*) of seeds, flour, and bran from colored wheat mutants and controls

Line	Seeds			Flour			Bran		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
PL1	45.70±0.13^{h}	3.84±0.23^{gh}	6.46±0.34^{gh}	88.98±0.28^{h}	0.30±0.11^{bc}	10.78±0.05^{b}	59.07±0.04^{k}	3.60±0.16^{def}	7.35±0.17^{i}
PL2	59.11±0.21^{b}	7.67±0.18^{a}	19.85±0.37^{ab}	91.77±0.13^{c}	0.46±0.19^{abc}	8.62±0.06^{f}	67.92±0.08^{c}	6.82±0.33^{a}	15.91±0.36^{bc}
PL8	49.67±0.15^{e}	4.02±0.35^{efgh}	9.81±0.51^{ef}	91.63±0.08^{cd}	0.31±0.018^{bc}	9.38±0.09^{de}	62.91±0.07^{g}	4.52±0.43^{bcd}	9.89±0.31^{d}
PL12	46.97±0.13^{g}	4.88±0.56^{defg}	8.91±0.35^{f}	88.57±0.06i	0.64±0.06^{ab}	9.48±0.19^{de}	60.28±0.10^{i}	4.67±0.57^{bc}	9.66±0.19^{de}
PL13	45.76±0.08^{h}	3.65±0.46^{h}	7.42±0.42^{g}	89.83±0.02^{g}	0.42±0.05^{abc}	9.65±0.12^{cd}	59.63±0.07^{j}	3.71±0.20^{cdef}	8.50±0.36^{gh}
PL14	44.49±0.12^{j}	4.22±0.21^{efgh}	6.44±0.41^{gh}	89.51±0.03^{g}	0.58±0.05^{abc}	9.74±0.15^{cd}	58.12±0.12^{l}	4.23±0.12^{cdef}	8.39±0.16^{gh}
PL36	45.12±0.09^{i}	3.97±0.32^{fgh}	7.14±0.37^{g}	89.61±0.03^{g}	0.47±0.12^{abc}	9.97±0.02^{c}	59.76±0.11^{j}	3.65±0.31^{def}	8.95±0.12^{efg}
PL39	48.04±0.16j	5.11±0.29^{cdef}	10.77±0.31^{e}	90.46±0.01^{f}	0.44±0.13^{abc}	9.13±0.08^{e}	65.28±0.06^{d}	3.46±0.11^{ef}	8.71±0.16^{fgh}
PL42	47.03±0.03^{g}	5.22±0.10^{bcde}	9.82±0.16^{ef}	91.66±0.03^{cd}	0.39±0.07^{abc}	9.51±0.05^{d}	64.96±0.08^{e}	3.80±0.22^{cdef}	9.77±0.24^{de}
PL43	58.23±0.04^{c}	6.26±0.08^{bc}	17.65±0.27^{c}	94.30±0.03^{a}	0.19±0.06^{c}	7.00±0.08^{g}	80.08±0.06^{a}	3.32±0.13^{f}	9.55±0.22^{def}
PL44	57.70±0.06^{d}	5.82±0.18^{bcd}	15.75±0.25^{d}	91.33±0.03^{de}	0.77±0.07^{a}	11.40±0.04^{a}	68.21±0.06^{c}	6.61±0.02^{a}	16.34±0.04^{ab}
PL45	43.53±0.14^{k}	3.37±0.33^{h}	5.59±0.14^{h}	91.05±0.03^{e}	0.27±0.06^{bc}	10.87±0.10^{b}	64.40±0.06^{f}	3.42±0.24^{ef}	7.94±0.16^{hi}
PL46	44.08±0.07^{j}	5.47±0.41^{bcd}	7.13±0.49^{g}	90.20±0.04^{f}	0.45±0.16^{abc}	11.75±0.12^{a}	61.32±0.07^{h}	4.39±0.10^{cde}	8.18±0.13^{ghi}
PL48	57.30±0.08^{d}	7.74±0.24^{a}	18.8±0.14^{bc}	92.67±0.02^{b}	0.44±0.11^{abc}	8.73±0.07^{f}	68.01±0.09^{c}	7.01±0.21^{a}	15.37±0.35^{c}
K	60.25±0.02^{a}	6.39±0.33^{b}	20.19±0.41^{a}	91.85±0.04^{c}	0.27±0.19^{bc}	9.58±0.06^{d}	71.32±0.01^{b}	5.43±0.12^{b}	17.16±0.11^{a}

Statistical significance was determined by one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test at the 1% level (p<0.01).

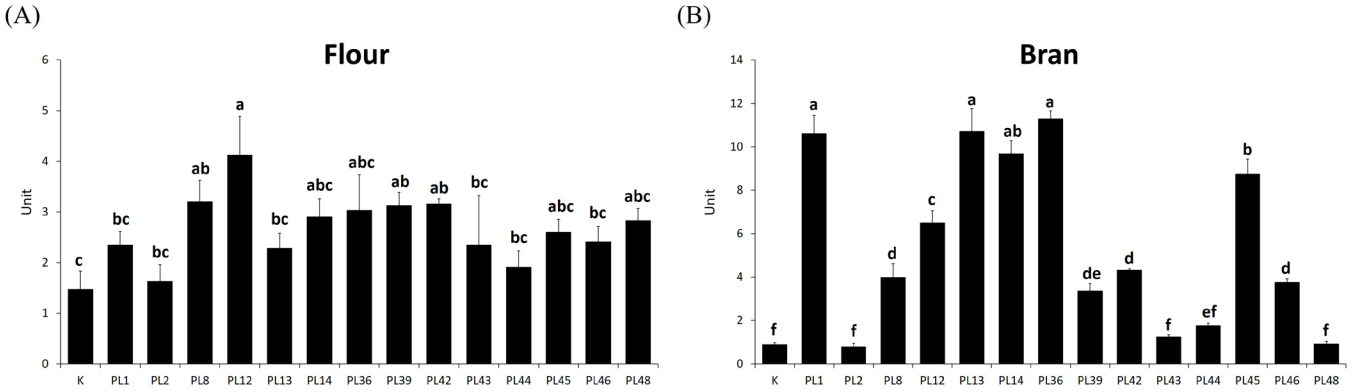

Fig. 2. Anthocyanin content in different milling fractions of pigmented wheat mutant lines. (A) Flour: Anthocyanin content determined in the wheat flour fraction. (B) Bran: Anthocyanin content determined in the pericarp layer. Data are expressed as mean±SD (n=3). Different letters above the bars indicate significant differences among lines according to Tukey's HSD test at the 1% level (p<0.01).

Table 3. Content of moisture, carbohydrates, and crude protein in seeds of colored wheat mutants, the parental line (PL1), and the control variety (K)

Line	Water (%)	Carbohydrate (%)	Protein (%)
PL1	9.3±0.26^{f}	81.93±0.21^{ef}	16.07±0.21^{cd}
PL2	10.9±0.01^{a}	85.77±0.25^{ab}	12.23±0.25^{gh}
PL8	10.67±0.06^{abc}	85.97±0.38^{a}	12.03±0.38^{h}
PL12	10.57±0.05^{abcd}	83.7±0.44^{cd}	14.3±0.44^{ef}
PL13	10.03±0.15^{e}	80.5±0.26^{gh}	17.5±0.26^{ab}
PL14	10.1±0.10^{e}	80.7±0.1^{fg}	17.3±0.1^{bc}
PL36	10.1±0.17^{e}	79.37±0.15^{h}	18.63±0.15^{a}
PL39	10.0±0.1^{e}	84.97±0.64^{ab}	13.03±0.64^{gh}
PL42	10.53±0.06^{abcd}	82.87±0.32^{de}	15.13±0.32^{de}
PL43	10.8±0.1^{ab}	81.83±0.47^{ef}	16.17±0.47^{cd}
PL44	10.33±0.06^{cde}	82.37±0.15^{e}	15.63±0.15^{d}
PL45	10.73±0.06^{abc}	82.8±0.2^{de}	15.2±0.2^{de}
PL46	10.4±0.09^{bcde}	80.87±0.35^{fg}	17.13±0.35^{bc}
PL48	10.73±0.12^{abc}	84.67±0.35^{bc}	13.33±0.35^{fg}
K	10.17±0.06^{de}	82.63±0.49^{de}	15.37±0.55^{de}

Statistical significance was determined by one-way ANOVA followed by Tukey's HSD test at the 1% level (p<0.01).

수장(SL) 사이에서 높은 양의 상관관계(r= 0.766)가 나타나 초형의 증대가 이삭의 발달과 밀접하게 연동되어 있음을 확인하였다. 음(–)의 상관관계에서는 기능성 성분인 안토시아닌 축적과 색도 지표 간의 관계가 뚜렷하게 나타났다. 밀기울의 안토시아닌 함량(Ant_P)은 종자의 명도(S_L, r= −0.816), 적색도(S_a, r= −0.859), 황색도(S_b, r= −0.851) 모두와 강한 부적 상관을 나타냈다. 또한 밀기울의 명도(P_L, r= −0.766) 및 밀가루의 명도(F_L, r= −0.743) 역시 안토시아닌 함량과 유의미한 음의 상관관계를 보였다. 이는 밀기울에 안토시아닌 색소가 많이 축적될수록 전체적인 명도가 낮아지고 고유의 어두운 색상이 짙어짐을 의미하며 안토시아닌 색소의 축적이 종자 전체와 가공 제품의 시각적 특성을 결정하는 주요 요인임을 입증하였다.

감마선 조사로 유도된 유색밀 돌연변이 계통들의 복합적인 형질 변이를 종합적으로 평가하고 계통 간 유연관계를 규명하기 위해 주성분 분석(PCA)을 수행하였다. 분석 결과, 제1주성분(PC1)과 제2주성분(PC2)은 전체 변이의 상당 부분을 설명하였으며, Biplot 상에서 각 계통은 종자색 표현형 및 주요 농업형질의 특성에 따라 뚜렷한 군집(Cluster)을 형성하였다(Fig. 3B). 첫 번째 군집(Group I)은 대조구인 금강(K)을 포함하여 PL2, PL43, PL44, PL48 등 종피색이 밝은 계통들로 구성되었다. Fig. 1의 시각적 자료에서 확인되듯 이들은 높은 명도(L*)를 보유하고 있으며, 통계적으로도 탄수화물 함량과 정(+)의 상관관계를 보이는 영역에 집중 배치되어 유색밀 중 대조구와 유사한 일반적인 영양성분 조성을 유지하고 있음이 확인되었다. 두 번째 군집(Group II)은 PL1, PL13, PL14, PL36, PL46 등 사진상에서 진한 자색(Purple) 및 흑색(Black)을 나타내는 고안토시아닌 기능성 변이 계통들을 포함한다. 이 그룹은 PCA Biplot 상에서 안토시아닌 함량(Ant_P, Ant_F) 및 단백질 함량과 동일한 방향에 위치하여 기능성 성분이 고도로 축적된 계통들임을 입증하였다. 특히 통계적으로 가장 높은 안토시아닌과 단백질 함량을 보인 PL36과 PL13은 명도(L*) 형질의 정반대 방향에 위치함으로써, 종피색의 심화가 기능성 성분 증진과 밀접하게 연동된 형질 분화임을 통계적으로 뒷받침하였다. 마지막으로 세 번째 군집(Group III)은 색상 변이 외에 극단적인 형태적 변이를 나타내는 PL44, PL42, PL39 등의 계통들로 분류되었다. PL44와 PL42는 간장(Stem height) 및 수장(Spike length) 형질의 방향으로 길게 치우쳐 위치하여 초형의 대형화 변이가 뚜렷하게 나타났으며, 대립종 특성을 보인 PL39는 백립중

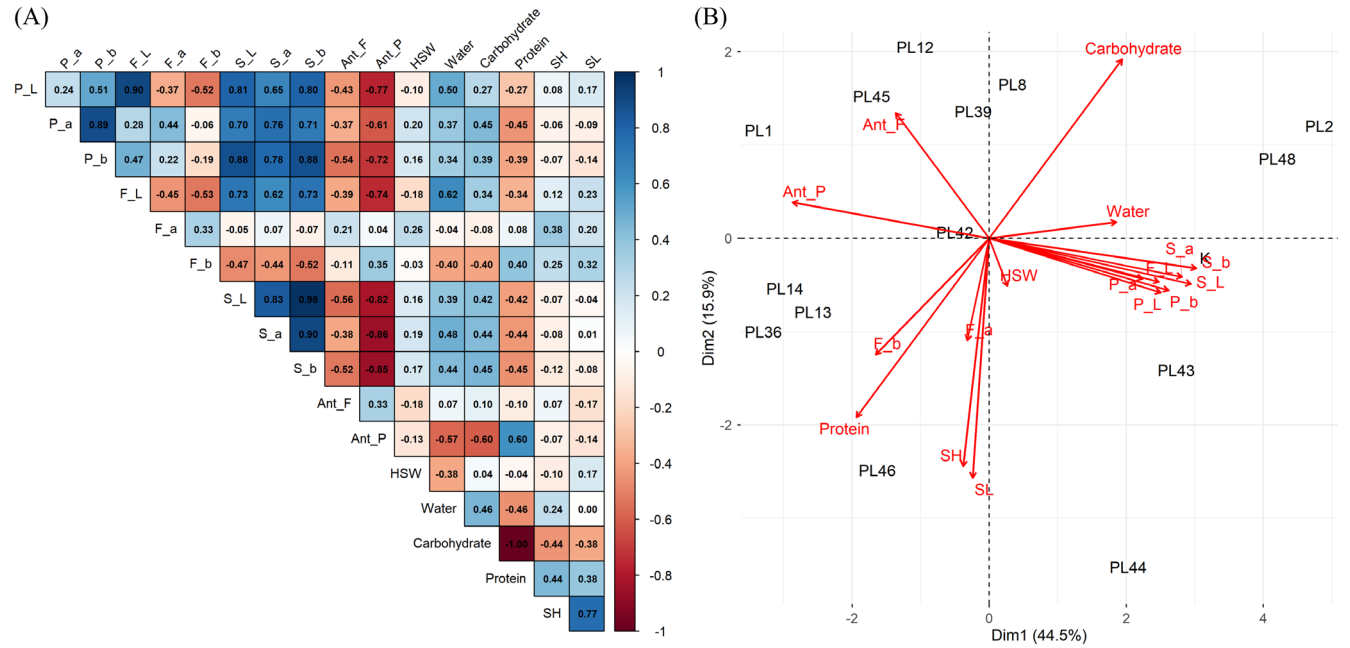

Fig. 3. Multivariate statistical analysis of agricultural, nutritional, and color properties in pigmented wheat mutant lines. (A) Correlation heatmap displaying Pearson's correlation coefficients (r) among 17 traits. The color scale indicates the strength and direction of the relationship (Blue: positive correlation; Red: negative correlation). (B) PCA Biplot visualizing the genetic and phenotypic distribution of mutant lines based on the first two principal components (PC1 and PC2). The red arrows represent the contribution and direction of individual traits to the variance. P_L: Lightness of bran, P_a: Redness of bran, P_b: Yellowness of bran, F_L: Lightness of flour, F_a: Redness of flour, F_b: Yellowness of flour, S_L: Lightness of seed, S_a: Redness of seed, S_b: Yellowness of seed, Ant_F: Anthocyanin content in flour, Ant_P: Anthocyanin content in bran, HSW: Hundred Seed Weight, SH: Stem Height, SL: Spike Length.

(HSW)과 높은 상관성을 보이며 독자적인 변이 영역을 형성하였다. 이러한 결과는 Figure 1에서 관찰되는 육안상의 종자색 변이가 단순한 외형적 변화를 넘어, 식물의 영양학적 조성 및 농업적 생육 특성의 체계적인 분화를 동반하고 있음을 시사한다.

3.5. 밀가루 반죽 및 호화 특성 비교

믹소랩 분석 결과, 반죽 혼합 단계부터 가열 및 냉각 과정까지의 토크 변화가 계통별로 상이하게 나타났으며, 이를 통해 돌연변이 계통 간 반죽 형성, 구조적 안정성 및 전분 거동의 차이가 확인되었다(Table 4). 단백질 및 반죽 형성 지표인 C1, C2 구간은 반죽의 물리적 강도와 단백질의 질을 나타낸다. 반죽 형성 단계의 최대 토크인 C1은 1.204~1.997 Nm 범위를 나타냈다. PL43이 1.997로 가장 높고, 금강이 1.204로 낮아 반죽의 초기 단단함에 차이가 있었다. 반죽 형성 시간(dough development time)은 PL45 (2.95 min)으로 길게 나타나 금강(2.98 min)만큼은 덜 했으나 글루텐 매트릭스 형성에 더 많은 에너지가 요구되는 강력분 계통의 전형적인 물리적 성질을 나타내는 것으로 판단된다. 반죽의 안정성(Stability)은 대부분의 계통이 원품종(PL1, 1.6 min)보다 높은 안정도를 보였다. PL48 (3.8 min), PL45 (3.3 min)은 원품종보다 2배 이상 안정도가 높아 가공 시 반죽이 매우 잘 견디는 특성을 가진 것으로 확인되었다. 대조품종인 금강(4.8 min)보다는 낮지만 원품종의 약한 반죽 특성이 돌연변이 계통에서는 상당 부분 개선되었다.

C2는 온도가 상승함에 따라 반죽의 토크가 최소로 떨어지는 지점으로 단백질의 강도를 반영하며 C2값이 높을수록 단백질의 열에 대한 저항성이 높음을 의미한다. C2 토크값은 0.388-0.565 Nm 범위로 계통간 차이를 보였으며, PL12 (0.565 Nm)와 PL39(0.558 Nm)가 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 반면 PL46은 0.409 Nm로 낮은 수준을 보였다. 유색밀 돌연변이 후대 계통이 금강(0.388 Nm)에 비해 높은 값을 나타냈으며 이는 유색밀의 단백질 강도가 더 강함을 의미한다. 전분의 호화 거동을 반영하는 C3 토크는 1.564~1.956 Nm 범위로 분포하였다. PL43 (1.986 Nm)과 PL39 (1.925 Nm)은 전분의 호화(Starch Gelatinization) 시 점도가 높게 측정되어 전분의 팽창력이 좋아 제품의 탄력이나 쫄깃한 식감을 높이는데 유리할 것으로 판단된다. 고온 유지 단계에서의 전분안정성을 나타내는 C4 값은 1.295~1.664 Nm 범위로 나타났으며, PL43 (1.664 Nm)와 원품종(PL1, 1.647 Nm)은 상대적으로 높은 값을 보여 고온 조건에서도 점도 유지 능력이 우수한

Table 4. Rheological properties of dough from colored wheat mutant lines determined by Mixolab

Line	C1 (Nm)	Dough Development Time (min)	Stability (min)	C2 (Nm)	C3 (Nm)	C4 (Nm)	C5 (Nm)
PL1	1.91	2.15	1.6	0.557	1.698	1.647	3.308
PL2	1.534	2.32	2.9	0.482	1.746	1.295	2.763
PL8	1.488	1.22	2.5	0.453	1.827	1.514	2.531
PL12	1.928	2.18	2.90	0.565	1.826	1.326	3.009
PL13	1.693	2.07	2.00	0.475	1.723	1.291	2.954
PL14	1.589	2.32	2.00	0.483	1.759	1.373	2.879
PL36	1.761	2.90	2.20	0.488	1.766	1.475	2.945
PL39	1.795	1.52	2.30	0.558	1.925	1.526	2.761
PL42	1.511	2.25	2.30	0.441	1.793	1.525	2.920
PL43	1.997	1.60	1.40	0.480	1.986	1.664	2.683
PL44	1.662	2.42	2.40	0.458	1.683	1.582	3.261
PL45	1.629	2.95	3.30	0.507	1.669	1.543	3.465
PL46	1.466	2.43	2.40	0.409	1.564	1.494	3.003
PL48	1.499	2.17	3.80	0.445	1.752	1.354	2.845
K	1.204	2.98	4.8	0.388	1.693	1.393	2.363

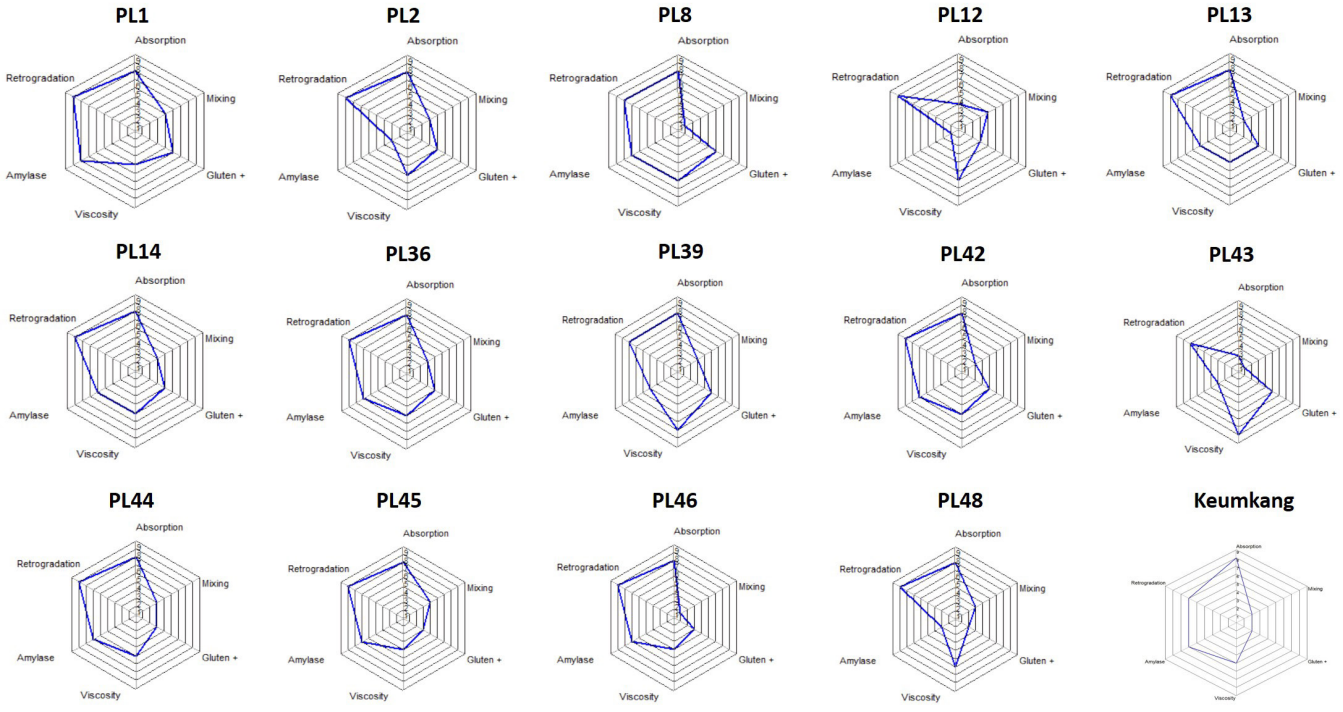

Fig. 4. Spider plots illustrating the variation in Mixolab indices among different colored wheat mutant lines, the parental line (PL1), and the control variety (Keumkang). Individual charts represent the unique rheological fingerprints of each based on six Mixolab indices: water absorption, mixing, gluten, viscosity, amylase activity, starch retrogradation. These profiles highlight the comparative differences in dough processing quality between the mutants and the controls.

계통으로 나타났다. 냉각 과정에서의 전분 재결정화(노화)를 반영하는 C5 값은 2.363~3.465 Nm 범위로 분포하였다. PL45 (3.465 Nm)와 PL1 (3.308 Nm)은 냉각 시 점도가 높게 나타나 다른 계통에 비해 상대적으로 노화가 빠르게 진행되어 반죽이 쉽게 딱딱해질 가능성이 있다. 반면 PL8 (2.531 Nm)이나 PL43 (2.683 Nm)은 대조품종인 금강(2.363 Nm)에 비해서는 높으나 원품종(PL1, 3.308 Nm)에 비해서는 낮게 수치를 나타내 반죽의 부드러움이 오래 유지될 수 있는 조건을 갖췄다. C1~C5값을 바탕으로 6개 지표인 흡수(absorption), 혼합(mixing), 글루텐 특성(gluten), 점도(viscosity), 아밀레이즈 활성(amylase), 노화(retrogradation)를 0~8 사이의 점수로 표현하여 스파이더 그래프로 나타냈을 때, Fig. 4와 같이 나타났다.

고 찰

본 연구에서 감마선 조사를 통해 유도된 유색밀 돌연변이 계통들은 간장, 수장, 출수기 등 주요 농업형질에서 원품종(PL1) 및 대조품종(금강)의 범위를 크게 벗어나는 넓은 변이 폭을 나타냈다. 특히 PL43, PL44, PL46과 같이 간장이 117 cm 이상으로 증대된 계통이나, 수장이 9 cm 이상 길어진 계통이 발견되었는데 이는 감마선 조사에 의해 생육 및 형태 형질과 관련된 유전자 영역에 다양한 변이가 유도되었음을 시사한다[12,24]. 이는 감마선이 식물 게놈 내의 특정 유전자군에 무작위적 변이를 유도함으로써 기존 교배 육종으로는 확보하기 어려운 생물학적 다양성을 단기간에 창출했음을 의미하며, 향후 목적에 따른 품종 육성을 위한 귀중한 유전자원으로 활용될 수 있다.

종자, 밀가루 및 밀기울에서 관찰된 색도(L^*, a^*, b^*) 특성과 안토시아닌 함량 간 차이는 방사선 조사가 안토시아닌 생합성 경로 또는 축적 기작에 유의미한 변화를 유도했음을 보여준다[25]. 밀기울의 안토시아닌 함량이 밀가루보다 월등히 높게 나타난 결과는 안토시아닌이 주로 종자의 외피층에 분포한다는 기존 연구들과 일치하며, 이는 가공 부산물로 치부되던 밀기울을 고부가가치 기능성 소재로 재평가할 수 있는 근거를 제공한다[3,26]. 다만, 일부 계통에서 색도 지표와 안토시아닌 함량이 일치하지 않은 점은 유색밀의 색 특성이 안토시아닌 단일 성분에 의해서만 결정되지 않으며, 플라보노이드 계열의 다른 색소 성분, 페놀성 화합물 등 다른 항산화 성분들이 복합적으로 변이에 관여하고, 또한 조직 구조적 요인의 영향을 함께 받는다는 점을 시사한다[27]. 이는 색도 분석 결과만으로 기능성 성분 함량을 단정하기 어렵다는 점을 보여주며, 향후 기능성 유색밀 육성을 위해서는 색도 분석과 화학적 정량 분석을 병행하는 접근이 필요함을 의미한다.

종자의 단백질 함량이 12.03%에서 18.63%까지 넓게 분포한 점은 본 연구의 가장 주목할 만한 성과 중 하나이다. 특히 PL36, PL13 등 원품종보다 높은 단백질 함량을 보인 고단백 계통들은 기능성 강화 식품 및 강력분 소재로서의 가치가 높다. 반대로 저단백 특성을 보인 PL8 등은 박력분(제과용) 소재로의 차별화가 가능하다. 이러한 단백질 함량의 폭넓은 변이는 감마선 조사가 유전체 전반에 무작위적 변이를 유도함으로써 단백질 및 전분 대사와 관련된 생리적·생화학적 과정에 영향을 미쳤기 때문으로 해석될 수 있다. 실제로 선행 연구들에서는 감마선 조사가 밀에서 곡물 종자 단백질 함량의 변화를 유도하거나 단백질 합성과 관련된 생리 반응에 영향을 미칠 수 있음이 보고된 바 있다[9,28]. 이러한 결과는 감마선 돌연변이 육종이 단백질 함량을 포함한 형질의 다양화를 통해 수요자 맞춤형 유색밀 품종 육성을 위한 유효한 전략이 될 수 있음을 시사한다.

믹소랩 분석을 통해 확인된 반죽안정성(Stability)의 향상은 방사선 돌연변이 육종이 단순히 외형적 변화뿐만 아니라 단백질과 전분의 물리화학적 결합 구조(Gluten matrix)를 실질적으로 개선했음을 입증한다. 원품종(PL1)의 고유한 약점이었던 낮은 반죽안정성이 PL48, PL45 등에서 2배 이상 개선된 점은 제빵 및 제면 공정에서의 가공 효율성을 크게 증대시킬 수 있는 요인이다. 또한, C5 토크값에서 나타난 전분 노화 특성(Retrogradation)의 변이는 매우 흥미롭다. PL8과 PL43이 원품종보다 낮은 C5값을 보인 것은 최종 제품의 저장 기간 중 노화 속도를 늦춰 유통기한을 연장할 수 있는 산업적 이점을 제공한다. 결과적으로 본 연구에서 확보된 유색밀 돌연변이 계통들은 높은 영양성(고단백, 안토시아닌)과 우수한 가공성(반죽 안정성, 노화 지연)을 동시에 충족하는 차세대 기능성 밀 육종의 핵심 재료가 될 것으로 기대된다.

일반적으로 밀가루의 단백질 함량은 반죽의 강도 및 가공 적성과 밀접한 관련이 있는 주요 요인으로 알려져 있으며 단백질 함량이 높을수록 반죽 형성 단계에서의 강도와 혼합 안정성(stability)이 증가하는 경향이 있다고 보고 되어 왔다[29,30]. 그러나 본 연구에서 분석된 유색밀 돌연변이 계통의 데이터에서는 단백질 함량과 믹소랩 반죽 형성 지표 간의 관계가 단순한 양의 상관관계로 설명되지는 않았다. 실제로 종자 단백질 함량과 반죽 형성 단계의 최대 토크(C1)를 비교한 결과, 단백질 함량이 높은 계통이 반드시 높은 C1 토크를 나타내는 경향은 관찰되지 않았다. 이는 C1 토크가 단백질의 총량 뿐만 아니라 밀가루의 수분 흡수 특성, 글루텐 네트워크의 초기 형성 양상, 전분 입자의 물리적 특성 등 복합적인 요인의 영향을 받기 때문으로 판단된다. 즉, 단백질 함량이 높더라도 글루텐의 조성이나 수화 특성이 반죽 형성 단계에서 강한 토크로 나타나지 않을 수 있으며, 본 연구의 돌연변이 계통들에서는 이러한 경향이 명확하게 나타났다. 또한 단백질 함량과 반죽안정성 간의 관계 역시 일관된 선형 상관관계로 설명되기 어려웠다. 일부 고단백 계통에서 안정성이 상대적으로 높게 나타난 사례가 존재하였으나, 이는 모든 고단백 계통에 공통적으로 적용되는 특성은 아니었며, 중간 수준의 단백질 함량을 가진 계통에서도 높은 안정성이 관찰되었다. 이러한 결과는 반죽의 지구력이 단백질의 양적 특성보다는 단백질의 질적 구성과 반죽 내 구조적 배열에 더 크게 의존함을 시사한다[29,31]. 단백질의 열적 거동을 반영

하는 믹소랩 지표(C2)를 통해 분석한 결과에서도, 단백질 함량과 단백질 강도 간에는 명확한 양의 상관관계가 나타나지 않았다.

종합하면, 본 연구 결과는 유색밀 돌연변이 계통에서 단백질 함량이 반죽 형성(C1)이나 단백질 강도를 직접적으로 결정하는 단일 지표가 아님을 명확히 보여준다. 반죽 특성은 단백질의 양적 변화보다는 글루텐 단백질의 질적 특성, 전분과의 상호작용, 그리고 수화 및 열 처리 과정에서의 구조적 거동이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 따라서 방사선 돌연변이 육종을 통해 확보된 유색밀 자원의 가공 적성을 평가할 때에는 단백질 함량 분석과 함께 믹소랩과 같은 물성 평가를 병행하여 단백질의 기능적 특성을 종합적으로 해석하는 접근이 필요하다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원의 주요사업(Project No. 523130-26)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Khalid A, Hameed A and Tahir MF. 2023. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*. **10**:1053196.
2. Garg M, Kaur S, Sharma A, Kumari A, Tiwari V, Sharma S, Kapoor P, Sheoran B, Goyal A and Krishania M. 2022. Raising demand for healthy foods-anthocyanin biofortified colored wheat is a new research trend. *Frontiers in Nutrition*. **9**:878221.
3. Abdel-Aal ESM, Hucl P and Rabalski I. 2018. Compositional and antioxidant properties of anthocyanin-rich products prepared from purple wheat. *Food Chemistry*. **254**:13-19.
4. Sharma N, Tiwari V, Vats S, Kumari A, Chunduri V, Kaur S, Kapoor P and Garg M. 2020. Evaluation of anthocyanin content, antioxidant potential and antimicrobial activity of black, purple, and blue colored wheat flour and wheat-grass juice against common human pathogens. *Molecules*. **25**(24):5785.
5. Sharma S, Chunduri V, Kumar A, Kumar R, Khare P, Kondepu KK, Bishnoi M and Garg M. 2018. Anthocyanin bio-fortified colored wheat: Nutritional and functional characterization. *PLoS One*. **13**(4):e0194367.
6. Gamel TH, Saeed SMG, Ali R and Abdel-Aal ESM. 2023. Purple wheat: Food development, anthocyanin stability, and potential health benefits. *Foods*. **12**(7):1358.
7. Seo Y, Moon Y and Kweon M. 2021. Effect of purple-colored wheat bran addition on quality and antioxidant property of bread and optimization of bread-making conditions. *Applied Sciences*. **11**(9):4034.
8. Šebestíková R, Burešová I, Vyhnánek T, Martinek P, Pospiech M. 2023. Rheological and fermentation properties of doughs and quality of breads from colored wheat varieties. *Heliyon*. **9**(4):e15118.
9. Ma L, Kong F, Sun K, Wang T and Guo T. 2021. From classical radiation to modern radiation: past, present, and future of radiation mutation breeding. *Frontiers in Public Health*. **9**:768071.
10. Li F, Shimizu A, Nishio T, Tsutsumi N and Kato H. 2019. Comparison and Characterization of Mutations Induced by Gamma-Ray and Carbon-Ion Irradiation in Rice (*Oriza sativa* L.) Using Whole-Genome Resequencing. *G3*. **9**(11):3743-3751.
11. Nanhapo PI, Valombola JS, Wanga MA, Elungi K, Awala SK and Horn LN. 2024. Optimum Gamma Irradiation Doses to Enhance Genetic Diversity in Selected Cowpea (Vigna unguiculata) Genotypes. *Reproduction and Breeding*. **4**(2):83-87.
12. Riviello-Flores ML, Cadena-Iñiguez, Ruiz-Posadas L, Arévalo-Galarza L, Castillo-Juárez I, Hernández MS and Castillo-Martínez CR. 2022. Use of Gamma Radiation for the Genetic Improvement of Underutilized Plant Varieties. *Plants*. **11**:1161.
13. Abozahra MS, Amin MA, Sarker TC, Abd-ElGawad AM and Aboelezz E. 2025. Molecular, Biophysical, and Biochemical Studies on Irradiated Zea mays Seeds Using Various Sources of Gamma Rays for Dosimetrical Applications. *Scientific Reports*. **15**:9340.
14. Hong MJ, Ko CS, Kim JB and Kim DY. 2025. Enhancement of the Seed Color, Antioxidant Properties, and Agronomic Traits of Colored Wheat via Gamma Radiation Mutagenesis. *Foods*. **14**:487.
15. Hong MJ, Ko CS and Kim DY. 2025. Genome-Wide Association Study of Agricultural and Biochemical Traits in Radiation-Induced Colored Wheat. *Agronomy*. **15**:1933.
16. Li Y, Ma D, Sun D, Wang C, Zhang J, Xie Y and Guo T. 2015. Total Phenolic, Flavonoid Content, and Antioxidant Activity of Flour, Noodles, and Steamed Bread Made from Different Colored Wheat Grains by Three Milling Methods. *The Crop Journal*. **3**(4):328-334.
17. Wang B, Kang J, Wang S, Haider FU, Zhong Y, Zhang P. 2025. Variations in the End-Use Quality of Whole Grain Flour Are Closely Related to the Metabolites in the Grains of Pigmented Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*. **14**(2):171.
18. Guzmán C, Ibba MI, Álvarez JB, Sissons M and Morris C. 2022. Wheat Quality. In: Reynolds MP, Braun HJ. (eds) Wheat Improvement. Springer, Cham.
19. Dvořáček V, Bradová J, Sedláček T and Šárka E. 2019. Relationships among Mixolab Rheological Properties of Isolated Starch and White Flour and Quality of Baking Products using Different Wheat Cultivars. *Journal of Cereal Science*. **89**:102801.
20. Singh N, Gujral HS, Katyal M and Sharma B. 2019. Relationship of Mixolab Characteristics with Protein, Pasting, Dynamic and Empirical Rheological Characteristics of Flours from Indian Wheat Varieties with Diverse Grain Hardness. *Journal of Food Science and Technology*. **56**(5):2679-2686.
21. Raj AS, Boyacioglu MH, Dogan H and Siliveru K. 2023. Investigating the Contribution of Blending on the Dough Rheology of Roller-Milled Hard Red Wheat. *Foods*. **12**(10):2078.
22. Hong MJ, Kim DY, Nam BM, Ahn JW, Kwon SJ, Seo YW and Kim JB. 2019. Characterization of novel mutants of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) with various depths of purple grain color and antioxidant capacity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **99**(1):55-63.
23. Mita S, Murano N, Akaike M and Nakamura K. 1997. Mutants of Arabidopsis thaliana with pleiotropic effects on the expression of the gene for β-amylase and on the accumulation of anthocyanin that are inducible by sugars. *Plant Journal.* **11**:841-851.
24. Rana A, Rana V, Bakshi S and Sood VK. 2024. Agro-Morphological Evaluation of Gamma Ray-Induced Mutant Populations and Isolation of Harder Grain Mutants in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Genetic Resources*. **22**(6):396-407.
25. Hong MJ, Kim JB, Yoon YH, Kim SH, Ahn JW, Jeong IY, Kang SY, Seo YW and Kim DS. 2014. The Effects of Chronic Gamma Irradi-

ation on Oxidative Stress Response and the Expression of Anthocyanin Biosynthesis-Related Genes in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Radiation Biology*. **90**(12):1218-1228.
26. Varga M, Bánhidy J, Cseuz L and Matuz J. 2013. The Anthocyanin Content of Blue and Purple Colored Wheat Cultivars and Their Hybrid Generations. *Cereal Research Communications*. **41**(2):284-292.
27. Chumanova EV, Efremova TT, Sobolev KV, Kosyaeva EA. 2025. Anthocyanin and Phenolic Compounds in Colored Wheat Grain. *Vavilovskii Zhurnal Genet Selektsii*. **29**(3):392-400.
28. Rahimi MM and Bahrani A. 2011. Influence of Gamma Irradiation on Some Physiological Characteristics and Grain Protein in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *World Applied Sciences Journal*. **15**(5):654-659.
29. Sharma A, Garg S, Sheikh I, Vyas P and Dhaliwal HS. 2020. Effect of wheat grain protein composition on end-use quality. *Journal of Food Science and Technology*. **57**(8):2771-2785.
30. Belitz HD, Grosch W and Schieberle P. 2005. Food Chemistry, Third Edition. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. **382**:10-11.
31. Slisinski EL, Kolster P, Prins A and Vliet T. 2004. On the Relationship Between Gluten Protein Composition of Wheat Flours and Large Deformation Properties of Their doughs. *Journal of Cereal Science*. **39**(2):247-264.