

## 밀의 고분자 글루테닌 조성과 농업 형질이 품질 특성에 미치는 영향

차진경<sup>1</sup> · 신동진<sup>2</sup> · 박현진<sup>1</sup> · 권영호<sup>1</sup> · 이소명<sup>1</sup> · 고종민<sup>3</sup> · 이종희<sup>2,†</sup>

### Effects of High-Molecular-Weight Glutenin Subunits and Agronomic Traits on Bread Wheat Quality Parameters

Jin-Kyung Cha<sup>1</sup>, Dongjin Shin<sup>2</sup>, Hyeonjin Park<sup>1</sup>, Youngho Kwon<sup>1</sup>, So-Myeong Lee<sup>1</sup>, Jong-Min Ko<sup>3</sup>, and Jong-Hee Lee<sup>2,†</sup>

**ABSTRACT** Improving flour quality is one of the major targets of wheat breeding programs. This study determined the optimum high-molecular-weight glutenin subunits (HMW-GS) to improve flour quality, and analyzed the correlation between agronomic and quality traits in Korea. A total of 180 wheat varieties, including 55 Korean and 125 foreign cultivars, carrying various *Glu-1* alleles, were evaluated for their quality and agronomic traits. Results indicated that *Glu-A1b*, *Glu-B1b*, and *Glu-D1f* were the most prevailing alleles for each *Glu-1* locus for Korean wheat cultivars. Korean wheat cultivars recorded shorter days to heading (DTH) and longer days to maturity (DTM) compared to foreign cultivars. In addition, an interaction effect was found between *Glu-A1* and *Glu-B1* alleles on several quality parameters. The combination of *Glu-A1c* and *Glu-B1i* showed a higher protein content, dry gluten content, and higher sodium dodecyl sulfate (SDS) sedimentation value than other *Glu-A1*×*Glu-B1* combinations. Cultivars carrying *Glu-A1a* or *Glu-A1b*, *Glu-B1i* or *Glu-B1al*, and *Glu-D1d* for each *Glu-1* locus exhibited a longer mixing time and stronger mixing tolerance. The DTM positively correlated with the protein content, gluten index and SDS sedimentation value. However, a negative correlation was observed between DTH and quality traits. Owing to the above results, this study suggests that an increase in the frequency of *Glu-B1i* or *Glu-B1al*, *Glu-D1d* coupled with a short DTH and long DTM could significantly improve wheat quality properties.

**Keywords** : agronomic traits, high-molecular-weight glutenin subunits, quality, wheat

밀은 우리나라 제 2의 주곡이며, 일반적으로 밀가루로 제분하여 빵·국수·과자 등 다양한 가공식품의 형태로 소비된다(Vancini *et al.*, 2019). 밀의 품질은 수량성과 더불어 가장 중요한 육종 목표 중 하나이며, 고품질 밀 품종 개발을 위해 단백질 함량·글루테닌의 양과 질·침전가·믹소그래프 특성 등 밀가루의 특성을 평가하는 방법과 이들 특성을 향상시키는 연구가 이루어져왔다(Kiszonas *et al.*, 2018). 하지만 이러한 형질들을 평가하기 위해서는 실제로 육성된 계통을 포장에서 재배하고 제분하는 등의 과정을 거쳐야하기 때문에 많은 시간과 노동력을 필요로 한다. 따라서 육종가들은 제빵 적성과 밀접한 관계가 있는 글루테닌 단백질의 유전적 조

성을 육종 프로그램에 이용하고 있다(Gao *et al.*, 2020).

밀의 글루테닌 단백질은 크게 글루테닌과 글리아딘 그룹으로 나뉘며(Shewry, 2009), 그 중 제빵 적성과 가장 연관성이 높은 것은 글루테닌이다(Islam *et al.*, 2019). 글루테닌은 고분자 글루테닌(HMW-GS)과 저분자 글루테닌(LMW-GS)으로 구분되는데, HMW-GS는 밀의 제빵 특성을 잘 설명해 줄 뿐만 아니라 LMW-GS에 비해 단백질의 분리와 식별이 용이하기 때문에 육종프로그램에서 쉽게 이용할 수 있다(Rasheed *et al.*, 2014). HMW-GS 조성을 결정하는 유전자는 밀 1A, 1B, 1D 염색체 장완의 *Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1* loci에 위치한다(Payne, 1987). Payne *et al.* (1987)은 침전

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 논이용작물과 농업연구소 (Junior Scientist, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 50424, Korea)

<sup>2</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 논이용작물과 농업연구소 (Senior Scientist, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang 50424, Korea)

<sup>3</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 밀연구팀 농업연구소 (Senior Scientist, National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Korea)

†Corresponding author: Jong-Hee Lee; (Phone) +82-55-350-1168; (E-mail) [ccrijih@korea.kr](mailto:ccrijih@korea.kr)

<Received 22 March, 2022; Revised 13 May, 2022; Accepted 16 May, 2022>

가 분석 결과를 바탕으로 제빵 특성이 우수한 HMW-GS 조성을 구명하고 *Glu-1* 점수 체계를 발표하였다. 그의 연구에 따르면 *Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1* 각각의 loci에서 *Glu-A1a*와 *Glu-A1b*, *Glu-B1i*와 *Glu-B1b*, 그리고 *Glu-D1d*의 침전가가 높았다. 기타 품질 특성과 HMW-GS 조성 간의 상관관계를 구명한 연구들은 공통적으로 *Glu-1* 점수가 높은 자원들이 침전가뿐만 아니라 다른 품질 특성도 우수하다는 결과로 Payne *et al.* (1987)의 이론을 뒷받침하였다. 단백질 함량과 글루텐 강도, 반죽의 점착성 및 신장성은 모두 *Glu-1* 점수와 정의 상관관계가 있었고(Park *et al.*, 2002; Vancini *et al.*, 2019), 믹소그래프 반죽 강도는 *Glu-A1*에서 *Glu-1* 점수가 가장 높은 *Glu-A1a*이 가장 높았다(Luo *et al.*, 2001). 한편 Payne *et al.* (1987)의 기존 *Glu-1* 점수 체계에 포함되어 있지 않은 *Glu-B1f*, *Glu-B1al* 등이 포함된 새로운 *Glu-1* 점수 체계가 발표되기도 하였다(Wrigley *et al.*, 2009). *Glu-B1f*의 경우 기존 allele들보다 단백질 함량이 높고(Park *et al.*, 2011), 반죽 신장성과 침전가가 우수하다는 연구결과가 있었다(Branlard *et al.*, 2001). Vancini *et al.* (2019)는 *Glu-B1al*이 다른 어떤 *Glu-B1* allele 보다 글루텐 강도와 패리노그래프 반죽 안정성이 높다고 평가하였으며, 특히 *Glu-A1a*·*Glu-B1al*·*Glu-D1d* 조합에서 이 두가지 품질 특성이 가장 우수하다고 하였다.

한편 Kaya *et al.* (2014)의 연구에서 단백질 함량이 높은 HMW-GS 조성을 가진 자원들은 단백질 함량이 낮은 HMW-GS 조성을 가진 자원들보다 수량성이 낮았다. Kaya *et al.* (2014)는 이를 통해 단백질의 양과 질에 관련된 유전자들이 수량성과는 부의 연관이 있을 것이라고 하였는데, 실제로 밀의 단백질 함량은 여러 연구에서 공통적으로 천립중과 부의 상관성이 있는 것으로 나타났다(Bordes *et al.*, 2008; Aydin *et al.*, 2010; Carter *et al.*, 2012; Abdipour *et al.*, 2016). 반면 Mohan *et al.* (2015)이 인도의 여러 재배 지역에서 시험했을 때는 단백질 함량과 천립중 간에 유의한 상관관계가 나타나지 않았고, 일본에서는 천립중과 같은 수량구성요소 및 수량성에는 영향을 미치지 않으면서 단백질 함량을 높이는 major QTL이 탐색되기도 하였다(Terasawa *et al.*, 2016). 단백질 함량은 간장이 짧고 출수일수가 길수록 높고(Mohan *et al.*, 2015), 침전가는 성숙일수가 짧을수록 낮은 경향을 보이는 등(Maich *et al.*, 2017), 품질 특성은 농업 특성과 연관이 있으면서도 재배 환경에 따라 서로 다른 상관관계가 있는 것으로 알려졌다. 국내에서는 시비량 또는 등숙기 고온 처리 등 밀의 재배 환경에 따른 농업 특성 및 품질 변화에 관한 연구는 있었으나, 일반적인 재배 조건에서 출수기·천립중 등 품종 별 고유의 농업 특성과 품

질 특성 간의 상관관계를 분석한 연구 결과는 없었다(Kim *et al.*, 2013; Son *et al.*, 2019).

본 연구에서는 다양한 HMW-GS 조성 and 농업 형질을 보유한 국내의 자원을 이용하여 국내 재배 환경에서 HMW-GS 조성 and 농업 형질이 각각 품질 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 제빵적성이 우수한 고품질 밀 품종 육성을 위한 HMW-GS 조성 and 출수기, 성숙기 및 천립중 등의 농업 형질 기준을 설정하는 데 기초 정보를 제공하고 자 하였다.

## 재료 및 방법

### 시험 재료 및 생육 조사

공시 재료로 알찬 등 국내 품종 및 계통 55종과 Colano (IT205880), Garnet (IT205495) 등 농업유전자원센터에서 분양 받은 유전자원 125종, 총 180품종을 사용하였다. 각 품종을 2018년 10월 24일과 2019년 10월 25일에 국립식량과학원 남부작물부(경남 밀양) 답리작 시험포장에 재식거리 30 × 12 cm로 점파하고, N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O를 9.1-7.4-3.9 kg/10a로 시비하여 재배하였다. 2018/2019년 재배 시기의 평균 기온은 9.6°C로 평년대비 0.7°C 높았고, 누적 강수량은 324.4 mm로 평년대비 58.2 mm 적었다. 2019/2020년 재배 시기의 평균 기온은 9.1°C로 평년과 같았으며, 누적 강수량은 415.1 mm로 평년대비 45.7 mm 많았다. 출수기, 성숙기, 간장, 수장, 주당수수, 천립중과 리터중은 농촌진흥청 연구조사분석기준(RDA, 2012)에 따라 조사하였으며, 출수일수는 파종기로부터 출수기까지의 일수로, 성숙일수는 출수기로부터 성숙기까지의 일수로 계산하였다.

### HMW-GS 조성 분석 및 *Glu-1* 점수 평가

HMW-GS 조성은 Shin *et al.* (2020a)의 방법에 따라 SDS-PAGE와 Lab-on-a-chip (Agilent 2100 bioanalyzer & protein 230 kit, Agilent Technologies, Waldbronn, Germany)을 이용해 분석하고, 다시 STS와 KASP 분자표지를 이용해 유전형을 확인하였다. *Glu-A1* 조성은 UMN19과 *Glu-A1x1/2\** 마커를(Liu *et al.*, 2008; Rasheed *et al.*, 2016), *Glu-B1* 조성은 cauBx642, BX7<sup>OE</sup>\_866\_SNP, ZSBy8, ZSBy9a 마커를(Xu *et al.*, 2008; Rasheed *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2008), 그리고 *Glu-D1* 조성은 UMN26, *Glu-D1*\_SNP 마커를 이용해 확인하였으며, 이들 마커를 Shin *et al.* (2020b)의 방법에 따라 분석하였다. *Glu-1* 점수는 Payne *et al.* (1987)과 Shewry *et al.* (2009)의 점수 체계에 따라 계산하였으며, Bx7이 over-expression된 subunit 7<sup>OE</sup>+8은 Wrigley *et al.* (2009)에 따라

5점으로 계산하였다.

**제분 및 품질 특성 분석**

2019년과 2020년 6월 수확한 종자를 16% 수분함량으로 tempering하여 소형제분기(Brabender Quadrumat Junior mill, Brabender OHG, Duisburg, Germany)로 제분하여 2019년 평균 76.1%, 2020년 평균 74.1% 제분 수율의 밀가루를 얻었다. 제분한 밀가루의 수분함량은 AACC method 44-15.02에 따라 측정하였고, 단백질 함량은 LECO FP628 (Laboratory Equipment Co., St. Joseph, Mich., USA)을 이용해 AACC method 44-30-01에 따라 구하였다(AACCI, 2010). 단백질 함량을 포함한 모든 실험 결과는 밀가루 수분함량을 14% 기준으로 보정하였다.

Wet gluten과 dry gluten 함량, gluten Index는 Glutomatic 2200 (Perten Instruments AB, Huddinge, Sweden)을 이용하여 AACC method 38-12.02 (AACCI, 2010)에 따라 측정하였다. 침전가는 Axford *et al.* (1979)의 방법으로 측정하였으며, 시료 양은 3 g을 사용하였다.

반죽 특성은 AACC method 54-40.02 (AACCI, 2010)에 따라 밀가루 반죽의 물성을 측정하였다. 믹소그래프(10 g Mixograph, National Manufacturing Co., Lincoln, NE, USA)를 사용하여 10분동안 반죽하여 측정된 후 MixSmart software (v.2.0.609)을 통해 반죽시간(MPTi, Midline peak time), 반죽의 강도를 나타내는 MPV (Midline peak value)와 MPW (Midline peak width), 반죽의 안정성을 나타내는 MTxV (Midline time x=8 min value)와 MTxW (Midline time x=8 min width)의 값을 얻었다. 가수량은 AACC method 54-40.02

(AACCI, 2010)에 따라 밀가루 수분함량 14%를 기준으로 하여  $1.5X + 43.6$  ( $X$ =단백질 함량)로 계산하여 시험을 수행하였다.

**통계 분석**

통계 분석은 RStudio (Version 1.4.1717, RStudio, PBC)를 이용하여 일원분산분석 및 다변량분산분석을 수행하고 t-검정, LSD 검정, 상관분석 등의 사후검정을 수행하였다. 분석에는 agricolae와 ggplot2 패키지를 사용하였다.

**결과 및 고찰**

**HMW-GS 조성**

국내 및 외국 자원 180종의 HMW-GS 조성을 분석한 결과, 국내 자원은 *Glu-A1* 조성에서 *Glu-A1b*가 47.3%로 가장 많았고, *Glu-A1c*가 41.8%, *Glu-A1a*가 10.9%였다(Table 1). 도입 자원은 대부분 *Glu-A1a* 또는 *Glu-A1b*를 가지고 있었으며(93.6%), *Glu-A1c*를 가진 자원은 6.4%로 적었다. *Glu-B1* 조성에서 국내 자원은 63.6%가 *Glu-B1b*를 가진 것으로 나타났고, *Glu-B1c*와 *Glu-B1f*가 각각 16.4%였으며, *Glu-B1i*를 가진 자원은 중모2008, *Glu-B1al*을 가진 자원은 10 DS HR 442(IT269033)으로 각각 1자원이었다. 반면 외국 자원은 대체로 다양한 *Glu-B1* allele을 가지고 있었는데, 특히 *Glu-b1i*를 가진 자원이 35개로 *Glu-B1c* (49개) 다음으로 많았으며, *Glu-B1al*을 가진 자원은 5개로 나타났다. *Glu-D1* 조성에서 국내 자원은 *Glu-D1f*를 가진 자원이 52.7%로 가장 많은 반면 외국 자원은 *Glu-D1d*를 가진 자원이 전체의

**Table 1.** High-molecular-weight glutenin subunit distribution of 180 wheat cultivars used in this study.

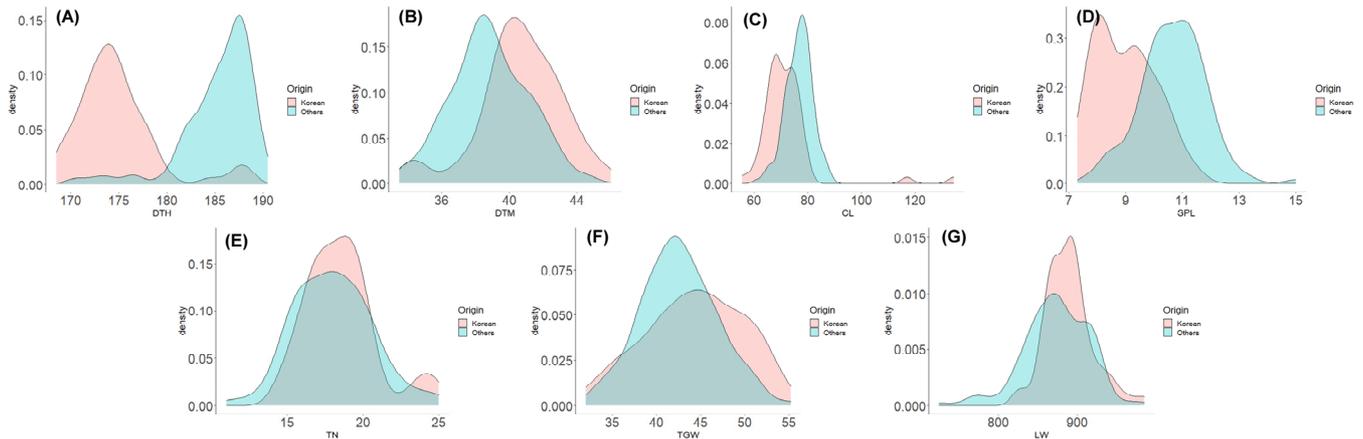
Locus	Allele	Subunit	<i>Glu-1</i> score	Korean		Others		Total	
				Number	Frequency %	Number	Frequency %	Number	Frequency %
<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-A1a</i>	1	3	6	10.9	49	39.2	55	30.6
	<i>Glu-A1b</i>	2*	3	26	47.3	68	54.4	94	52.2
	<i>Glu-A1c</i>	N	1	23	41.8	8	6.4	31	17.2
<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-B1b</i>	7+8	3	35	63.6	25	20.0	60	33.3
	<i>Glu-B1c</i>	7+9	2	9	16.4	49	39.2	58	32.2
	<i>Glu-B1f</i>	13+16	3	9	16.4	11	8.8	20	11.1
	<i>Glu-B1i</i>	17+18	3	1	1.8	35	28.0	36	20.0
	<i>Glu-B1al</i>	7 <sup>OE</sup> +8	5	1	1.8	5	4.0	6	3.3
<i>Glu-D1</i>	<i>Glu-D1a</i>	2+12	2	5	9.1	9	7.2	14	7.8
	<i>Glu-D1d</i>	5+10	4	21	38.2	112	89.6	133	73.9
	<i>Glu-D1f</i>	2.2+12	1	29	52.7	4	3.2	33	18.3

**Table 2.** Distribution of quality traits of 55 domestic and 125 foreign cultivars.

Trait <sup>1)</sup>	Korean cultivars			Genetic resources		
	Mean <sup>2)</sup>	Range	SD	Mean	Range	SD
<i>Glu-1</i> score	7.3***	4–12	1.9	9.3	4–12	1.3
Protein (%)	12.2ns	9.7–18.1	1.6	11.8	9.8–16.0	1.2
WGC (%)	28.3ns	5.9–51.3	10.9	27.5	6.1–51.9	9.3
DGC (%)	10.5ns	2.4–20.5	4.1	10.5	2.6–20.7	3.6
Gluten Index	66.8***	23.2–96.1	16.6	52.3	15.4–88.0	16.6
SDSS (mL)	47.7ns	25.4–73.6	11.1	45.7	28.7–71.0	11.3
MPTi (min)	3.8***	1.8–7.9	1.2	5.9	2.2–9.8	1.6
MPV (%)	12.2***	36.3–59.8	4.8	11.8	35.3–52.2	3.6
MPW (%)	13.4*	7.8–27.0	4.2	11.9	7.0–24.0	3.1
MTxV (%)	39.0ns	27.8–48.8	3.5	39.4	23.1–48.2	3.0
MTxW (%)	7.3***	3.9–12.4	1.7	8.8	4.2–15.4	2.4

<sup>1)</sup>WGC, Wet gluten content; DGC, Dry gluten content; SDSS, SDS sedimentation value; MPTi, Midline peak time; MPV, Midline peak value; MPW, Midline Peak width; MTxV, Midline time x=8 min value; MTxW, Midline time x=8 min width.

<sup>2)</sup>Significant difference according to t-test (\* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$  and \*\*\* $P<0.001$ ).



**Fig. 1.** Density plot of agronomic traits of 55 domestic and 125 foreign cultivars. As a result of t-test, all the traits (except TN) showed significant differences ( $P<0.05$ ) between domestic and foreign cultivars. (A) days to heading; (B) days to maturity; (C) culm length; (D) spike length; (E) tiller number; (F) thousand-grain weight; (G) grain weight/litter.

89.6%를 차지하였다. 이에 따라 국내 자원과 도입 자원의 *Glu-1* 점수 범위는 모두 4–12점으로 같았으나, 평균점수는 각각 7.3점과 9.3점으로 도입 자원의 점수가 국내 자원에 비해 유의하게 높은 것으로 나타났다(Table 2).

**농업 특성 및 품질 특성**

국내 자원의 출수기는 4월 10일에서 4월 30일 사이에 분포하였고, 도입 자원의 출수기는 4월 12일에서 5월 2일 사이에 분포하였다. 국내 자원의 평균 출수기는 4월 16일로 평균 출수일수는 175일이었으며, 도입 자원에 비해 10일

짧았다(Fig. 1A). 성숙기는 국내 자원이 5월 22일에서 6월 7일 사이였고, 도입 자원은 5월 24일에서 6월 10일 사이에 분포하였다. 평균 성숙기는 국내 자원이 5월 27일, 도입 자원이 6월 5일로, 국내 자원의 평균 성숙일수(41일)가 도입 자원(39일)에 비해 2일 길었다(Fig. 1B). 간장은 국내 자원 평균 72 cm, 도입 자원 평균 77 cm로 국내 자원의 평균 간장이 도입 자원에 비해 5 cm 짧은 것으로 나타났다(Fig. 1C). 수장은 국내 자원이 평균 9.0 cm, 도입 자원이 평균 10.6 cm로 국내 자원이 도입 자원에 비해 1.6 cm 짧았다(Fig. 1D). 평균 천립중과 리터중은 각각 국내 자원 44.2 g, 890 g과

도입 자원 42.5 g, 873 g으로 모두 국내 자원이 높은 것으로 나타났다(Fig. 1E, F). 주당수수는 국내 자원 평균 18.6 개, 도입 자원 평균 18.0개로 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Fig. 1E). 농업 특성 중 출수일수( $r=0.920$ ), 성숙일수( $r=0.381$ ), 수장( $r=0.638$ ), 천립중( $r=0.717$ )과 리터중( $r=0.601$ )은 연차 간 1% 유의수준에서 정의 상관관이 있었다(data not shown).

단백질 함량은 국내 자원 12.2%, 도입 자원 11.8%로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 2). Wet gluten 함량과 dry gluten 함량은 국내 자원이 각각 28.3%, 10.5%였고 도입 자원은 각각 27.5%, 10.5%로 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 글루텐 인덱스는 국내 자원이 66.8로 도입 자원 52.3에 비해서는 1% 유의수준에서 높았으나, 시중 판매되는 강력분 밀가루의 글루텐 인덱스(약 95)에는 미치지 못하는 수치였다(RDA, 2015). 외국 자원은 국내 자원에 비해 국내 재배 환경에서 적응성이 낮고 충분한 성숙일수를 확보하지 못해 상대적으로 낮은 글루텐 인덱스를 보인 것으로 생각된다. 침전가는 국내 자원이 평균 47.7 mL, 도입 자원이 평균 45.7 mL이었고, 유의한 차이는 없었다. 믹소그래프 반죽 특성에서는 반죽시간(MPTi), 반죽 강도(MPV 및 MPW)와 반죽 안정도(MTxW)에서 국내 자원과 도입 자원 간 유의한 차이가 나타났다. 반죽 시간은 국내 자원이 평균 3.8분으로 도입자원 5.9분보다 짧았고, 반죽 강도를 나타내는 MPV와 MPW는 국내 자원이 각각 12.2%, 13.4%로 도입 자원 11.8%, 11.9%보다 높았다. 반죽 안정도(MTxW)는 국내자원이 7.3%로 도입자원 8.8%에 비해 낮게 나타났다. 품질 특성 중 단백질 함량( $r=0.529$ ), 글루텐 인덱스( $r=0.212$ ), 침전가( $r=0.791$ ), 믹소그래프 반죽시간( $r=0.524$ )과 반죽 안정성MTxW( $r=0.453$ )은 연차 간 성적이 서로 고

도로 유의한 상관관계가 있었다( $P<0.01$ , data not shown).

**HMW-GS 조성과 품질 특성의 관계**

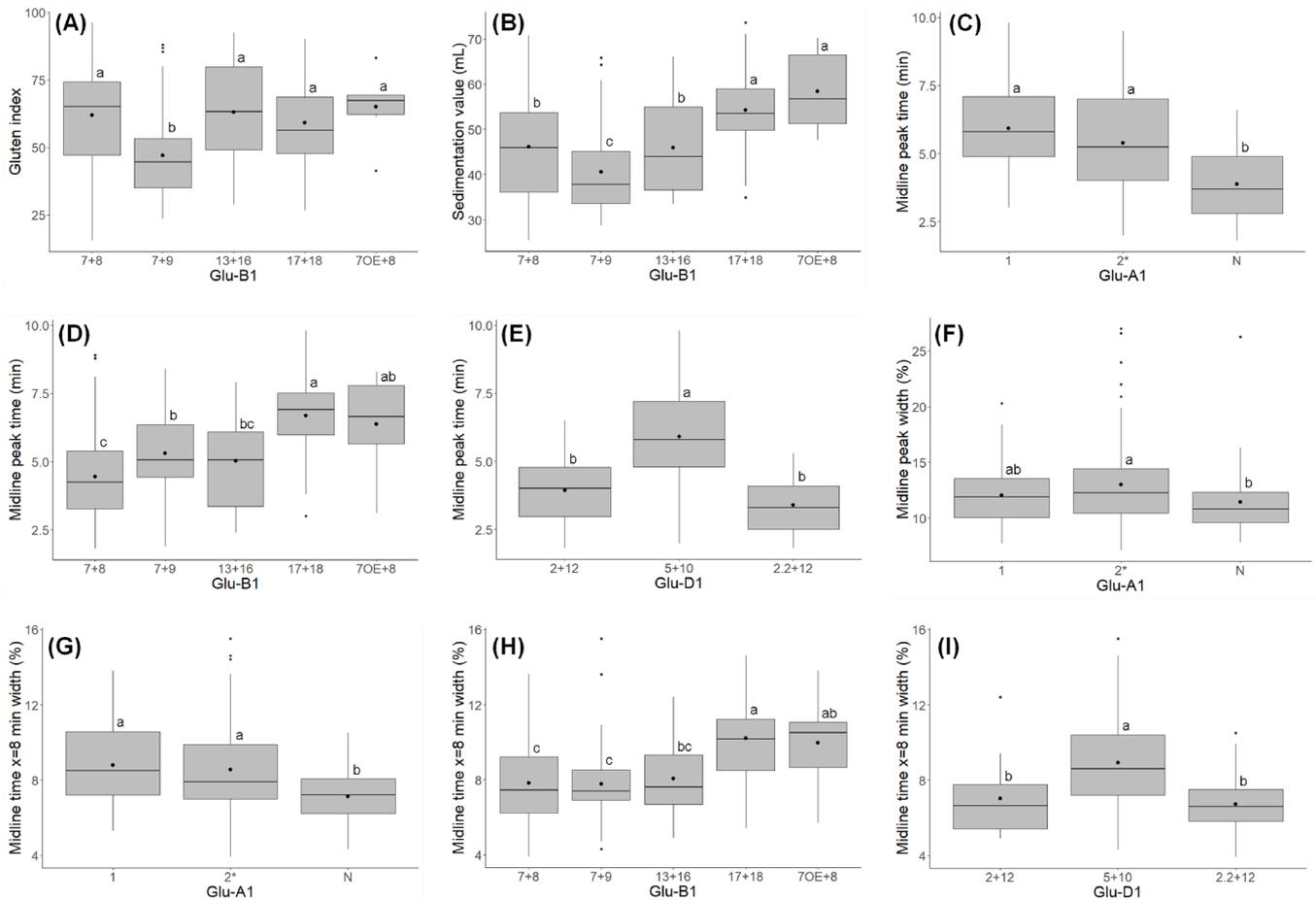
품질 특성에 대해 *Glu-A1*, *Glu-B1*과 *Glu-D1* 조성이 각각 또는 상호작용하여 미치는 영향을 분석한 결과, 단백질 함량은 *Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1* 각각의 조성에 따른 유의한 차이가 나타나지 않았고, *Glu-A1*×*Glu-B1*의 상호작용에 의해 유의한 차이가 나타났다(Table 3). *Glu-A1*이 *Glu-A1c* 이면서 *Glu-B1*이 *Glu-B1c*, *Glu-B1f*, 또는 *Glu-B1i*일 때의 평균 단백질 함량이 각각 12.9%, 14.0%, 15.2%로 다른 조합에 비해 높았다(Fig. 3A). Park *et al.* (2002)와 Park *et al.* (2011)은 각각 *Glu-A1a*, *Glu-B1f*의 단백질 함량이 다른 allele보다 유의하게 높다고 하였으나, Costa *et al.* (2013)과 Dessalegn *et al.* (2011)은 각각 *Glu-A1* 조성과 *Glu-B1* 조성에 따른 단백질 함량 차이는 없었다고 하였다. 본 시험에서는 Costa *et al.* (2013)과 Dessalegn *et al.* (2011)의 연구결과와 같이 *Glu-A1*이나 *Glu-B1* 단독 allele의 주효과는 나타나지 않았다(Table 3).

Dry gluten 함량도 각각의 *Glu-1* 조성에 따른 유의한 차이는 나타나지 않았고, *Glu-A1*×*Glu-B1* 상호작용에 따라 유의한 차이가 있었다(Table 3). *Glu-A1c* 이면서 *Glu-B1f* 또는 *Glu-B1i*일 때 각각 평균 17.2%, 13.0%로 높게 나타났다(Fig. 3B). 글루텐 인덱스는 *Glu-B1* 조성의 주효과(Proportion of variance explained, 51.9%) 만 있었으며, *Glu-B1c*의 글루텐 인덱스가 다른 *Glu-B1* 유전형보다 유의하게 낮은 것으로 나타났다(Fig. 2A). 침전가는 *Glu-B1* 조성의 주효과와 *Glu-A1*×*Glu-B1*의 상호작용 효과가 있었으며, *Glu-B1*의 주효과(54.0%)가 상호작용 효과(24.3%)보다 두배 이상 높게 나타났다(Table 3). 침전가는 *Glu-B1*의 *Glu-B1i*와 *Glu-*

**Table 3.** Multivariate analysis of variance of *Glu-1* loci effect on quality parameters<sup>1)</sup>.

Effect	DF	Protein			DGC			GI			SDSS			MPTi			MPW			MTxW		
		SS	F value	PVE	SS	F value	PVE	SS	F value	PVE	SS	F value	PVE	SS	F value	PVE	SS	F value	PVE	SS	F value	PVE
<i>Glu-A1</i>	2	8.8	2.53	13.2	64.5	2.56	12.8	697	1.31	4.6	232	1.35	2.6	86.4	21.35***	32.2	67.4	3.06*	13.0	60.1	7.46***	18.2
<i>Glu-B1</i>	4	9.7	1.39	14.6	50.3	1.00	10.0	7851	7.67***	51.9	4909	14.28***	54.0	72.5	8.96***	27.0	93.6	2.12	18.1	149.3	9.26***	45.3
<i>Glu-D1</i>	2	5.4	1.57	8.1	37.3	1.48	7.4	1602	3.01	10.6	238	1.38	2.6	78.3	19.34***	29.2	38.9	1.77	7.5	78.8	9.78***	23.9
<i>Glu-A1</i> × <i>Glu-B1</i>	6	28.5	2.73*	42.8	294.0	3.89**	58.4	1596	1.00	10.5	2204	4.27***	24.3	6.1	0.50	2.3	133.5	2.02	25.8	24.8	1.03	7.5
<i>Glu-A1</i> × <i>Glu-D1</i>	3	6.9	1.33	10.4	25.8	0.68	5.1	2076	2.60	13.7	608	2.36	6.7	20.0	3.29*	7.5	42.6	1.29	8.2	11.5	0.95	3.5
<i>Glu-B1</i> × <i>Glu-D1</i>	4	4.5	0.64	6.8	13.1	0.26	2.6	962	0.90	6.4	620	1.80	6.8	4.8	0.59	1.8	141.6	2.21*	27.4	3.9	0.24	1.2
<i>Glu-A1</i> × <i>Glu-B1</i> × <i>Glu-D1</i>	1	2.8	1.61	4.2	18.8	1.49	3.7	351	1.32	2.3	273	3.18	3.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.00	0.0	1.5	0.36	0.5

<sup>1)</sup>Df, degree of freedom; SS, sum of squares; PVE, proportion of variance explained; Protein, protein content (%); DGC, dry gluten content (%); GI, gluten index; SDSS, SDS sedimentation value (mL); MPTi, midline peak time (min); MPW, midline peak width (%); MTxW, midline time x=8 min width (%); \* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$  and \*\*\* $P<0.001$ .



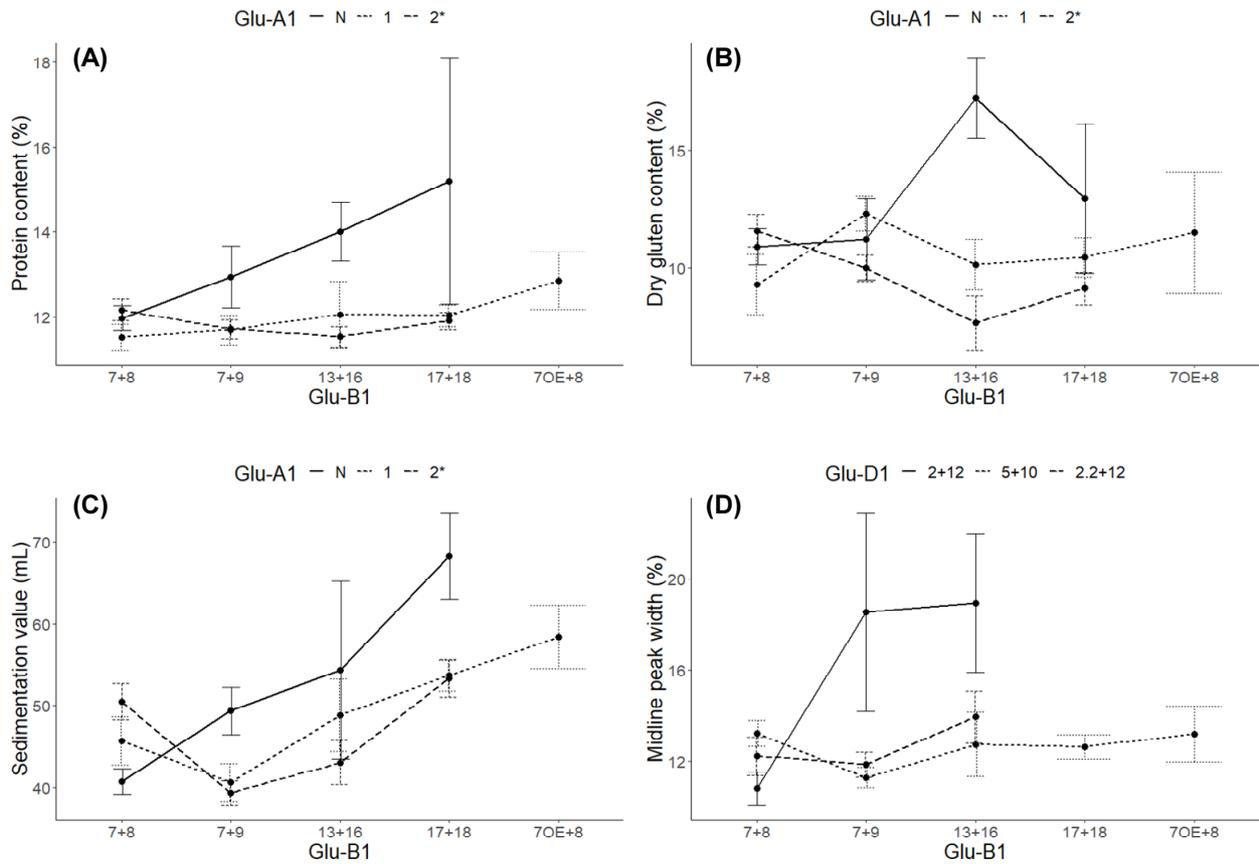
**Fig. 2.** Distribution of quality traits by *Glu-1* subunits. (A) Gluten index by *Glu-B1*; (B) SDS sedimentation value by *Glu-B1*; Midline peak time by (C) *Glu-A1*, (D) *Glu-B1*, and (E) *Glu-D1*; Midline peak width by *Glu-A1* (F); Midline time  $x=8$  min width by (G) *Glu-A1*, (H) *Glu-B1*, and (I) *Glu-D1*. The black dots inside the box indicate mean values. The different letters are significantly different from each other ( $P < 0.05$ ) according to the LSD-test.

*B1a1*이 각각 평균 54.3 mL, 58.4 mL로 가장 높았고, *Glu-B1c*가 40.6 mL로 가장 낮았다(Fig. 2B). *Glu-A1*×*Glu-B1* 상호작용에서는 *Glu-A1c*이면서 *Glu-B1i*일 때 68.3 mL로 가장 높게 나타났는데(Fig. 3C), *Glu-1* 점수가 높은 *Glu-A1a* 또는 *Glu-A1b*가 아닌 *Glu-A1c*와의 조합에서 가장 높게 나타난 것은 침전가가 단백질의 양과 질의 특성을 동시에 나타내는 지표로, *Glu-A1c*×*Glu-B1i* 조합의 단백질 함량이 *Glu-A1a* 또는 *Glu-B1b* 조합보다 유의하게 높았기 때문인 것으로 판단된다.

미소그래프 반죽시간에 대해 *Glu-A1* (32.2%)>*Glu-D1* (29.2%)>*Glu-B1* (27.0%) 순으로 세 개의 주효과가 모두 유의한 영향을 미쳤으며, *Glu-A1*과 *Glu-D1*의 상호작용 효과도 있었으나 7.5%로 세계의 주효과에 비해 적었다. 반죽시간은 *Glu-A1*의 *Glu-A1a* (5.9분)와 *Glu-A1b* (5.4분), *Glu-B1*의 *Glu-B1i* (6.7분)와 *Glu-B1a1* (6.4분)에서 가장 길게 나타났다(Fig.

2C, D). *Glu-D1*에서는 *Glu-D1d* (5.9분)의 반죽시간이 가장 긴 것으로 나타나(Fig. 2E) Johansson *et al.* (2000), Park *et al.* (2011)과 동일한 결과를 얻었다. 미소그래프 반죽 강도(MPW)는 *Glu-A1*의 주효과와 *Glu-B1*×*Glu-D1* 상호작용 효과가 있었다. *Glu-A1b* (13.0%)가 *Glu-A1c* (11.5%)보다 높았고(Fig. 2F), *Glu-B1*×*Glu-D1*의 상호작용에서는 *Glu-B1f*×*Glu-D1a*, *Glu-B1c*×*Glu-D1a*일 때 각각 19.0%와 18.5%로 높게 나타났다(Fig. 3D).

반죽 안정성(MT×W)은 *Glu-B1* (45.3%)>*Glu-D1* (23.9%)>*Glu-A1*(18.2%)의 주효과가 있었으며, *Glu-A1a*와 *Glu-A1b*, *Glu-B1i*와 *Glu-B1a1*, *Glu-D1d*가 다른 allele들보다 유의하게 높은 것으로 나타났다(Fig. 2G, H, I). 모든 품질 특성에서 *Glu-A1*×*Glu-B1*×*Glu-D1* 상호작용에 따른 유의한 차이는 나타나지 않았다(Table 3).



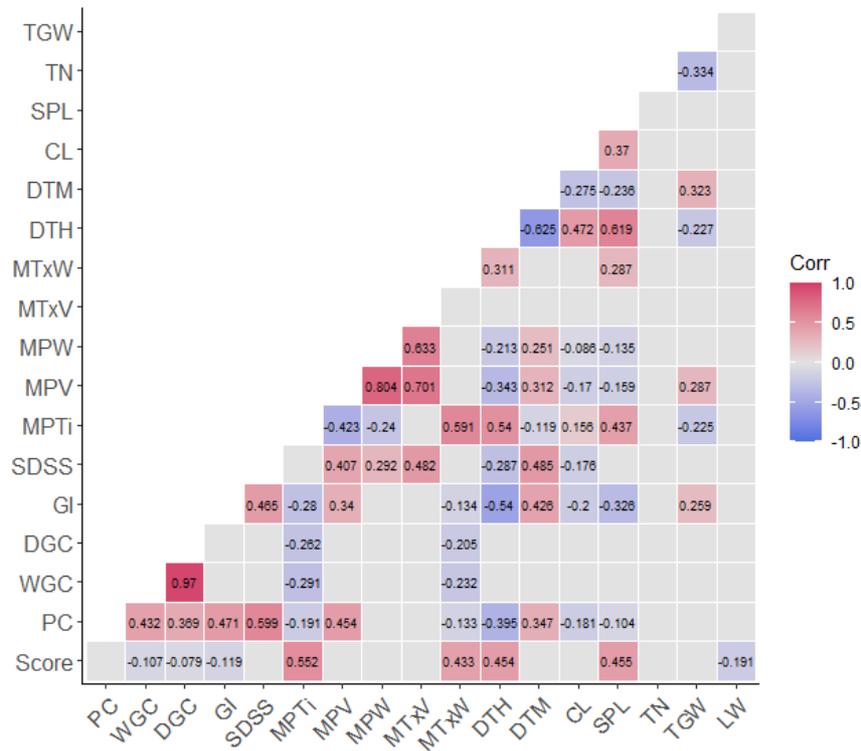
**Fig. 3.** Interaction plot of the effect of *Glu-1* loci on quality traits. Interaction plots between (A) *Glu-A1* and *Glu-B1* subunits for protein content; (B) *Glu-A1* and *Glu-B1* subunits for dry gluten content; (C) *Glu-A1* and *Glu-B1* subunits for SDS sedimentation value; and (D) *Glu-B1* and *Glu-D1* subunits for midline peak width.

**농업 형질과 품질 특성의 관계**

농업 형질과 품질 특성 간의 상관관계를 5% 유의수준에서 분석한 결과 *Glu-1* 점수는 반죽 시간( $r=0.552$ ), MTxW( $r=0.433$ )와 정의 상관이 있었으며, 출수일수( $r=0.454$ )-수장( $r=0.455$ )과도 정의 상관이 있었다(Fig. 4). 단백질 함량은 wet gluten 함량( $r=0.432$ ), 글루텐 인덱스( $r=0.471$ ), 침전가( $r=0.599$ ), MPV( $r=0.454$ )와 정의 상관을 나타내었는데, 출수일수와는 부의 상관( $r=-0.395$ ), 성숙일수와는 정의 상관( $r=0.347$ )을 나타내었다. 단백질 함량은 천립중, 리터중의 종자 특성과는 상관관계가 나타나지 않았다. 이는 천립중이 작을수록 단백질 함량이 높다는 선행연구결과와는 상이 하였는데 (Aydin *et al.*, 2010; Bordes *et al.*, 2008), 본 연구에서 사용된 외국 자원의 경우 천립중은 국내 자원에 비해 작은 반면 출수기가 늦어 충분한 성숙 기간을 확보하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

Wet gluten 함량과 dry gluten 함량은 상호간의  $r=0.970$ 의 정의 상관이 있었으며, 모두 반죽시간(각  $r=-0.291$ ,  $r=-$

$0.262$ )·MTxW (각  $r=-0.232$ ,  $r=-0.205$ )와 부의 상관을 나타냈다. 글루텐 인덱스는 출수일수( $r=-0.540$ )-수장( $r=-0.326$ )과는 부의 상관을 보이는 한편, 성숙일수( $r=0.426$ )-천립중( $r=0.259$ )과는 정의 상관을 나타내었고, 침전가와도  $r=0.465$ 의 정의 상관을 나타내었다. 침전가는 출수일수와 부의 상관( $r=-0.287$ )을, 성숙일수와 정의 상관( $r=0.485$ )을 보여 성숙일수가 길수록 침전가가 높다는 Miach *et al.* (2017)의 연구 결과와 같았다. 믹소그래프 반죽 특성 중 반죽의 강도를 나타내는 MPV와 MPW 역시 출수일수와는 각  $r=-0.343$ ,  $r=-0.213$ 의 부의 상관을 보였고, 성숙일수와는 각각  $r=0.312$ ,  $r=0.251$ 의 정의 상관을 보였다. 농업 형질 중 출수일수는 성숙일수와는 부의 상관( $r=-0.625$ )을 보였고, 간장( $r=0.472$ )-수장( $r=0.619$ )과는 정의 상관을 보였다. 이처럼 단백질 함량, 글루텐 인덱스, 침전가, MPV는 공통적으로 출수일수와는 부의 상관, 성숙일수와는 정의 상관이 나타났는데, 이는 재배적 특성을 고려하지 않은 이화학적 특성 분석만으로는 유용한 고품질 유전자원을 선발하기 어렵다는 것을 시사하



**Fig. 4.** Pearson correlation heatmap between agronomic traits and quality traits ( $P < 0.05$ ). Score, *Glu-1* score; PC, protein content (%); DGC, dry gluten content (%); GI, gluten index; SDSS, SDS sedimentation value (mL); MPTi, midline peak time (min); MPV, midline peak value (%); MPW, midline peak width (%); MTxV, midline time x=8 min value (%); MTxW, midline time x=8 min width (%); DTH, days to heading; DTM, days to maturity; CL, culm length; SPL, spike length; TN, tiller number; TGW, thousand-grain weight; LW, grain weight/litter.

였다. 이를 통해 앞서 분석한 *Glu-B1i*, *Glu-D1d* 등의 유용 HMW-GS 조성을 국내 품종에 도입하는 한편, 국내 품종 수준의 출수 및 성숙 일수를 유지하면 고품질 밀 품종을 육성하는 데 도움이 될 것으로 생각한다. 또한 Wrigley *et al.* (2009)과 Vancini *et al.* (2019) 등이 공통적으로 품질 특성이 우수하다고 주장한 *Glu-B1a1*의 경우, 본 시험에 이용된 자원이 6개로 다른 allele에 비해 극단적으로 적고, 그중 5개가 외국 자원이었다. 이 자원들은 평균 출수기가 4월 24일로 국내 자원의 평균 출수기(4월 16일)보다 8일 늦었음에도 불구하고 침전가와 믹소그래프 반죽 시간, 반죽 안정성(MTxW)이 우수한 것으로 나타났다. 따라서 *Glu-B1i*, *Glu-D1d*와 더불어 *Glu-B1a1* 조성을 도입할 경우 국내 품종의 HMW-GS 조성을 다양화하고 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 생각한다.

### 적 요

국내외 유전자원을 이용하여 HMW-GS 조성의 농업 특성이 밀가루 품질에 미치는 영향을 평가하였다.

1. 국내 자원의 HMW-GS 조성은 *Glu-A1c*와 *Glu-A1b*, *Glu-B1b*, *Glu-D1f*가 가장 많았고, *Glu-B1i* 또는 *Glu-B1a1*을 가진 자원은 각 1개로 적었다. 외국 자원은 각 loci 별로 *Glu-A1a*, *Glu-B1c*, *Glu-D1d*가 가장 많았고, *Glu-B1*에서는 *Glu-B1i*가 두번째로 많았다.
2. 국내자원은 도입자원에 비해 출수일수가 짧고 성숙일수가 길며, 글루텐 인덱스, 믹소그래프 반죽 강도(MPV 및 MPW)가 높은 반면, *Glu-1* 점수와 반죽 시간, 반죽 안정성(MTxW)이 낮았다.
3. HMW-GS 조성의 특성과 품질 특성 간 관계를 분석한 결과 단백질 함량과 글루텐 함량은 *Glu-B1i*에서 가장 높았다. 글루텐 인덱스, 침전가, 믹소그래프 반죽 시간, 반죽 안정성(MTxW)은 모두 공통적으로 *Glu-B1*의 *Glu-B1i*와 *Glu-B1a1*에서 높게 나타났다. 반죽 시간과 반죽 안정성(MTxW)은 *Glu-A1a*와 *Glu-A1b*, *Glu-D1d*에서도 높았다.
4. 농업 형질과 품질 특성의 상관관계를 분석한 결과 단백질 함량, 글루텐 인덱스, 침전가, 반죽 강도(MPV 및 MPW)는 공통적으로 출수일수와는 부의 상관, 성숙일수와는 정의 상관을 나타내었다.

이를 통해 국내 자원의 빠른 출수기와 충분한 성숙일수를 유지하면서 도입 자원이 가진 *Glu-B1i*, *Glu-B1a1*, *Glu-D1d* 등의 유용한 HMW-GS 조성을 도입하면 고품질 밀 품종을 육성하는 데 도움이 될 것으로 생각된다.

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 밀 고분자 글루테닌의 유전적 조성과의 품질 연관성 구명, 세부과제번호: PJ013564022020)의 지원에 의해 이루어진 것임

## 인용문헌(REFERENCES)

- AACCI. 2010. Approved methods of analysis. 11th ed. AACCI International, St. Paul, MN, USA. Method 38-12.02, 44-15-02, 46-30.01, 54-40.02.
- Abdipour, M., M. Ebrahimi, A. Izadi-Darbandi, A. M. Mastrangelo, G. Najafian, Y. Arshad, and G. Mirniyam. 2016. Association between grain size and shape and quality traits, and path analysis of thousand grain weight in Iranian bread wheat landraces from different geographic regions. *Not Bot Horti Agrobo.* 44(1) : 228-236.
- Axford, D. W. E., E. E. McDermott, and D. G. Redman. 1979. Note on the sodium dodecylsulfate test of bread making quality: Comparison with Pelshenke and Zeleny tests. *Cereal Chem.* 56 : 582-584.
- Aydin, N., C. Sermet, Z. Mut, H. O. Bayramoglu, and H. Özcan. 2010. Path analyses of yield and some agronomic and quality traits of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under different environments. *Afr. j. biotechnol.* 9(32) : 5131-5134.
- Branlard, G., M. Dardevet, R. Saccomano, F. Lagoutte, and J. Gourdon. 2001. Genetic diversity of wheat storage proteins and bread wheat quality. *Euphytica.* 119: 59-67.
- Bordes, J., G. Branlard, F. X. Oury, G. Charmet, and F. Balfourier. 2008. Agronomic characteristics, grain quality and flour rheology of 372 bread wheats in a worldwide core collection. *J. Cereal Sci.* 48(3) : 569-579.
- Carter, A. H., D. K. Santra, and K. K. Kidwell. 2012. Assessment of the effects of the Gpc-B1 allele on senescence rate, grain protein concentration and mineral content in hard red spring wheat (*Triticum aestivum* L.) from the Pacific northwest region of the USA. *Plant breed.* 131(1) : 62-68.
- Costa, M. S., M. B. D. S. Scholz, and C. M. L. Franco. 2013. Effect of high and low molecular weight glutenin subunits, and subunits of gliadin on physicochemical parameters of different wheat genotypes. *Food Sci. Technol.* 33 : 163-170.
- Dessalegn, T., C. S. Van Deventer, M. T. Labuschagne, and H. Martens. 2011. Allelic variation of HMW glutenin subunits of Ethiopian bread wheat cultivars and their quality. *Afr. Crop. Sci. J.* 19(2) : 55-63.
- Gao, S., G. Sun, W. Liu, D. Sun, Y. Peng, and X. Ren. 2020. High-molecular-weight glutenin subunit compositions in current Chinese commercial wheat cultivars and the implication on Chinese wheat breeding for quality. *Cereal Chem.* 97(4) : 762-771.
- He, Z.H., L. Liu, X. C. Xia, J. J. Liu, and R. J. Pena. 2005. Composition of HMW and LMW glutenin subunits and their effects on dough properties, pan bread, and noodle quality of Chinese bread wheat. *Cereal Chem.* 82(4) : 345-350.
- Islam, S., Z. Yu, M. She, Y. Zhao, and W. Ma. 2019. Wheat gluten protein and its impacts on wheat processing quality. *Front. Agric. Sci. Eng.* 6(3) : 279-287.
- Johansson, E., G. Svensson, and S. Tsegaye. 2000. Genotype and environment effects on bread-making quality of Swedish-grown wheat cultivars containing high-molecular-weight glutenin subunits 2+12 or 5+10. *Acta Agric. Sect. B, Soil and Plant Sci.* 49 : 225-233.
- Kaya, Y. and M. Akcura. 2014. Effects of genotype and environment on grain yield and quality traits in bread wheat (*T. aestivum* L.). *Food Sci. Technol.* 34 : 386-393.
- Kim, H. S., Y. J. Kim, K. H. Kim, H. H. Park, C. S. Kang, K. H. Kim, J. N. Hyun, and K. J. Kim. 2013. Different of agricultural characteristics and quality with fertilizer type in wheat cultivation. *Korean J. Crop Sci.* 58(1) : 15-19.
- Kiszonas, A. M. and C. F. Morris. 2018. Wheat breeding for quality: a historical review. *Cereal Chem.* 95(1) : 17-34.
- Liu, S., S. Chao, and J. A. Anderson. 2008. New DNA markers for high molecular weight glutenin subunits in wheat. *Theor Appl Genet.* 118 : 177-183.
- Luo, C., W. B. Griffin, G. Branlard, and D. L. McNeil. 2001. Comparison of low- and high molecular-weight wheat glutenin allele effects on flour quality. *Theor Appl Genet.* 102 : 1088-1098.
- Maich, R. H., M. E. Steffolani, J. A. Di Rienzo, and A. E. Leon. 2017. Association between grain yield, grain quality and morpho-physiological traits along ten cycles of recurrent selection in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cereal Res. Commun.* 45(1) : 146-153.
- Mohan, D. and R. K. Gupta. 2015. Relevance of physiological efficiency in wheat grain quality and the prospects of improvement. *Physiol. Mol. Biol. Plants.* 21(4) : 591-596.
- Park, C. S., C. S. Kang, J. U. Jeung, and S. H. Woo. 2011. Influence of allelic variations in glutenin on the quality of pan bread and white salted noodles made from Korean wheat cultivars. *Euphytica.* 180(2) : 235-250.
- Park, D. S., J. M. Ko, S. I. Han, S. K. Oh, J. N. Hyun, D. Y. Suh, D. C. Shin, and H. P. Moon. 2002. Effect of HMW glutenin subunit composition on baking quality traits in wheat. *Korean J. Breed. Sci.* 34(1) : 15-21.
- Payne, P. I. 1987. Genetics of wheat storage protein and the effect of allelic variation on bread-making quality. *Annu. Rev. Plant*

- Physiol. 38 : 141-153.
- Payne, P. I., M. A. Nightingale, A. F. Krattiger, and L. M. Holt. 1987. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties. *J. Sci. Food Agric.* 40 : 51-65.
- Rasheed, A., W. Wen, F. Gao, S. Zhai, H. Jin, J. Liu, Q. Guo, Y. Zhang, S. Dreisigacker, X. Xia, and Z. He. 2016. Development and validation of KASP assays for genes underpinning key economic traits in bread wheat. *Theor. Appl. Genet.* 129(10) : 1843-1860.
- Rasheed, A., X. Xia, Y. Yan, R. Appels, T. Mahmood, and Z. He. 2014. Wheat seed storage proteins: Advances in molecular genetics, diversity and breeding applications. *J. Cereal Sci.* 60(1) : 11-24.
- RDA (Rural Development Administration). 2012. Manual for standard evaluation method in agricultural experiment and research. pp. 315-374.
- RDA (Rural Development Administration). 2014. Blending model for composite flour from domestic and imported wheat flour based on their composition properties. pp. 13-17.
- Shewry, P. R., R. D'ovidio, D. Lafiandra, J. A. Jenkins, E. N. C. Mills, and F. Bekes. 2009. Wheat grain proteins. In: KHAN, K.; SHEWRY, P.R. (Ed.) *Wheat: chemistry and technology*. 4th ed. St. Paul: AACC International. 2009. pp. 223-298.
- Shewry, P. R. 2009. *Wheat*. *J. Exp. Bot.* 60(6) : 1537-1553.
- Shin, D., J. K. Cha, S. M. Lee, N. R. Kabange, and J. H. Lee. 2020a. Rapid and easy high-molecular-weight glutenin subunit identification system by lab-on-a-chip in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 9(11) : 1517.
- Shin, D., J. K. Cha, S. M. Lee, J. M. Ko, and J. H. Lee. 2020b. Validation and selection of functional allele-specific molecular markers to analyze high-molecular-weight gluten subunits composition in wheat. 2020. *Korean J. Breed. Sci.* 52(3) : 235-243.
- Son, J. H., C. S. Kang, Y. M. Yoon, C. H. Choi, K. H. Kim, K. M. Kim, T. I. Park, T. G. Kang, S. W. Kang, C. S. Park, and S. W. Cho. 2019. Effect of high temperature during grain maturation on flour properties and end-use quality in Korean wheat cultivars. *Korean J. Breed. Sci.* 51(1) : 20-33.
- Terasawa, Y., M. Ito, T. Tabiki, K. Nagasawa, K. Hatta, and Z. Nishio. 2016. Mapping of a major QTL associated with protein content on chromosome 2B in hard red winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Breed. Sci.* 66(4) : 471-480.
- Vancini, C., G. A. M. Torres, M. Z. Miranda, L. Consoli, S. Bonow, and M. F. Grandó. 2019. Impact of high-molecular-weight glutenin alleles on wheat technological quality. *Qesq. Agropec. Bras.* [online] 54 : e00639.
- Wrigley, C., R. Asenstorfer, I. Batey, G. Cornish, L. Day, D. Mares, and K. Mrva. 2009. The biochemical and molecular basis of wheat quality. In *Wheat science and trade*.
- Xu, Q., J. Xu, C. L. Liu, C. Chang, C. P. Wang, M. S. You, B. Y. Li, and G. T. Liu. 2008. PCR-based markers for identification of HMW-GS at Glu-B1x loci in common wheat. *J. Cereal Sci.* 47 : 394-398.