등숙기 고온이 국내 밀 품종의 밀가루 및 가공적성에 미치는 영향

손재한¹ · 강천식¹ · 윤영미¹ · 최창현¹ · 김경훈¹ · 김경민¹ · 박태일¹ · 강택규² · 강성욱² · 박철수² · 조성우^{2*}

¹국립식량과학원, ²전북대학교 작물생명과학과

Effect of High Temperature during Grain Maturation on Flour Properties and End-Use Quality in Korean Wheat Cultivars

Jae-Han Son¹, Chon-Sik Kang¹, Young-Mi Yoon¹, Chang-Hyun Choi¹, Kyung-Hoon Kim¹, Kyung-Min Kim¹, Tae-Il Park¹, Taek-Gyu Kang², Seong-Wook Kang², Chul Soo Park², and Seong-Woo Cho^{2*}

¹National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju, 55365, Republic of Korea

²Department of Crop Science and Biotechnology, Chonbuk National University, Jeonju, 54896, Republic of Korea

Abstract The flour physiochemical properties and end-use quality of wheat were evaluated to identify the effect of high temperature (HT) during grain maturation. HT caused a decrease in the width and thickness of grains. However, HT did not affect the grain weight, volume, length, test weight and 1,000-kernel weight in Korean wheat cultivars. Although HT marginally affected the general flour physiochemical properties and gluten composition, the effects were not significant. Based on the results of the evaluation of end-use quality, the effect of HT on the end-use quality was not significant. Nevertheless, the allelic composition was related to the quantity and quality of grain under HT conditions. In Korean wheat cultivars containing *Glu-D1d* and *-D1f* alleles, the 1,000-kernel weight was decreased by HT. In addition, *Glu-D1f* was more sensitive to HT than was *Glu-D1d*. The proportion of the y-type high-molecular-weight glutenin subunits (HMW-GSs) was decreased by HT in Korean wheat cultivars containing the *Glu-A1ab* allele, and was increased in cultivars containing the *Glu-B3d* allele. Furthermore, the proportions of gliadin and low-molecular-weight glutenin subunits (LMW-GSs) were decreased by HT in Korean wheat cultivars containing *Glu-A1ab* or *Glu-B3ahi* alleles.

Keywords Korean wheat, high temperature, grain maturation, flour properties, end-use quality

Received on January 29, 2019. Revised on February 5, 2019. Accepted on February 20, 2019.

* Corresponding Author (E-mail: tottoriu2009@naver.com, Tel: +82-63-270-2506; Fax: +82-63-270-2640)

서 언

밀의 등숙기(grain filling period) 온도는 수량뿐만 아니라 품질에도 중요한 영향을 미친다(Wrigley 2006). 밀의 등숙기 적정 온도는 12 - 22℃로 알려져 있으며, 이 온도 이상의 고온은 밀의 등숙 속도를 높여 등숙 기간을 단축시킨다(Farooq et al. 2011). 밀의 등숙기 적정 온도에서 1℃씩 증가할 때마다 등숙 기간이 2.8일씩 감소하지만, 등숙 속도가 빨라져 등숙기 단축에 의한 품질 약화를 완화한다. 그러나 30℃ 이상 고온이 지속되면 이러한 현상이 발생하지 않는다(Sofield et al. 1977, Streck 2005). 그리고 등숙기 고온은 밀의 호분층과 배유 세포의 구조 변화를 일으켜 종자를 수축시키기 때문에 종실의 무게, 크기, 리터중, 천립중이 감소하게 되고, 특히 등숙 초기의 기온이 30℃ 이상 지속되었을 때 종자 특성이 더욱 약화되었다(Gibson et al. 1997,

Dias et al. 2008).

밀의 등숙기 고온은 배유의 전분 함량을 감소시켜 밀가루 생산량을 감소시킨다(Hawker & Jenner 1993, Spiertz et al. 2006). 이러한 이유는 전분 생합성에 관여하는 수용성 전분 합성 효소의 활성이 일반적으로 고온에 의해 쉽게 저해되는데, 30℃ 이상의 일시적인 온도에 의한 활성 저해 또한 전분의 축적을 감소시키기 때문이다(Hawker & Jenner 1993). 밀의 아밀로스 함량을 결정하는 중요한 유전자인 *granule bound starch synthase I (GBSSI)*는 등숙기 고온에서 중간 정도의 활성을 나타내지만, 고온으로 인한 아밀로스 함량은 감소하는 서로 상반되는 연구 결과가 존재한다(Shi et al. 1994, Stone & Nicolas 1994, Tester et al. 1995, Guedira et al. 2002). 또한 등숙기 고온은 입자의 비율에도 영향을 미친다. 고온으로 크기가 작은 B-type 전분 입자의 비율이 큰 전분 입자인 A-type 보다 쉽게 감소하여 최종

가공제품의 전분 특성에 영향을 준다(Blumenthal et al. 1995, Zhang et al. 2010).

등숙기 고온은 밀의 단백질 함량은 증가시키고, 글루텐(gluten) 특성을 감소시켜 반죽의 유동성과 가공적성에 영향을 준다(Farooq et al. 2011). 글루텐 구조(gluten network) 형성에 중요한 역할을 하는 이황화 이성질화 효소(disulfide isomerase)는 고온에서 활성이 감소되기 때문에 글루테닌 중합체(glutenin polymer)의 크기가 감소된다(Blumenthal et al. 1991). 그러나 등숙기 고온으로 인하여 이러한 분자량이 큰 중합체의 합성은 감소하지만 분자량이 작은 중합체와 단량체(monomer)인 글리아딘(gliadin)의 함량은 유지되거나 증가한다(Stone & Nicolas 1996, Majoul et al. 2003). 글루테닌 중합체의 감소와 글루테닌과 글리아딘의 비율 감소로 침전기(sedimentation volume)와 필수 아미노산이 감소할 뿐만 아니라 밀가루의 반죽 강도 또한 약화된다(Blumenthal et al. 1995, Graybosch et al. 1995, Guedira et al. 2002, Dias et al. 2008). 등숙기 온도가 15-30°C 인 경우, 밀가루 반죽은 중간 정도의 강도를 나타내지만, 35°C 이상에서는 반죽 시간이 줄고 빵의 품질은 떨어지며, 40°C 에서 수일 동안 노출되면 빵용 밀의 반죽강도는 급격하게 떨어진다(Blumenthal et al. 1995, Corbellini et al. 1998, Wrigley 2006).

국내 밀 재배에서 출수기 전후인 5월의 급격한 기온 상승은 국내 밀의 수량과 품질에 큰 영향을 미치지만 이에 대한 국내 연구는 미흡한 실정이다. 이러한 밀의 등숙기 고온에 의한 피해는 더욱 커질 것으로 생각된다. 그러므로 본 연구에서는 고온 등숙에 대한 적응성이 높은 밀 계통 선발을 위한 기초 자료를 제공하기

위하여, 등숙기 고온 처리에 따른 국내 밀 품종의 종실 특성, 단백질과 전분 특성, 가공적성을 평가하였다.

재료 및 방법

시험재료

본 연구에 이용된 11개 국내 밀 품종의 글루테닌 및 종실경도는 Table 1에서 보는 바와 같으며, 부분 찰성인 호중밀을 제외한 10개 품종은 아밀로스 함량에 관련된 전분 생합성 효소인 GBSSI의 조성이 *Wx-A1a*, *Wx-B1a*, *Wx-D1a*를 갖고 있으며, 호중밀은 *Wx-B1b*을 지녔다(Cho et al. 2019). 시험재료는 전작조건으로 국립식량과학원 전작 포장에서 재배하였다. 모든 시험재료는 시험 포장에서 완전 임의 배치법으로 3반복으로 재배하였고, 0.25 m × 4 m × 3열 조건으로 10월 25일에 파종하였으며, 시비 및 재배는 농촌진흥청 표준재배법(RDA 2012)에 따라 수행하였고, 6월 20일에 수확하였다.

고온처리

등숙 기간 동안 고온 스트레스에 의한 종실의 양적 질적 변화를 평가하기 위하여 전작 포장에 무처리구(ambient temperature as control)를 설정하고 출수기(0 day after flowering; DAF, 4월 20일)와 출수기 2주(14DAF, 5월 5일) 후에 폴리에틸렌(polyethylene) 비닐 필름을 덮어 온도를 상승시킨 고온처리구(high temperature)를 설정하여 6월 9일까지 온도를 측정하여 분석하였다(Table 2). 측정기간동안 강수량은 55.6 mm (4월 20일~30일), 84.3 mm

Table 1. Allelic compositions of high molecular weight glutenin subunits (HMW-GS), low molecular weight glutenin subunits (LMW-GS), and puroindolines in 11 Korean wheat cultivars.

Cultivar	HMW-GS			LMW-GS		Puroindolines	
	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>	<i>Glu-A3</i>	<i>Glu-B3</i>	<i>Pina-D1</i>	<i>Pinb-D1</i>
Baekjoong	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>f</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Goso	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Hojoong	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Joa	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Jojoong	<i>c</i>	<i>f</i>	<i>f</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Jokyung	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Joongmo2008	<i>c</i>	<i>i</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Keumkang	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Suan	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>c</i>	<i>i</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Uri	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Younbaek	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>f</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>b</i>	<i>a</i>

Table 2. Difference of daily maximum temperature between paddy field and paddy field covered with polyethylene vinyl film at day after flowering and 14 days after flowering.

Treatments ^z	Daily mean temperature (°C±SD)	Daily mean minimum temperature (°C±SD)	Daily mean maximum temperature (°C±SD)	Accumulated temperature (°C±SD)
Control	19.9±3.1	13.3±4.0	27.7±4.0	1412.8
0DAF	21.1±3.5	12.9±3.6	34.0±5.7	1735.2
14DAF	21.1±3.8	12.9±3.7	36.1±4.6	1686.5

^zWheat cultivars were treated according to the procedure in material and method. DAF = day after flowering.

(5월), 4.6 mm (6월 1일~9일)이었다(기상청 2016).

종실특성

종실특성은 위하여 리터중 측정기(Seedburo Equipment Co., USA)를 이용하여 측정하였으며, 탈곡한 종자 중 2.0 mm 종목체를 통과하지 않은 종자 1,000립의 무게를 측정하여 천립중을 산출하였다. 길이, 폭, 두께, 원형을 등 종자의 크기는 Seedcount image analysis (SeedCount Australasia Pty Ltd., Australia)를 이용하여 측정하였다.

밀가루 특성

원맥은 Bühler experimental mill을 이용하여 AACCI approved method 26-10.02(AACCI 2010)에 준하여 제분하였다. 밀가루의 수분, 회분, 단백질 함량과 침전가는 AACCI Approved Methods 44-15.02, 08-01.01, 46-30.01, 56-70.01에 따라 측정하였다(AACCI 2010). 밀가루의 입자 크기는 LS13320 multi-wavelength laser particle size analyzer (Beckman Coulter, Brea, CA, USA)를 이용하여 AACCI Approved method 55-40.01에 준하여 측정하였다(AACCI 2010). 밀가루의 색깔은 11-mm 측정 조리개를 가지고 있는 colorimeter (CM-2002, Minolta Camera, Osaka, Japan)를 이용하여 측정하였다. 밀가루의 백도는 Nguimbou et al. (2012)의 방법에 따라 계산하였다. 아밀로스 함량, 손상전분, 전분 함량은 각각 Gibson et al. (1997), Gibson et al. (1992), McCleary et al. (1997)의 방법에 따라 Enzymatic assay kits (Megazyme, Bray, Ireland)를 이용하여 측정하였다. 반죽 가수량, 반죽 시간 및 안정도는 AACCI Approved Method 54-40.02A에 따라 10 g Mixograph (National Manufacturing Co., Lake Forest, CA)를 이용하여 측정하였다(AACCI 2010).

글루텐 분획 특성

고분자 글루테닌(high-molecular glutenin subunit; HMW-GS)과 저분자 글루테닌(low-molecular glutenin subunit; LMW-GS),

HMW-GS 중 x-와 y-type과 ω , $\alpha + \beta$ 와 γ -글리아딘과 이들의 조성은 역상 고성능 액체 크로마토그래피(reversed-phase high-performance liquid chromatography, RP-HPLC)를 이용하여 측정하였다. 글리아딘 추출을 위하여 밀가루 100 mg를 상온에서 400 μ l의 70% 에탄올에 1시간 동안 반응시킨 후 13,000 rpm에서 15분간 원심분리 하여 상층액을 글리아딘 분석에 이용하였다(Zhou et al. 2013). 상층액은 글리아딘 추출 후, 침전물은 Yan et al. (2014)의 방법에 준하여 글루테닌 추출에 이용하였다. 침전물은 65°C에서 30분간 500 μ l의 55% isopropanol (v/v)에 반응시킨 후 13,000 rpm에서 10분간 원심분리 하였고, 일련의 과정은 세 번 반복되었다. 침전물은 65°C에서 30분간 50% isopropanol, 80 mM Tris-HCl (pH 8.0), 1% dithiothreitol이 포함된 100 μ l의 추출 용액에 반응시킨 후 13,000 rpm에서 10분간 원심분리 하였다. 알킬화를 위하여 침전물은 1% dithiothreitol 대신에 1.4% 4-vinylpyridine (v/v)이 첨가된 100 μ l의 추출 용액에 65°C에서 30분간 반응시킨 후 10분간 원심분리를 하였다. 글루테닌 침전을 위하여 원심분리 후에 획득한 상등액에 80%의 차가운 acetone을 첨가하고 -20°C에 약 12시간 동안 반응시킨 후 13,000 rpm에서 10분간 원심분리를 하였다. 침전물은 흡후드 안에서 acetone을 제거하고 0.1% trifluoroacetic acid를 포함한 20% acetonitrile 200 μ l에 용해하였다. 추출된 글리아딘과 글루테닌은 0.2 μ m polyvinylidene difluoride membrane filter (Pall Life Sciences, USA)를 이용하여 여과하였다. 역상 고성능 액체 크로마토그래피(Agilent 1100, Agilent Technologies, Germany)는 ZORBAX 300StableBond C18 as a reverse-phase column (300 Å 5 μ m, 4.6 × 250 mm, Agilent Technologies, USA)을 가지고 20 μ l의 시료양, 65°C 컬럼 온도, 글루테닌은 0.8 ml/min의 유동률과 글리아딘은 1.0 ml/min의 유동률 조건으로 수행하였다. 글루테닌 분리에 사용된 초기 용제는 25% acetonitrile과 75% 물에 각각 0.1% trifluoroacetic acid를 포함하고 있으며, acetonitrile의 비율은 13분동안 33%, 그 후 54분까지 43%, 그리고 62분까지 50%로 점차 증가하다가 64분까지 초기 비율인 25%를 유지하는

조건으로 설정하였다. 글리아딘 분리에 사용된 초기 용제의 비율은 글루테닌 분리를 위한 초기 용제의 비율과 같은 25% acetonitrile과 75% 물에 각각 0.1% trifluoroacetic acid를 포함하고 있으며, acetonitrile의 비율은 60분까지 50%로 증가 후, 62분까지 25%로 점차 감소하다가 70분까지 초기 비율인 25%를 유지하는 조건으로 설정하였다. 단백질은 210 nm의 파장에서 UV 분석기를 이용하여 측정하였다. 글루테닌 비율은 총 글루텐 또는 글리아딘 함량의 면적의 비율에 따라 측정하였다.

가공적성 평가

제빵 평가는 AACCI Approved Method 10-10.03 (AACCI 2010), straight-dough-bread-making 제조 방법에 따라 식빵을 만들어 평가하였다. 밀가루 100 g (14% 수분함량 기준), 설탕 6 g, 쇼트닝 3 g, 소금 1.5 g, 생효모 5.0 g, 아스코르빈산 50 mg, 그리고 보리 맥아 0.25 g (대략 50 DU/g, 20°C)를 사용하였다. 반죽 가수량과 반죽 시간은 반죽의 감촉과 외관에 의해 결정하였으며, 30°C와 상대습도 85%에서 70분 동안 발효 후 가스 빼기(punching), 60분간 발효를 마치고, 210°C에서 18분 동안 오븐에서 구운 후 2시간 동안 상온에서 식혔다. 식힌 빵은 rapeseed displacement 방법에 따라 부피를 측정하였고, 빵의 중심부에서 2.0 cm 두께로 잘라 TA-XT2 texture analyzer (Stable Micro Systems, Haslemere, England)을 이용하여 경도(firmness)를 측정하였다. 속질의 경도 측정은 2.5 cm 직경의 플라스틱 plunger로 빵 두께의 25% strain, 1.0 mm/sec 속도로 측정하였다.

제면 평가는 Park & Baik (2002)에 따라 생면을 만들어 평가하였는데, 국수를 위한 최적 가수량 결정은 34% 가수량으로 제한한 시중 중력분을 비교하여 결정하였다. 밀가루 100 g에 소금물을 넣고 pin mixer (National Mfg. Co., USA)를 이용하여 4분간 반죽을 형성하였으며, 최종 소금물 농도는 2.0%가 되도록 조절하였다. 형성된 반죽은 3 mm 간격의 noodle machine (Ohtake Noodle Machine Mfg. Co., Japan)의 롤러를 65 rpm의 속도로 통과하여 면대를 생성하였다. 생성된 면대는 상온에서 1시간 동안 숙성한 후 순차적으로 롤러 간격을 2.6, 2.0, 1.5 mm 줄여 면대를 생성하였다. 최종적으로 생성된 면대의 두께는 micrometer dial thickness gauge (Peacock Dial Thickness Gauge G, Ozaki Mfg. Co., Japan)를 이용하여 측정하였다. 국수 면대 색은 Minolta CM-2002 (Minolta Co., Ramsey, NJ, USA)을 이용하여 측정하였으며, 국수 면대의 백도는 밀가루와 마찬가지로 Nguimbou et al. (2012)의 방법에 따라 계산하였다. 국수 면발을 만들기 위해서 25번 절단 롤러를 이용하였다.

생면(20 g)을 500 ml의 끓는 물에 5분 동안 삶은 후 찬물에 행구고 TA-XT2 texture analyzer (Stable Micro Systems, Haslemere, England)을 이용하여 국수 식미를 분석하였다. 삶은 국수의 식미 검정은 5가닥의 면발을 이용하여 삶은 후 5분 이내에 최소 3반복을 실시하였다. 국수의 식미 검정은 3.175 mm 금속날을 이용하여 1.0 mm/sec의 속도로 원형 면발 높이의 70%를 압축하여 경도(hardness)와 탄성(springiness) 및 점성(cohesiveness)을 측정하였다.

제과 적성 평가는 AACCI Approved Method 10-52.01 (AACCI 2010)에 따라 sugar snap cookie를 만들어 평가하였다. 설탕 24 g, 쇼트닝 12 g, 탈지분유 1.2 g과 NaHCO_3 0.4 g을 flat beater mixing arm (type K45AB)을 가진 Kitchen Aid Professional KPM5 mixer (Kitchen Aid, MI, USA)를 이용하여 178 rpm 속도로 4분 동안 섞어 크림처럼 만들었다. 크림 덩어리 37.6 g을 National cookie dough micromixer (National Mfg. Co., Lincoln, NE)에 넣고, NaCl 0.4 g과 물 2.0 ml을 혼합한 후 172 rpm으로 3분 동안 혼합하였다. 밀가루 40 g을 spatulas로 10, 5, 5, 5초 간격으로 나누어 넣은 다음 3분간 더 반죽하였다. 과자 반죽은 7 mm의 두께로 펴고 안지름이 60 mm인 cookie dough cutter를 이용하여 자르고, 자른 과자 반죽은 $205 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 10분 동안 굽고 상온에서 30분 동안 식힌 후 직경과 두께를 측정하였다.

통계 분석

모든 시험에서 얻어진 결과는 SAS 프로그램(SAS Institute, NC, USA)의 Fisher's least significant difference procedure (LSD), Analysis of variance (ANOVA), Pearson correlation coefficient를 이용하여 통계 분석을 수행한 후 $p < 0.05$ 유의성 수준에서 검정하였다.

결과 및 고찰

고온처리에 따른 종실 특성 변화

고온이 밀 품질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 개화기(0DAF)와 개화 14일(14DAF) 후에 고온을 처리하였다. 1일 최고기온의 평균온도는 고온처리 시기에 따라 무처리구보다 0DAF는 약 6.3도의 차이를 나타냈고, 14DAF는 약 8.4도의 차이를 나타내었다(Table 1). 일 평균 최고기온은 단백질 함량, 밀가루 색, 반죽의 안정도 및 탄력성과 정의상관을 나타내고, 수량과는 부의상관을 나타낸다(Randall & Moss 1990). 상대적으로 1일 최저기온의 평균은 종실의 품질에 영향을 주는 요인이

밀가루의 선택 정도로 일 평균 최고기온의 영향에 비하여 그 영향은 매우 한정적이다(Randall & Moss 1990). 적산온도(accumulated temperature)는 무처리구보다 고온처리구에서 각각 322.4도(0DAF)와 273.7도(14DAF)가 높았다. 이러한 고온조건하에서 등숙기간 동안 고온이 종실의 특성에 미치는 영향을 평가한 결과, 종실의 폭(width)과 두께(thickness)는 무처리구에 비하여 고온처리구 중 0DAF에서 작아졌으며, 원형율은 반대로 증가하였다(Table 3). 그 영향력은 14DAF보다 0DAF에서 더욱 컸다. 반면, 종실의 무게(weight), 부피(volume), 길이(length)는 고온의 영향을 받지 않았다(Table 3). 최근 중국 밀을 이용한

연구 결과 또한 본 연구의 결과와 동일하게 등숙기 고온에 의해 종실의 폭은 작아졌지만, 길이는 변화가 없었고, 천립중은 유의하게 감소하였다(Zhang et al. 2018). 하지만 국내 밀을 이용한 본 연구에서는 고온에 의한 종실 특성의 변화 폭이 크지 않았기 때문에 리터중(test weight)과 천립중(1000-kernel weight)의 변화가 없는 것으로 생각된다(Table 3).

고온에 의한 종실의 특성을 유전형질에 따라 분석한 결과(Fig. 1, Table 2), *Glu-D1d*를 가진 품종이 *Glu-D1f*를 가진 품종보다 유의하게 높은 천립중을 보였고, *Glu-D1d*와 *Glu-D1f*를 가진 품종은 모두 천립중이 감소하였으며, *Glu-D1f* 보다 *Glu-D1d*를

Fig. 1. The change and difference of grain weight of Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering day. (A), the change of 1,000-kernel weight according to the *Glu-D1* alleles; (B), the difference of test weight according to the kernel hardness; (C), the difference of test weight according to the *Glu-D1* allele; (D), the difference of 1,000-kernel weight according to the *Glu-B3* alleles. Values followed by the same letters within treatment are not significantly different at $p \leq 0.05$.

Table 3. Grain traits of 11 Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering day.

Treatments ^z	Grain						Test weight (g)	1000-kernel weight (g)
	Weight (mg)	Volume (cc)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Roundness (mm)		
Control	30.6a ^y	38.0a	6.7a	3.4a	2.9a	1.9b	782.0a	44.3a
0DAF	30.1a	38.0a	6.7a	3.2b	2.7b	1.9a	789.3a	38.9a
14DAF	30.2a	38.0a	6.7a	3.2ab	2.8ab	1.9ab	802.8a	40.7a

^zWheat cultivars were treated according to the procedure in material and method.

^yValues followed by same letters within same characteristic are not significantly different at $p < 0.05$.

가진 품종은 천립중의 변화 폭이 작았다(Fig. 1A). 기존 연구 결과에 따르면, *Glu-D1a*에 비해 *Glu-D1d*를 가진 품종은 고온에 대한 저항성이 상대적으로 높고, 종실 발달 과정에서 글루테닌이 빠르게 형성된다. 또한, 상대적으로 많은 양의 글루테닌 고분자(glutenin macropolymer, GMP)를 나타내며, 입자가 큰 글루테닌을 갖고 있다(Blumenthal et al. 1995, Don et al. 2005, Irmak et al. 2008). 하지만, 주로 아시아, 특히 한국과 일본 밀 계통은 *Glu-D1a* 보다 *Glu-D1f*를 갖고 있기 때문에(Payne et al. 1983, Hong & Park 1998), *Glu-D1d*와 *Glu-D1f* 간의 글루테닌 중합에 대한 보고는 없지만, 본 연구 결과에 의하면 *Glu-D1f* 형질보다 *Glu-D1d*의 형질이 온도 변화에 덜 영향을 받는 것으로 생각된다. 종실 정도에 따른 리터중의 변화는 경질밀(hard wheat)의 리터중이 연질밀(soft wheat)의 리터중에 비하여 높았으며, 온도의 변화에 따른 경질밀과 연질밀 간 리터중 차이는 나타나지 않았다(Fig. 1B). 그러나 대립형질에 따른 리터중의 변화를 비교한 결과, *Glu-D1* 대립형질 간에 0DAF에서 리터중의 차이를 보였다. *Glu-D1d*를 가진 품종의 리터중이 *Glu-D1f*를 가진 품종의 리터중보다 높게 나타났다(Fig. 1C). *Glu-B3*의 대립형질 간에는 천립중에서 차이를 보였으며, *Glu-Bah1*가 *Glu-B3d*보다 고온처리구인 14DAF에서 높은 천립중을 나타내었다(Fig. 1D). 이 결과는 국내 기후 변화에 따른 고온등숙 우수 계통 선발을 위한 표지인자로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

고온처리에 따른 밀가루와 반죽 특성 변화

밀가루의 이화학적 특성과 반죽 특성의 변화에 대한 고온의 영향을 평가하였다(Table 4). 회분함량, 밀가루 입자 크기, 백색도, 아밀로스와 단백질 함량은 무처리구에 비하여 0DAF와 14DAF에서 고온에 의한 변화가 없었다. 손상전분과 총 전분함량은 고온에 의하여 처리구에 따라 다소 감소하였으나 감소 폭이 유의미한 수준은 아니었다. 등숙기 동안 1일 최고 기온이

35°C 이상의 고온은 밀의 반죽특성에 변화를 주는 주요 요소이다(Blumenthal et al. 1993). 반죽 강도는 고온에 노출되는 기간과 부의상관을 나타내며, 반죽 신장성과는 정의상관을 나타낸다(Blumenthal et al. 1993). 반죽 안정도는 고온에 많은 영향을 받는다(Dupont et al. 2006). 반죽 강도를 결정하는 반죽 시간은 고온이 지속된 시간이 길 수록 감소하며, 품종간 다소 차이를 보인다(Wardlaw et al. 2002). 고온에 의한 반죽 강도의 감소는 고분자 글루테닌 비율의 감소와 연관이 있으나 이러한 품질의 변화는 단백질 함량의 변화와는 관련이 없다(Wardlaw et al. 2002). 기존 연구 결과와는 다르게, 이 연구에서는 고온에 의한 밀가루의 이화학적 특성의 변화는 유의미한 차이가 없었기 때문에, 반죽 특성을 나타내는 가수성 및 반죽 시간과 안정도의 변화에도 유의미한 차이가 없었다. 온도의 변화에 대한 유전자형에 따른 밀가루의 이화학적 특성의 변화를 확인한 결과(Fig. 2, Table 2), 경질밀의 밀가루의 입자 크기는 연질밀보다 크게 나타났다(Fig. 2A). 즉, 경질밀의 밀가루 입자 중에 큰 입자의 분포가 연질밀에 비해 높다는 연구 결과와 상응하였다(Kim et al. 2004). 손상전분은 *Glu-B1b*를 가진 품종이 *Glu-B1f*를 가진 품종보다 낮은 함량을 나타내었다(Fig. 2B). *Glu-B1b*는 *Glu-B1f*보다 낮은 손상전분 함량을 보인다는 이전 결과와 상응하였다(Shin et al. 2012). 침전가는 *Glu-D1d*를 가진 품종이 *Glu-D1f*를 가진 품종보다 높았다(Fig. 2C). 이러한 결과는 *Glu-D1d* 대립형질이 *Glu-D1f*보다 높은 침전가뿐만 아니라 높은 중합단백질의 비추출성 중합단백질의 비율을 보인다는 결과와 상응하였다(Yanaka et al. 2007). 또한 유전적인 특성이 환경적인 변이보다 밀가루 품질에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 따라서 *Glu-D1d* 대립형질을 가진 금강밀이 다른 품종에 비해 빵의 부피가 우수하였고, 우리밀의 경우 국수용에 적합한 것으로 확인되었다. *TaSus-2B-L*를 가진 품종은 *TaSus-2B-H*를 가진 품종보다 반죽의 안정도에서 높은 수치를 나타내었다(Fig. 2D).

Table 4. Flour and dough properties of 11 Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering.

Treatments ^z	Ash (%)	Average particle size (um)	Whitness Index	Amylose (%)	Damaged starch (%)	Total starch (%)	Protein (%)	SDS-sedimentation volume (ml)	Mixograph		
									Water absorption (%)	Mixing time (min)	Mixing tolerance (cm)
Control	0.41a ^y	71.9a	87.8a	27.4a	5.7a	71.4a	11.1a	44.9a	60.2a	2.9a	12.3a
0DAF	0.41a	71.9a	87.3a	27.8a	6.0a	72.5a	11.0a	42.7a	59.5a	2.7a	13.4a
14 DAF	0.41a	72.1a	86.8a	27.9a	6.3a	73.8a	11.1a	41.7a	59.7a	2.7a	13.1a

^zWheat cultivars were treated according to the procedure in material and method.

^yValues followed by same letters within same characteristic are not significantly different at $p < 0.05$.

Fig. 2. The difference of average of particle size of wheat flour (A), damaged starch content (B), SDS-Sedimentation volume (C) and mixing tolerance of mixograph (D) of Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering day. Values followed by the same letters within treatment are not significantly different at $p \leq 0.05$.

고온처리에 따른 글루텐 특성 변화

역상 고성능 액체 크로마토그래피(reversed-phase high-performance liquid chromatography, RP-HPLC)를 이용하여 고온이 글루텐 분획의 특성에 미치는 영향을 분석하였다(Table 5). 국내 품종의 각 글루텐 분획의 분석 결과, 글루테닌 구성 요소로서 x-, y-타입 서브유닛을 포함하는 HMW-GS, LMW-GS, 그리고 글리아딘 구성 요소로서 ω -, ($\alpha + \beta$)-, γ -글리아딘은 고온에 의한 특이적 변화는 확인되지 않았다. 또한, 글리아딘과 HMW-GS/LMW-GS의 비율, LMW-GS/HMW-GS 비율, x-/y-type의 비율은 유의미한 변화는 나타나지 않았다. 고온에 의한 단백질 함량의 변화는 정의상관을 보인다(Blumenthal et al. 1993). 반면, 단백질 축적의 지속 및 속도는 온도변화에 따라 큰 변화없이 유사한 정도를 유지한다(Dupont et al. 2006). 단백질 분획 중, α -글리아딘과 HMW-GS의 단백질 발현양은 고온에 의해 증가하나, LMW-GS의 발현양은 감소한다(Dupont et al. 2006). HMW/LMW의 비율은 고온 스트레스에 의해 감소하지만 글루테닌 입자는 커진다(Don et al. 2005). 개화기 14일 후 동안 30°C 이상의 온도가 누적되면 글리아딘은 증가하고 글루테닌은 감소한다(Panozzo & Eagles 2000). 이러한 이유로 글루테닌에 대한 글리아딘의 비율은 고온에서 상승한다(Malik 2009). 반면, 이러한 연구결과

와는 다소 상반되는 연구결과도 보고되었다. Castro et al. (2007)은 고온 스트레스는 저분자 알부민(albumin), 글로불린(globulin), 글리아딘과 같은 단량체 단백질(monomeric protein), 글루테닌과 같은 용해 중합 단백질(soluble polymeric protein)의 비율에 큰 영향을 주지 않으며, 단지 이러한 단백질의 구성요소에 영향을 미치는 정도는 품종에 따라 다르다고 보고하였다. 또한, HMW-GS와 LMW-GS 고온에 의해 그 조성은 변하지 않는다(Branlard et al. 2015). 결과적으로 고온에 의한 국내 밀 품종의 전체적인 글루텐 분획의 변화는 유의미한 차이를 보이지는 않았다. 하지만 유전형질에 따른 고온의 영향을 분석한 결과(Fig. 3, Table 2), *Glu-A1c*를 가진 품종의 HMW-GS는 y-type의 비율의 변화는 없었으나, *Glu-A1ab*를 가진 품종의 y-type 비율은 고온처리구인 0DAF에서 감소하였다(Fig. 3A). *Glu-B3* 대립형질에서는 이와 반대의 경향이 확인되었다. *Glu-B3ahi*를 가진 품종의 HMW-GS의 y-type의 비율은 고온에 영향을 받지 않았으나, *Glu-B3d*를 가진 품종의 y-type 비율은 고온에 의하여 증가하였다(Fig. 3B). *Glu-A1*에서 *Glu-A1c*를 가진 품종의 글리아딘과 LMW-GS의 비율은 고온에 영향을 받지 않았으나, *Glu-A1ab*를 가진 품종은 글리아딘과 LMW-GS의 비율이 고온처리구인 14DAF에서 감소하였다(Fig. 3C). *Glu-B1* 유전형질 분석 결과, 고온은 *Glu-B3ahi*

Table 5. Gluten properties of 11 Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering using RP-HPLC^z.

Treatments ^y	Proportion (%)							Ratio			
	Glutenin				Gliadin			Gliadin to HMW-GS	Gliadin to LMW-GS	LMW-GS to HMW-GS	X-type to Y-type
	HMW-GS	X-Type	Y-Type	LMW-GS	ω	$\alpha + \beta$	γ				
Control	49.9a ^x	69.8a	30.2a	50.1a	12.0a	52.7a	35.3a	9.2a	3.4a	2.7a	0.7a
0DAF	49.5a	70.0a	30.0a	50.5a	12.6a	52.5a	35.0a	8.6a	3.4a	2.6a	0.7a
14 DAF	49.3a	68.1a	32.0a	50.7a	13.0a	51.8a	35.2a	8.5a	3.2a	2.7a	0.7a

^zHMW-GS, amount of high molecular weight glutenin subunits; X-Type, amount of x-type in HMW-GS; Y-Type, amount of y-type in HMW-GS; LMW-GS, low molecular weight glutenin subunits.

^yWheat cultivars were treated according to the procedure in material and method. DAF = day after flowering.

^xValues followed by same letters within same characteristic are not significantly different at $p < 0.05$.

Fig. 3. The change of proportion of y-type subunits in HMW-GS (A and B) and ratio of gliadin to LMW-GS (C and D) grain weight of Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering day. Values followed by the same letters within treatment are not significantly different at $p \leq 0.05$.

를 가진 품종의 글리아딘과 LMW-GS의 비율의 변화에 영향을 주었지만, *Glu-B3d*를 가진 품종에는 영향을 주지 않았다(Fig. 3D). HMW-GS의 비율은 유전형질에 따라 고온에 영향을 받는 것으로 확인하였다. 즉, *Glu-A1ab*를 가진 품종과 *Glu-A1c*를 가진 품종 간의 HMW-GS의 비율은 무처리구에서는 차이를 보이지 않았으나, 고온처리구인 14DAF에서는 대립형질 간에 HMW-GS의 비율의 변화가 나타났다(Fig. 4A). ($\alpha + \beta$)-글리아딘의 비율은 고온처리구인 0DAF에서 *Glu-B1fi*를 지닌 품종이 *Glu-B1b*를 지닌 품종에 비하여 높은 비율을 나타냈다(Fig. 4B).

반면, 고온처리구인 14DAF에서는 *Glu-B1b*와 *Glu-B1fi*를 가진 품종 간에 ($\alpha + \beta$)-글리아딘 비율의 차이는 없었다(Fig. 4B). γ -글리아딘은 유전형질에 따라 무처리와 고온처리구에서 차이를 나타내었다. *Glu-B3ahi*를 가진 품종이 *Glu-B3d*를 가진 품종보다 높은 γ -글리아딘 비율을 나타냈다(Fig. 4C). HMW-GS/LMW-GS의 비율도 유전형질에 따라 고온에 영향을 받는 것을 확인하였다. 무처리구에서는 유전형질에 따라 HMW-GS/LMW-GS의 비율에 차이가 없었으나, 고온처리구인 0DAF에서는 *Glu-A3c*를 가진 품종이 *Glu-A3d*를 가진 품종보다 높은 LMW-GS의 비율을

Fig. 4. The difference in proportion of HMW-GS (A), and α and β gliadin (B), γ gliadin (C) and ratio of LMW-GS to HMW-GS (D) of Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering day. Values followed by the same letters within treatment are not significantly different at $p \leq 0.05$.

나타내었다(Fig. 4D). 고온은 단백질 함량 변화와 단백질 분획의 비율 변화에 영향을 미친다(Blumenthal et al. 1993, Panozzo & Eagles 2000, Dupont et al. 2006). 하지만 고온이 단백질 분획에 미치는 영향과 특히, *Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1*에서 대립형질에 따른 단백질 분획의 변화에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 그러므로 글루테닌 다양성에 따른 분자량에 의한 단백질 분획뿐만 아니라 단백질 분획 크기(size exclusion)에 따른 함량 변화에 고온이 미치는 영향에 대한 깊이 있는 연구가 더욱 필요하다.

고온 처리에 따른 가공적성 변화

등숙기 동안 종실의 저장 단백질과 같은 저장 요소들이 축적될 때 고온은 밀의 가공적성에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나이다(Wardlaw & Wrigley 1994). 국산밀 11개 품종에 대하여 고온이 가공 적성에 미치는 영향을 평가하였다(Table 6). 빵의 부피(bread loaf volume)는 온도와 부피상관을 가지며(Blumenthal et al. 1993), 온도에 상응하는 글루테닌 중합체의 분자질량(molecular mass)의 증가는 빵의 부피를 감소시킨다(Branlard et al. 2015). 최근 연구에 따르면 온도의 증가 정도에 따라 빵의 부피는 변화가 없거나 35℃를 넘는 아주 가혹한 열 스트레스

조건에서는 빵의 부피가 증가한다는 보고도 있다(Hernández-Espinosa et al. 2018). 이 연구의 결과에서는 빵의 부피 및 속질 경도의 변화는 유의미한 차이를 나타내지 않았다(Table 6). 단지 온도 조건에 상관없이 빵의 부피는 유전형질에 따라 차이를 보였다. *Glu-D1d*를 가진 품종이 *Glu-D1f*를 가진 품종에 비하여 높은 빵의 부피를 보였다(Fig. 6A). 이 연구 결과와 같이 빵의 부피는 고온과 상관없이 밀가루의 단백질 함량과 같은 유전적 특성과 관계가 있다는 보고도 있다(Dupont et al. 2006). 이처럼 고온이 빵의 품질에 미치는 영향에 대한 결과들은 다소 상반되는 결과들이 보고되고 있다.

국수의 부드러움과 탄력성은 전분의 팽윤력(swelling power)과 팽윤량(swelling volume) 및 밀가루의 팽윤량과 정의상관을 나타낸다(Crosbie 1991). 고온은 전분 합성 활성의 감소에 영향을 미치기 때문에 전분 축적의 감소를 초래한다(Hawker & Jenner 1993, Prakash et al. 2004). 그 뿐만 아니라 고온스트레스는 밀가루의 팽윤력을 감소시키며, 전분의 호화(gelatinization)와 노화(retrogradation)특성 변화에 유의미한 영향을 미친다(Wang et al. 2017). 그러나 고온에 의한 국수의 팽윤력 변화는 품종에 따라 다르며, 그와 상관없이 아밀로스 함량의 변화는 고온의

Table 6. End-use quality of 11 Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering.

Treatments ^z	Bread		White salted noodles					Sugar Snap Cookie	
	Loaf Volume (ml)	Crumb Firmness (N)	Noodles dough sheet		Texture of cooked noodles			Width (mm)	Thickness (mm)
			Thickness (mm)	Whiteness Index	Hardness (N)	Springiness (Ratio)	Cohesiveness (Ratio)		
Control	709.1a ^y	6.5a	1.8a	77.5a	3.6a	0.89a	0.66a	81.6a	6.0a
0DAF	675.8a	7.2a	1.8a	75.9b	3.6a	0.89a	0.66a	80.4a	6.0a
14 DAF	707.2a	6.9a	1.8a	76.4ab	3.6a	0.89a	0.66a	80.3a	6.1a

^zWheat cultivars were treated according to the procedure in material and method. DAF = day after flowering.^yValues followed by same letters within same characteristic are not significantly different at $p < 0.05$. **Fig. 5.** The change of whiteness of noodle dough sheet according to kernel hardness (A), *TaGW2* alleles (B) and *TaSus2* alleles (C) in Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering day. Values followed by the same letters within treatment are not significantly different at $p \leq 0.05$.

영향을 받지 않는다(Stone & Nicolas 1994). 국내 밀 품종에서 국수 면대의 두께 및 강도, 탄력성, 응집성은 빵의 부피와 속질의 정도처럼 고온에 따른 변화를 보이지 않았다(Table 6). 반면, 국수의 백색도는 고온에 대한 유의미한 변화가 나타났으며, 적산 온도가 가장 높은 0DAF의 백색도가 가장 낮았다(Table 6). 고온에 대한 유전형질에 따른 국수의 백색도 변화는 종실 정도에 따라 연질밀은 다소 차이는 있으나 그 변화가 유의미한 차이를 보이지는 않았다(Fig. 5). 그러나 경질밀의 국수의 백색도는 유의미한 변화의 차이를 보였으며, 두 고온처리구 모두 무처리구보다 낮게 나타났다. 고온에 의해 증가되는 단백질 함량은 밀가루

밝기(brightness, *L*)과 부의상관이며(Wang et al. 2014), 밀가루 밝기는 백색도와 정의상관을 나타낸다(Horváth & Véha 2010). 이러한 상호관계에 따라 고온은 국수의 백색도를 감소시킨다고 생각된다. 즉, 고온에 의한 단백질 함량 변화가 국수의 백색도에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이러한 고온에 의한 단백질 함량의 증가는 종실 크기와 정의상관을 보였으며, 종실 크기와 관련된 유전형질에 따라 고온에 의한 백색도의 차이를 보였다. *TaGW2-A* 또는 *TaSus2-H*를 가진 품종은 *TaGW2-G* 또는 *TaSus2-L*를 가진 품종에 비해 적산온도가 가장 높은 0DAF에서 국수의 백색도가 감소하였다. 또한 *TaGW2-A* 또는 *TaSus2-H*를

Fig. 6. The difference of bread loaf volume according to *Glu-D1* alleles (A), width of sugar snap cookie according to kernel hardness (B), *Glu-B1* alleles (C), *Glu-A3* alleles (D) and *TaCwi-A1* alleles (E) in Korean wheat cultivars grown at different high temperature treatments after flowering day. Values followed by the same letters within treatment are not significantly different at $p \leq 0.05$.

가진 품종은 *TaGW2-G* 또는 *TaSus2-L*를 가진 품종에 비해 중자가 큰 것으로 나타났다(Su et al. 2011, Jiang et al. 2011).

과자의 폭과 두께는 고온에 따른 유의미한 변화를 나타내지 않았다. 과자의 폭은 연질밀이 경질밀보다 컸으며(Fig. 6B), *Glu-A3d*를 가진 품종이 *Glu-A3c*를 가진 품종보다, *TaCwi-A1b*를 갖는 품종은 *TaCwi-A1a*를 가진 품종보다 과자의 폭이 크게 나타났다(Figs. 6D, 6E). 그리고, *Glu-B1b*를 갖는 품종은 *Glu-B1f*를 가진 품종에 비해 과자의 폭이 크게 나타났다(Fig. 6C). *Glu-B1f*를 갖는 품종은 과자의 폭이 고온에 의해 감소되었으며, *Glu-B1b* 가진 품종은 고온에 따른 과자의 폭의 변화가 나타나지 않았다(Fig. 6D).

적 요

밀의 등숙 시기의 고온에 의한 밀가루의 이화학적 특성 변화와 가공적성을 평가하였다. 고온은 종실의 폭과 두께의 변화에 영향을 미쳤으나, 종실의 무게, 부피, 길이에는 영향을 미치지 않았다. 이러한 종실 특성의 변화는 평균적으로 리터중과 천립중에 영향을 주지 않았다. 고온은 전반적으로 밀가루의 이화학적 특성, 반죽특성, 글루텐 구성요소에 어느 정도 영향을 미쳤으나 통계학적으로 유의미하지는 않았다. 이러한 결과를 바탕으로 가공적성을 평가한 결과, 고온은 빵의 부피, 국수 식미, 과자 크기의 변화에 영향을 미치지 않는 않았다. 그러나 유전형질에 따른 분석에

서 천립중은 *Glu-D1* 대립형질에 따라 0DAF에서 감소하였으며, *Glu-D1d* 대립형질을 가진 품종이 *Glu-D1f* 대립형질을 가진 품종보다 고온에 따른 천립중의 감소폭이 작았다. 또한, 0DAF에서 *Glu-D1d*를 가진 품종은 *Glu-D1f*를 가진 품종에 비해 리터중이 높았고, 14DAF에서 *Glu-B3ah1*를 가진 품종은 *Glu-B3d*를 가진 품종보다 높은 천립중을 보였다. 글루텐 구성요소 중, 고온에서 HMW-GS의 γ -타입의 비율은 *Glu-A1ab*를 가진 품종은 감소하였으며, *Glu-B3d*를 가진 품종은 증가하였다. *Glu-A1ab* 또는 *Glu-B3ah1*를 가진 품종의 LMW-GS와 글리아딘의 비율은 고온에 의해 감소하였다. 결론적으로 등숙기간 동안의 고온은 종실의 특성에 영향을 미치지 않지만, 단백질 조성과 밀가루 가공적성에 유의한 영향을 미치지 않았다. 반면, 밀의 유전적인 특성이 밀의 단백질 특성과 가공적성에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 앞으로 고온에 대한 내성과 가공적성 향상에 중요한 글루텐 구성요소의 유전적 다양성 확보, 단백질 분획 및 분획 크기에 따른 지속적인 평가가 필요할 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 춘파형 고온저항성 밀 개발, 세부과제번호: PJ01246402)에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. American Association of Cereal Chemists International. 2010. Approved Methods of Analysis, 11th ed. Methods 08-01.01, 10-10.03, 10-52.01, 26-10.02, 44-15.02, 46-30.01, 54-40.02A, 55-40.01, 56-70.01. Available online only. AACCI: St. Paul, MN, USA.
2. Blumenthal CS, Barlow EWR, Wrigley CW. 1993. Growth environment and wheat quality: the effect of heat stress on dough properties and gluten proteins. *J Cereal Sci* 18: 3-21.
3. Blumenthal CS, Bekes F, Batey IL, Wrigley CW, Barlow EWR, Moss HJ, Mares DJ, Barlow EWR. 1991. Interpreting of grain quality results from wheat variety trials with reference to high temperature stress. *Aust J Agric Res* 42: 325-334.
4. Blumenthal CS, Bekes F, Gras PW, Barlow EWR, Wrigley CW. 1995. Identification of wheat genotypes tolerant to the effects of heat stress on grain quality. *Cereal Chem* 72: 539-544.
5. Branlard G, Lesage VS, Bancel E, Martre P, Méleard B, Rhazi L. 2015. Coping with wheat quality in a changing environment: proteomics evidence for stress caused by environmental changes. *Proc 12th Int Wheat Genet Symp*, Yokohama, Japan
6. Castro M, Peterson CJ, Rizza MD, Dellavalle PD, Vazquez D, Ibáñez V, Ross, A. 2007. Influence of heat stress on wheat grain characteristics and protein molecular weight distribution. In: *Wheat Production in Stressed Environment*. pp. 365-371. In: Buck HT, Nisi JE, Salomón N. (eds) *Wheat Production in Stressed Environments*. *Developments in Plant Breeding*, vol 12. Springer, Dordrecht.
7. Cho SW, Ko HS, Kim CS, Kang CS, Park CS. 2019. Effect of flour color and starch pasting properties on color of noodle dough sheet and texture of cooked noodles in Korean wheat cultivars. *Int J Agric Biol* 21: 271-281.
8. Corbellini M, Mazza L, Ciaffi M, Lafiandra D, Borghi B. 1998. Effect of heat shock during grain filling on protein composition and technological quality of wheats. *Euphytica* 100: 147-154.
9. Crosbie GB. 1991. The relationship between starch swelling properties, paste viscosity and boiled noodle quality in wheat flours. *J Cereal Sci* 13: 145-150.
10. Dias AS, Bagulho AS, Lidon FC. 2008. Ultrastructure and biochemical traits of bread and durum wheat grains under heat stress. *Braz. Plant Physiol* 20: 323-333.
11. Don C, Lookhart G, Naeem H, MacRitchie F, Hamer RJ. 2005. Heat stress and genotype affect the glutenin particles of the glutenin macropolymer-gel fraction. *J Cereal Sci* 42: 69-80.
12. Dupont FM, Hurkman WJ, Vensel WH, Tanaka C, Kothari KM, Chung OK, Altenbach SB. 2006. Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature. *Eur J Agron* 25: 96-107.
13. Farooq M, Bramley H, Palta JA, Siddique KHM. 2011. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phase. *Crit Rev Plant Sci* 30: 491-507.
14. Gibson TS, Al Qalla H, McCleary BV. 1992. An improved enzymic method for the measurement of starch damage in wheat flour. *J Cereal Sci* 15: 15-27.
15. Gibson TS, Solah VA, McCleary BV. 1997. A procedure to measure amylose in cereal starches and flours with Concanavalin A. *J Cereal Sci* 25: 111-119.
16. Graybosch RA, Peterson CJ, Baenziger PS, Shelton DR. 1995. Environmental modification of hard red winter wheat

- flour protein composition. *J Cereal Sci* 22: 45-51.
17. Guedira M, McCluskey PJ, MacRitchie F, Paulsen GM. 2002. Composition and quality of wheat grown under different shoot and root temperatures during maturation. *Cereal Chem* 79: 397-403.
18. Hawker JS, Jenner CF. 1993. High temperature affects the activity of enzymes in the committed pathway of starch synthesis in developing wheat endosperm. *Aust J Plant Physiol* 20: 197-209.
19. Hernández-Espinosa N, Mondal S, Autrique E, Gonzalez-Santoyo H, Grossa J, Huerta-Espino J, Singh RP, Guzmán C. 2018. Milling, processing and end-use quality traits of CIMMYT spring bread wheat germplasm under drought and heat stress. *Field Crops Res* 215: 104-112.
20. Hong BH, Park CS. 1998. Genetic variation of high molecular weight glutenin (HMW-Glu) subunit in Korean wheat. *Korean J Crop Sci* 43: 259-263.
21. Horváth Z, Véha A. 2010. Colour measurement of Hungarian wheat grits with different hardness index. *Acta Univ. Sapientiae. Alimentaria* 8: 70-77.
22. Irmak S, Naeem HA, Lookhart GL, MacRitchie F. 2008. Effect of heat stress on wheat proteins during kernel development in wheat near-isogenic lines differing at *Glu-D1*. *J Cereal Sci* 48: 513-516.
23. Jiang Q, Hou J, Hao C, Wang L, Ge H, Dong Y, Zhang X. 2011. The wheat (*T. aestivum*) sucrose synthase 2 gene (*TaSus2*) active in endosperm development is associated with yield traits. *Funct Integr Genomics* 11: 49-61.
24. Kim W, Choi SG, Kerr WL, Johnson JW, Gaines CS. 2004. Effect of heating temperature on particle size distribution in hard and soft wheat flour. *J Cereal Sci* 40: 9-16.
25. Korean Meteorological Administration, 2016. http://www.weather.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp
26. Majoul T, Bancel E, Triboï E, Ben Hamida J, Branlard G. 2003. Proteomic analysis of the effect of heat stress on hexaploid wheat grain: characterization of heat-responsive proteins from total endosperm. *Proteomics* 3: 175-183.
27. Malik AH. 2009. Nutrient uptake, transport and translocation in cereals: influences of environmental and farming conditions. *Swed Univ Agric Sci* 1: 1-46.
28. McCleary BV, Gibson TS, Mugford DC. 1997. Measurement of total starch in cereal products by amyloglucosidase α -amylase method: collaborative study. *J AOAC Int* 80: 571-579.
29. Nguimbou RM, Njintang NY, Himeda M, Gaiani C, Scher J, Mbofung CMF. 2012. Effect of cross-section differences and drying temperature on the physicochemical, functional and antioxidant properties of giant taro flour. *Food Biotechnol* 6: 1809-1819.
30. Panozzo JF, Eagles HA. 2000. Cultivar and environmental effects on quality characters in wheat. II. Protein. *Aust J Agric Res* 51: 629-636.
31. Park CS, Baik BK. 2002. Flour characteristics related to optimum water absorption of noodle dough for making white salted noodles. *Cereal Chem* 79: 867-873.
32. Payne PI, Holt LM, Lawrence GJ. 1983. Detection of a novel high molecular weight subunit of glutenin in some Japanese Hexaploid wheats. *J Cereal Sci* 1: 3-8.
33. Prakash P, Sharma-Natu P, Ghildiyal M. 2004. Effect of different temperature on starch synthase activity in excised grains of wheat cultivars. *Indian J Exp Biol* 42: 227-230.
34. Randall PJ, Moss HJ. 1990. Some effects of temperature regime during grain filling on wheat quality. *Aust J Agric Res* 41: 603-617.
35. RDA. 2012. Standard of research and analysis for agricultural technology. pp. 339-365.
36. Shi YC, Seib PA, Bernardin JE. 1994. Effects of temperature during grain filling on starches from six wheat cultivars. *Cereal Chem* 71: 369-389.
37. Shin S, Kang CS, Jeung JU, Baik BK, Woo SH, Park CS. 2012. Influence of allelic variations of glutenin and puroindoline on flour composition, dough rheology and quality of white salted noodles from Korean wheat cultivars. *Korean J Breed Sci* 44: 406-420.
38. Sofield I, Evans LT, Cook MG, Wardlaw IF. 1977. Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust J Plant Physiol* 4: 785-797.
39. Spiertz JHJ, Hamer RJ, Xu H, Primo-Martin C, Don C, van der Putten PEL. 2006. Heat stress in wheat (*Triticum aestivum* L.): Effects on grain growth and quality traits. *Eur J Agron* 25: 89-95.
40. Stone PJ, Nicolas ME. 1994. Wheat cultivars vary widely in their responses of grain yield and quality to short periods of post-anthesis heat stress. *Aust J Plant Physiol* 21: 887-900.
41. Stone PJ, Nicolas ME. 1996. Effect of timing during grain filling on two wheat varieties differing in heat tolerance. II. Fractional protein accumulation. *Aust J Plant Physiol* 23: 739-749.
42. Streck NA. 2005. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop

- growth, development and yield. *Ciencia Rural* 35: 730-740.
43. Su Z, Hao C, Wang L, Dong Y, Zhang X. 2011. Identification and development of a functional marker of TaGW2 associated with grain weight in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theor Appl Genet* 122: 211-223.
44. Tester RF, Morisson WR, Ellis RH, Piggott JR, Batts GR, Wheeler TR, Morisson JIL, Hadley P, Ledward DA. 1995. Effects of elevated growth temperature and carbon dioxide levels on some physicochemical properties of wheat starch. *J Cereal Sci* 22: 63-71.
45. Wang C, Kovacs MIP, Fowler DB, Holley R. 2014. Effects of protein content and composition on white noodle making quality: color. *Cereal Chem* 81: 777-784.
46. Wang S, Li T, Miao Y, Zhang Y, He Z, Wang S. 2017. Effects of heat stress and cultivar on the functional properties of starch in Chinese wheat. *Cereal Chem* 94: 443-450.
47. Wardlaw IF, Blumenthal C, Larroque O, Wrigley CW. 2002. Contrasting effects of chronic heat stress and heat shock on kernel weight and flour quality in wheat. *Funct Plant Biol* 29: 25-34.
48. Wardlaw IF, Wrigley CW. 1994. Heat tolerance in temperate cereals: An overview. *Aust J Plant Physiol* 21: 695-703.
49. Wrigley C. 2006. Global warming and wheat quality. *Cereal Foods World* 51: 34-36.
50. Yan X, Liu W, Yu ZT, Han CX, Zeller FJ, Hsam SLK, Yan YM. 2014. Rapid separation and identification of wheat HMW glutenin subunits by UPLC and comparative analysis with HPLC. *Aust J Crop Sci* 8: 140-147.
51. Yanaka M, Takata K, Ikeda TM, Ishikawa N. 2007. Effect of the high-molecular-weight glutenin allele, *Glu-D1d*, on noodle quality of common wheat. *Breed Sci* 57: 243-248.
52. Zhang T, Wang Z, Yin Y, Cai R, Yan S, Li W. 2010. Starch content and granule size distribution in grains of wheat in relation to post-anthesis water deficits. *J Agron Crop Sci* 196: 1-8.
53. Zhang Y, Lou H, Guo D, Zhang R, Su M, Hou Z, Zhou H, Liang R, Xie C, You M, Li B. 2018. Identifying changes in the wheat kernel proteome under heat stress using iTRAQ. *Crop J* 6: 600-610.
54. Zhou JW, Han CX, Cao H, Zhen SM, Yu ZT, Li XH, Ma WJ, Yan YM. 2013. Fast identification of wheat 1BL.1RS translocation by reversed-phase ultra-performance liquid chromatography (RP-UPLC). *Crop Pasture Sci* 64: 865-873.