국산밀에서 농업형질 및 종실 형태가 수발아에 미치는 영향

신상현¹ · 김경훈¹ · 강천식¹ · 박종철¹ · 현종내¹ · 박철수^{2*}

¹국립식량과학원, ²전북대학교 농업생명과학대학 작물생명과학과

Effects of Agronomic Characteristics and Grain Morphology on Pre-harvest Sprouting in Korean Wheat Cultivar

Sanghyun Shin¹, Kyeong-Hoon Kim¹, Chon-Sik Kang¹, Jong-Chul Park¹, Jong-nae Hyun¹, and Chul Soo Park^{2*}

¹National Institute of Crop Science, RDA, Iksan 570-080, Korea

²Department of Crop Science and Biotechnology, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

Abstract : Pre-harvest sprouting (PHS), which is the precocious germination of the grains in the spike before it is harvest, is the serious problem in the reduction of end-use quality in wheat. In this study, the relationships among PHS tolerance, agronomic and grain characteristics in Korean wheat cultivars were evaluated for two years to improve PHS tolerance in Korean wheat breeding programs. Grain characteristics including 1,000 grain weight and grain size (length, width and thickness), PHS tolerance conducted by the mist spray in the humid chamber (PHS-MS) and germination index (GI), and Agronomic traits including heading date, maturing date, culm length, awn length and the number of grain/spike, were significantly influence by genotype, year and the interaction between year and genotype, except in spike length, the number of spike/m² and test weight. PHS tolerance and GI were significantly correlated with 1,000-grain weight ($r = 0.618$, and $r = 0.528$, respectively) and length, width and thickness of grain, although no significant relationship between agronomic traits and PHS tolerance was found in Korean wheat cultivars. PHS-MS also showed positively correlated with GI value ($r = 0.770$, $P < 0.001$). White grain cultivars showed higher PHS-MS and GI values (61.86% and 0.58, respectively) than red grain cultivars (11.89% and 0.18, respectively). White grain cultivars also showed higher values in length, width and thickness of grain than red grain cultivars. Among red grain cultivars, Alchan, Goso, Suan and Sukang showed lower values in both PHS-MS and GI ($< 2.63\%$ and < 0.05 , respectively) and these cultivars could be used to improve PHS tolerance in Korean wheat breeding programs.

Keywords : Wheat, Pre-harvest Sprouting (PHS), germination index (GI), Grain properties

서 언

밀의 수발아는 등숙 기간에 잦은 강우와 낮은 온도로 수확 전에 이삭이 비정상적으로 발아하는 현상으로 이때 발생한 α -amylase에 의해 전분이 분해되기 때문에 밀가루나 가공 제품이 고유의 특성을 잃어버리게 된다(Edwards et al. 1989, Lenton 2001, Lunn et al. 2001). 수발아가 발생하면 과피가 파괴되는 외관상 변화와 함께 원맥의 밀도가 낮아지고 천립중이 줄어들게 될 뿐만 아니라 병원균이나 세균의 번식이 쉬

워 원맥의 부패로 인한 이취가 발생하고 제분된 밀가루는 쉽게 변색이 된다(Martin et al. 1998). 수발아 된 밀가루로 만든 빵은 용적이 적고 속질의 균일성이 나빠지고 식감이 떨어질 뿐만 아니라 겉 표면의 색도 어두운 특성을 나타내며, 수발아 된 밀가루로 만든 국수는 색택이 매우 나빠지기 때문에 제품으로써 가치가 없어지게 된다(Hatcher & Symons 2000, Mares et al. 2004). 수발아 된 밀의 밀가루 및 가공제품 품질의 악영향 때문에 주요 밀 수출국과 생산국에서는 원맥의 수발아 평가를 중요한 지표로 이용하고 있다(Lee et al. 2002). 이러한 수발아 정도를 판별하기 위하여 Falling number와 Rapid Visco Analyzer를 이용한 전분의 호화 특성을 평가하거나, NIR또는 X-ray를 이용하거나, α -amylase 활성 정도를 평가하는 방법들이 이용되고 있다(Skerrett & Heywood 2000,

*Corresponding author (E-mail: pcs89@jbnu.ac.kr, Tel: +82-63-270-2533, Fax: +82-63-270-2640)

(Received on November 7, 2013. Revised on November 18, 2013. Accepted on November 25, 2013.)

Neethirajan et al. 2007, Posner 2009).

수발아 저항성은 종실의 휴면성과 종실이나 이삭의 형태와 밀접한 관련이 있는데, 이들 특성은 유전적인 특성뿐만 아니라 환경적인 영향을 받는다(Finch-Savage & LeubnerMetzger 2006). 종실의 휴면은 abscisic acid (ABA) 반응 정도와 상관이 있으며, ABA반응성이 종피색과 연관이 있다(Walker-Simmons 1987, Walker-Simmons & Sesings 1990, Himi et al. 2002, Torada & Amano 2002). 종피색을 결정하는 *R* 유전자는 휴면과 유의성 높은 관계가 있어 백립계 밀은 적립계 밀에 비하여 수발아 저항성이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Flintham et al. 1999, Mori et al. 2005, Mares et al. 2005). 또 다른 유전자서열 특이적(sequence tagged site, STS) 분자표지인 *Viviparous-1* (*Vp-1*)은 종실의 휴면성과 ABA반응성에 상관이 있어, 국내 품종과 중국 및 유럽 밀에서 *Vp-1*의 다양한 변이를 확인하였다(Yang et al. 2007, Xia et al. 2008, 2009, Chang et al. 2010, Kim et al. 2012). 이외에도 수발아 및 휴면에 관련된 quantitative traits loci (QTL)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 QTL은 2, 3, 4, 6과 7번 염색체에 위치하고 있으며, 주요 QTL은 3A와 4A염색체에 위치하는 것으로 나타났다(DePauw et al. 2009, Fofana et al. 2009, Munkvold et al. 2009, Rasul et al. 2009, Singh et al. 2010).

이삭이나 종실의 형태는 강우시 수분의 보유력에 영향을 미치기 때문에 수발아와 관련이 있는데, 망의 유무, 이삭 및 외영의 밀납이나 색과 이삭 각도가 영향을 미친다(King 1984). 이러한 종실이나 이삭의 특성이 수발아에 미치는 영향은 20%에 달하고, 도복 역시 수발아 발생에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(King & Richards 1984, King & Wettstein-Knowles 2000). 같은 이삭에서도 종실간에 휴면성에 차이가 있는데, 이삭 하부에 달린 종자의 α -amylase는 상부에 달린 종자보다 높으며, 측면에 달린 종자는 α -amylase활성이 낮은 것으로 나타났다(Gale et al. 1987). 온실에서 재배한 밀에서는 종실 정도, 1수립수와 종실의 직경이 수발아와 밀접한 연관이 있다(Barnard et al. 2005). 또한 종자가 수분을 흡수하고 건조하는 과정을 반복하게 되면 휴면성이 감소하여 수발아되기 쉽다(Mares 1993). 등숙 환경은 종자의 휴면성에 직접적으로 영향을 미치는데, 등숙 기간의 고온은 종자의 휴면성을 없애기 때문에 등숙 기간의 고온은 수발아 발생 위험을 높일 수 있으며, 등숙 기간의 한발 조건 또한 수발아 위험성을 높인다(Reddy et al. 1985, Mares 1987, Auld & Paulsen

2003). 그러므로 수발아 저항성 품종 선발을 위해서는 등숙 기간의 고온과 수분 부족 환경하에서 휴면성이 높은 계통을 선발하는 것이 유리하다.

우리나라와 비슷한 밀 재배환경인 미국 북서부 지역의 경우, 등숙 기간 강우량에 따라 수발아 발생율이 차이가 나는 것으로 보고되었는데, 강수량이 많은 해에는 수발아율이 69%에 이르고 강수량이 적은 해에는 수발아율이 16%로 나타났다(Grunberg et al. 2002). 최근의 이상 기후와 등숙기의 잦은 강우는 국내 밀 재배에 있어서 수발아 위험성을 높이는 요인으로 작용을 한다. 국내 밀 자급률 향상을 위한 재배면적 확대를 위해서는 생산 안정성을 확보해야 하는데 이를 위해서는 무엇보다 국내 밀의 수발아 저항성 증진이 중요하다. 본 연구에서는 종실 특성을 포함한 농업형질이 수발아에 미치는 영향을 평가하여 향후 국내 밀 육종 프로그램에서 수발아 저항성 품종 육성의 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

재료 및 방법

공시재료 및 기상

본 연구에 사용된 재료는 금강밀 등 31 품종으로 2011년과 2012년에 농촌진흥청 국립식량과학원 벼맥류부 포장에서 전작조건으로 0.25 m × 6 m로 10월 중순에 파종하였으며, 시비 및 재배는 농촌진흥청 표준재배법에 따라 수행하였고 6월 중순에 수확하였다. 평년의 평균 온도 10.5℃와 비교하여 2011/2012년 평균 기온은 10.2℃로 0.3℃ 낮았으며, 2010/2011년은 9.7℃로 0.8℃ 낮았다. 강수량은 2011/2012년이 332.8 mm로 평년 강수량 570.4 mm보다 23.6 mm가 적었으며, 2010/2011년에는 547.3 mm로 평년보다 23.1 mm 적었다. 생육 시기별로 평균 기온을 살펴보면, 출현기에는 평년 대비하여 0.5℃ 높았지만 재생기 이후 성숙기까지 0.7~1.9℃ 높았다.

2년 간 평균온도의 변이 추이는 출현기의 고온과 재생기 이후 출수기 전에는 저온으로 경과하고 출수기 이후 생육 후반에는 평년보다 고온으로 생육이 경과했다. 강수량 변이는 생육 시기별 변이보다 우선적으로 연간간 변이가 많이 나타났다. 파종기 이후 분얼기까지는 평년에 비하여 21.9~25.3 mm 적었으며, 출수기 이후 성숙기까지 2010/2011년에는 101.7 mm 많았지만, 2011/2012년에는 186.5 mm 적었다. 평년과 비교하였을 때, 2010/2011년은 출수기까지의 저온과 출수기 이후의 많은 강우량을 보였고, 2011/2012년은 출수기 이후의 고온과 적은 강우량을 나타내었다.

농업형질 조사

농업 형질 조사는 농촌진흥청 농업 과학 기술 조사 분석 기준(RDA, 2003)에 준하여 측정하였다. 출수기는 전체 경수 중에 40%가 출수한 날로 하였으며, 성숙기는 대부분의 이삭이 황화한 날로 조사하였다. 간장은 지면에서 이삭 끝까지의 길이를 측정하였고, 수장은 이삭 목에서 이삭 끝까지의 길이를 측정하였으며, 망장은 이삭에서 까락이 시작되는 지점과 끝 부분의 길이를 측정하였다. 단위 면적당 경수는 생육이 고른 3개소에서 25 cm × 50 cm에 있는 총 경수를 측정하여 1 m²당 경수로 환산하였다. 1수립수는 생육이 균일한 장소에서 무작위로 20수를 채취하여 탈곡 후 조사하였다. 리터중은 탈곡한 종자를 2.0 mm 중목체를 통과하지 않은 종자를 1 L 중 측정기를 이용하여 측정하였으며, 천립중도 탈곡한 종자를 2.0 mm 중목체를 통과하지 않은 종자를 1,000립을 측정하여 무게를 조사하였다. 종자의 길이, 폭과 두께는 정선된 종자를 종자 이미지 분석 장치(Seed Count Australasia Pty Ltd., Australia)로 측정하였다. 종피색 검정은 개화 후 45일에 이삭을 수확하여 종실 수분함량이 15% 정도 되도록 상온에서 10일간 방치한 후 손으로 이삭을 탈곡하여 건전립만 선별하여 이용하였다. 선별된 종자는 20립을 1M NaOH 용액에 2시간 침지를 시킨 후 종피색이 밝은 노란색을 띠면 백립계로 붉은 색을 나타내면 적립계로 분류하였다.

수발아 검정

수발아 검정을 위하여 모래묻이법을 이용하였다. 모래묻이법은 Bayer (1987) 방법을 참고하여 생리적 성숙기에 품종당 10수씩 무작위 선발하여 수확한 이삭을 모래에 꽂은 후 20±2℃ 조건에서 분무기(Humidifier HR-25, Faran Industrial Co., Korea)를 이용하여 시간당 2,500 cc를 3,400 rpm으로 분무하였으며, 14일 후 이삭 전체 립중에 발아된 립 수를 세어 백분율로 표시하였다. 종자휴면검정은 Reddy et al. (1985) 방법을 이용한 발아지수를 조사하였다. 개화 후 45일에 이삭을 수확하여 종실 수분함량이 15% 정도 되도록 상온에서 10일간 방치한 후 손으로 이삭을 탈곡하여 건전립만 선별하여 휴면 상태를 유지하도록 -20℃에 보관하였다. 발아 지수 검정을 위하여 각 이삭당 20립 종자를 4% Clorox bleach 용액 50 ml에 10분간 담근 후 증류수를 이용하여 5회 세척하였다. 세척한 종자는 90 × 15 mm 일회용 페트리디쉬에 종구가 아래로 향하도록 배치한 후 3 mL 증류수를 분무하고 검정 중에 수분이 마르지 않도록 페트리디쉬를 젖은 수건이 포함된 지

퍼백에 넣어 밀봉하여 20℃ 암조건에서 7일 동안 조사하였다. 하루 간격으로 발아된 종자를 조사하고 발아 종자는 제거하였으며, 곰팡이 발생으로 오염된 종자는 조사에서 제외하였다. 발아지수는 다음과 같이 측정하였다.

$$\frac{7 \times N1 + 6 \times N2 + 5 \times N3 + 4 \times N4 + 3 \times N5 + 2 \times N6 + 1 \times N7}{7 \times \text{전체립수}}$$

여기에서 N1, N2, N3, N4, N5, N6 과 N7은 각각 조사 1일, 2일, 3일, 4일, 5일, 6일과 7일을 나타내고 있으며, 조사 1일에 모두 발아를 했을 경우 발아지수는 1로 최고치를 나타내며, 7일에도 발아된 종자가 없는 경우 발아지수는 0으로 최저치를 나타내게 된다.

통계 분석

모든 시험은 최소 3회 이상의 반복을 두어 실시하였으며, 시험성적은 SAS 프로그램(SAS Institute, Cary, NC)을 이용하여 분산분석을 실시하고 LSD (Least Significant Difference)로 유의성을 검정하였으며, 품종과 연차간 변이의 상호작용은 ANOVA (Analysis of variance) 분석은 GLM (General Linear Model)을 이용하였으며, 품종과 연차 변이의 상호작용 성분은 오차항을 이용하였다. 상관관계는 피어슨의 상관 계수를 이용하였으며, 통계적 유의 수준은 $P < 0.05$ 으로 실시하였다.

결과 및 고찰

국내 밀 품종의 농업형질

국내 밀 품종별 농업형질의 연차간 변이에 있어서 수장과 경수는 차이가 없는 것으로 나타났지만, 출수기, 성숙기, 간장, 망장과 1수립수는 품종별 연차간 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 1). 본 연구에서 조사된 농업형질은 품종간에 차이가 있는 것으로 나타났고, 품종과 연차간 상호작용에서도 차이가 있는 것으로 나타났다. 분얼기 이후 출수기 까지 평균 온도와 강수량이 2012년이 2011년보다 1.6℃ 높았고 강수량도 39.2 mm 많았기 때문에 2012년에 재배된 품종의 출수기와 성숙기가 2011년에 재배된 품종에 비하여 1일 정도 빨랐으며, 간장과 망장도 2012년 재배 품종이 각각 7.16 cm와 0.13 cm 긴 것으로 나타났다(Table 2). 재생기에서 분얼기 동안에는 2011년이 2012년보다 0.9℃ 높았고 강수량도 47.8 mm 많았기 때문에 1수립수는 2011년이 32.85개로 2012년

Table 1. Effects of year, genotype and their interactions on agronomic characteristics of 31 Korean wheat cultivars.

Source of variation	df	Heading Date	Maturing Date	Culm Length	Spike Length	Awn Length	Number of spike/m ²	Number of grains/spike
Year (Y)	1	28561.00*** ^z	1407.69***	665.21***	2.66	4.62*	1.32	73.97***
Genotypes (G)	30	3039.80***	9178.78***	23.58***	12.10***	3.73***	8.80***	4.32***
Y × G	30	6786.60***	11523.20***	24.18***	11.45***	9.47***	14.43***	3.99***

^z*, ** and *** are significant at $P = 0.05$, $P = 0.01$ and $P = 0.001$, respectively.

Table 2. Agronomic characteristics of 31 Korean wheat cultivars grown in two years.

	Heading date (M. D)	Maturing date (M. D)	Culm length (cm)	Spike length (cm)	Awn length (cm)	No. spike/m ²	No. grain/spike
<i>Year</i>							
2011	5.03	6.06	73.38	7.10	4.49	852.03	32.85
2012	5.02	6.05	80.54	7.20	4.62	840.90	29.13
LSD ^z	0.00	0.00	0.54	0.12	0.12	19.21	0.85
<i>Cultivar</i>							
Alchan	5.05	6.11	70.70	6.63	4.55	883.31	35.95
Anbaek	5.05	6.11	79.11	8.22	5.18	699.89	33.00
Baekjoong	5.01	6.05	76.99	7.20	3.98	901.89	28.95
Cheonggye	5.04	6.07	69.32	6.59	4.00	890.22	33.25
Dahong	5.05	6.09	75.56	5.69	3.32	994.22	35.35
Dajoong	5.03	6.07	85.90	6.34	4.80	962.48	31.05
Eunpa	5.04	6.07	65.42	7.90	3.96	662.98	30.65
Geuru	5.06	6.09	72.47	6.39	5.74	658.70	32.80
Gobun	5.04	6.08	71.81	7.09	4.92	938.85	28.25
Goso	5.01	6.05	75.20	8.40	5.19	722.26	28.20
Hanbaek	5.03	6.07	89.85	8.24	5.12	798.17	28.35
Jeokjoong	5.02	6.05	80.13	6.54	4.28	905.59	26.10
Jinpoom	5.05	6.08	77.72	8.14	4.31	1003.74	32.30
Joeun	4.30	6.04	83.44	6.98	3.66	881.48	27.65
Jokyung	4.30	6.06	76.73	7.68	5.71	785.20	33.10
Jonong	4.30	6.04	74.52	7.14	4.13	820.37	24.90
Jopoom	4.26	6.04	74.19	6.54	4.58	864.87	24.25
Keumkang	5.02	6.05	77.20	6.76	4.75	803.76	28.95
Milsung	5.02	6.07	74.59	6.68	4.48	803.69	37.05
Namhae	5.03	6.07	72.25	7.74	4.15	749.96	32.90
Ol	5.05	6.07	77.83	6.73	5.12	843.04	33.70
Olgeuru	5.02	6.06	77.31	9.12	4.77	605.57	32.85
Saeol	4.27	6.04	66.59	6.55	4.35	1075.87	32.35
Seodun	5.04	6.07	76.80	7.79	4.07	890.87	30.40
Shinmichal	5.05	6.08	77.86	7.68	5.55	867.54	31.55
Shinmichal1	5.05	6.07	80.34	7.21	4.56	942.65	29.55
Suan	5.03	6.05	90.97	6.48	4.21	813.46	28.70
Sukang	5.04	6.07	84.28	6.75	4.48	788.89	31.25
Tapdong	5.05	6.06	70.93	7.10	4.89	1103.78	33.05
Uri	5.04	6.07	79.18	6.48	4.35	709.28	34.50
Younbaek	5.02	6.06	79.87	6.80	4.17	868.59	29.60
LSD	0.00	0.00	2.15	0.48	0.47	75.63	3.35

^zLeast significant difference ($P < 0.05$)

의 29.13개 보다 많았다. 조품밀과 새올밀이 다른 품종에 비하여 출수기와 성숙기가 가장 빨랐으며, 조은밀, 조농밀과 조경밀이 다음으로 빨랐다. 알찬밀, 안백밀, 다홍밀과 그루밀은 출수기와 성숙기가 평균에 비하여 출수기는 2~3일 늦었으며, 성숙기는 3일 이상 늦었다. 진품밀, 올밀, 신미찰밀, 신미찰1호와 탐동밀은 출수기는 평균에 비해 3일 늦었지만 성숙기는 1~2일 차이가 나는 것으로 나타났다. 간장은 은파밀, 새올밀과 청계밀이 70 cm 이하로 짧았으며, 최근에 육성된 다중밀, 한백밀과 수안밀은 85 cm 이상으로 긴 것으로 나타났다. 수장은 다홍밀이 5.69 cm로 가장 짧았으며, 진품밀, 안백밀, 한백밀, 고소밀과 올그루밀은 8.0 cm 이상으로 수장이 길었다. 국내 밀 품종은 모두 유망 품종으로, 다홍밀, 조은밀, 은파밀과 백중밀의 망장은 4.0 cm 이하로 짧았고, 올밀, 한백밀, 안백밀, 고소밀, 신미찰밀, 조경밀과 그루밀은 5.0 cm 이상으로 긴 망장을 지닌 것으로 나타났다. 올그루밀, 그루밀, 은파밀과 안백밀은 1 m²당 경수가 700개 이하로 적었으며, 진품밀, 새올밀과 탐동밀은 1 m²당 경수가 1,000개 이상으로 많았다. 1수립수는 조품밀과 조농밀이 25개 이하로 적었으며, 다홍밀, 알찬밀과 밀성밀은 35개 이상으로 많은 것으로 나타났다.

국내 밀 품종의 농업형질간 상관 관계(Table 3)을 조사한 결과, 출수기가 빠를수록 성숙기도 빠르기 때문에 국내 밀 품종에서 이들 간에는 정의 상관을 나타내었다($r = 0.776$, $P < 0.001$). 이러한 출수기와 성숙기가 늦을수록 1수립수가 증가하는 경향을 나타내어, 출수기와 성숙기는 1수립수와 정의 상관을 나타내었지만($r = 0.502$, $P < 0.01$ 과 $r = 0.631$, $P <$

0.001), 조사된 다른 농업형질과는 상관이 없는 것으로 나타났다. 간장과 망장은 다른 형질과 상관이 없는 것으로 나타났고, 1 m²당 경수는 수장과 부의 상관을 나타내어($r = -0.413$, $P < 0.05$) 1 m²당 경수가 많을수록 수장은 짧아지는 것으로 나타났다. Munck (1987)는 출수기가 늦은 품종이 빠른 품종에 비하여 종실이 덜 단단하고 밀도가 낮기 때문에 수발아 가능성이 높다고 하였다. 또한, Reddy et al. (1985)는 등숙 기간의 고온은 수발아율을 높인다고 하였다. 일반적으로 출수 후 이삭 목이 황색으로 변하는 생리적인 성숙기가 40~45일 인데 반하여, 국내 재배 환경에서는 출수기와 성숙기 사이의 기간이 평균 35일로 나타났다. 이러한 현상은 국내 밀 품종이 출수 이후 급격한 온도 상승으로 등숙 기간이 단축되는 것으로 생각할 수 있고 이러한 환경은 국내 밀 품종의 수발아 위험 요인으로 작용할 수 있다. King & Richard (1984)는 강우 시 휘어진 이삭은 직립 이삭에 비하여 25%이상 수분 흡수가 많고, 유망은 무망에 비하여 30%이상 수분 흡수량이 많다고 보고하였다. 또한, 이렇게 수분을 흡수한 이삭의 껍질을 벗기고 종자의 수분함량을 조사하였을 때 이삭의 각도와 망의 유무에 따른 수분함량은 2배 이상 차이가 나기 때문에 이삭의 특성과 망 유무는 수발아 발생과 밀접한 관련이 있다(King 1984). Zanetti et al. (2000)은 이삭 길이가 짧고 밀집 정도가 높은 것이 이삭이 길고 밀집 정도가 낮은 것에 비하여 수발에 취약하다고 하였다. 그러나 국내 품종에는 무망 품종이 없으며, 본 논문이나 국내 품종 육성에 있어 이삭의 각도에 대한 평가가 이루어지고 있지 않은데 이에 대한 연구가 필요하다.

Table 3. Correlation coefficients of agronomic characteristics and grain morphology of 31 Korean wheat cultivars.

Parameter	Heading date	Maturing date	Culm length	Spike length	Awn length	No. spike/m ²	No. grain/spike	Test weight	1,000-grain weight	Grain length	Grain width
Maturing date	0.776*** ^z										
Culm length	0.070	0.263									
Spike length	0.030	0.143	0.013								
Awn length	0.142	0.123	0.059	0.307							
No. spike/m ²	-0.070	-0.357*	-0.080	-0.413*	-0.284						
No. grain/spike	0.502**	0.631***	-0.272	-0.802	0.091	-0.037					
Test weight	-0.176	-0.142	-0.130	-0.115	0.150	-0.037	-0.010				
1,000-grain weight	-0.180	0.064	0.401*	0.284	0.363*	-0.428*	-0.429*	-0.073			
Grain length	-0.499**	-0.260	0.376*	0.066	0.421*	-0.190	-0.544*	0.050	0.793***		
Grain width	-0.039	0.156	0.251	0.392*	0.355*	-0.430*	-0.214	-0.079	0.884***	0.555**	
Grain thickness	-0.085	0.171	0.293	0.382*	0.281	-0.387*	-0.321	-0.050	0.862***	0.573**	0.942***

^zIndicates significance at * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

국내 밀 품종의 종실 특성

국내 밀 품종별 종실 특성의 연차간 변이에 있어서 리터중은 년차간, 품종간에 차이가 없는 것으로 나타났지만, 천립중과 종자의 길이, 폭과 두께는 품종별 연차간 차이가 있는 것으로 나타났다(Table 4). 품종과 년차간 상호작용에서도 조사된 종실 특성이 차이가 있는 것으로 나타났다. 출수기 이후 성숙기까지 2012년 기상이 평균 기온이 높고 강수량도 많아 리터중은 차이가 없었지만, 천립중과 종자의 길이, 폭과 두께는 2011년 수확된 종자 보다 높은 것으로 나타났다(Table 5). 품종간의 종실 특성을 비교한 결과, 서둔밀의 리터중은 689.67 g 이하로 국내 품종 중 제일 낮았고, 은파밀, 금강밀과 조은밀은 820 g 이상으로 높았다. 신미찰1호, 다홍밀, 밀성밀과 알찬밀은 천립중이 35 g 이하로 낮았고, 한백밀은 51.87 g으로 국내 품종 중에 제일 높았다. Halverson & Zeleny (1988)는 미국 밀의 평균 리터중은 754 g이고, 재배 환경에 따라 400~800 g의 범위를 보이고, 천립중은 경질밀의 경우 20~32 g범위이고, 연질밀은 30~40 g이며, 평균 천립중은 35 g 수준이라고 하였다. 국내 밀 품종의 평균 리터중과 천립중은 각각 775.33 g과 39.57 g으로 리터중은 비슷한 범위에 속하며, 천립중은 경질밀보다는 연질밀에 속하는 것으로 보인다. 개별 종자의 형태를 분석한 결과를 살펴보면, 종자의 길이는 다홍밀, 알찬밀, 밀성밀과 은파밀이 6.00 mm 이하로 짧았으며, 조정밀과 한백밀은 7.00 mm로 긴 것으로 나타났다. 종자의 폭은 신미찰 1호, 다중밀, 다홍밀과 밀성밀이 3.20 mm 이하로 좁은 것으로 나타났고, 백중밀, 그루밀, 금강밀, 조정밀, 안백밀과 한백밀은 3.50 mm이하로 넓은 것으로 나타났다. 종자의 두께는 다중밀, 신미찰1호, 새올밀과 다홍밀이 2.75 mm이하로 얇았으며, 금강밀, 적중밀, 백중밀, 조농밀, 조정밀과 한백밀은 3.00 mm이상으로 두꺼운 것으로 나타났다. 이러한 종실 특성은 제분율, 단백질 함량 및 밀가루 특성에 영향을 미치는 중요한 요인이며, 유전적인 요인 뿐만

아니라 환경적인 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다 (Halverson & Zeleny 1988).

국내 밀 품종의 종실 특성간 상관 관계(Table 3)을 조사한 결과, 리터중은 천립중이나 종자의 길이, 폭과 두께와 상관이 없는 것으로 나타났지만, 천립중은 종자 길이, 폭과 두께와 정의 상관을 보였으며($r = 0.793$, $P < 0.001$, $r = 0.884$, $P < 0.001$, $r = 0.862$, $P < 0.001$), 종자의 길이, 폭과 두께 간에도 정의 상관을 나타내었다. 종실 특성과 농업형질간의 상관 분석에서는, 리터중은 농업형질과 상관이 없었고, 천립중은 간장과 망장과는 정의 상관을 나타내었고($r = 0.401$, $P < 0.05$, $r = 0.363$, $P < 0.05$), 1 m²당 경수와 1수립수와는 부의 상관을 나타내었다($r = -0.428$, $P < 0.05$, $r = -0.429$, $P < 0.05$). 종자 길이는 간장과 망장과 정의 상관을 보였으며($r = 0.367$, $P < 0.05$, $r = 0.421$, $P < 0.05$) 1수립수와는 부의 상관을 보였다($r = -0.544$, $P < 0.05$). 종자의 폭은 수장과 망장과는 정의 상관을($r = 0.392$, $P < 0.05$, $r = 0.355$, $P < 0.05$), 1 m²당 경수와는 부의 상관을 보였다($r = -0.430$, $P < 0.05$). 종자의 두께는 수장과 1 m²당 경수에 대해서 각각 정의 상관과 부의 상관을 나타내었다($r = 0.382$, $P < 0.05$, $r = -0.387$, $P < 0.05$). 간장은 종실 무게와 정의 상관이 있고, 품종의 수량과도 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다 (Milach & Federizzi 2001, Hedden 2003). 밀의 간장은 단간유전자인 *Rht* (Reduced height) 유전자에 의해 조절되는데, 이들 유전자 중에 대표적인 *Rht1*과 *Rht2*를 지닌 중단간 품종은 다수성을 나타내며, 이들 유전자는 GA (Gibberellin) 활성을 낮추어 종자 발아와 상관 있는 α -amylase 활성을 낮추는 역할을 한다(Flintham et al. 1997). 최근에도 수량 증진과 수발아 관련된 *Rht* 유전자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 국내의 경우 도복이 수량에 미치는 영향 때문에 품종 및 계통 육성과정에서 도복에 대한 평가는 이루어지고 있지만 유전적인 평가는 없는 실정이다. 앞으로 국내 밀 품종 및

Table 4. Effects of year, genotype and their interactions on grain weight and morphological characters, pre-harvest sprouting percentage induced by mist spray and germination index of 31 Korean wheat cultivars.

Source of variation	df	Test weight	1,000-grain weight	Grain Morphology			Pre-harvest Sprout (%)	Germination Index
				Length	Width	Thickness		
Year (Y)	1	0.04	4597.91*** ^z	13271.30***	1311.74***	799.11***	2915.90***	577.05***
Genotypes (G)	30	1.40	534.77***	613.49***	516.89***	199.23***	311.25***	254.92***
Y × G	30	1.78*	629.49***	891.29***	316.78***	107.66***	284.02***	233.72***

^z*, ** and *** are significant at $P = 0.05$, $P = 0.01$ and $P = 0.001$, respectively

Table 5. Grain weight, morphological characters for grain, pre-harvest sprouting (PHS-MS) and germination index (GI) of 31 Korean wheat cultivars grown in two years.

	Test weight (g)	1,000 grain weight (g)	Grain Morphology				PHS-MS (%)	GI
			Color	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)		
<i>Year</i>								
2011	797.58	39.05	-	6.28	3.35	2.86	12.67	0.21
2012	799.12	42.49	-	6.65	3.42	2.93	30.45	0.30
LSD ^z	15.57	0.10	-	0.01	0.01	0.01	0.65	0.01
<i>Cultivar</i>								
Alchan	792.67	34.07	Red	5.87	3.31	2.82	2.19	0.05
Anbaek	800.33	46.15	Red	6.47	3.67	2.98	22.78	0.11
Baekjoong	783.67	44.68	White	6.71	3.51	3.00	42.13	0.55
Cheonggye	807.17	35.73	Red	6.06	3.25	2.78	3.57	0.08
Dahong	786.33	33.35	Red	5.85	3.16	2.76	1.92	0.08
Dajoong	793.83	37.04	Red	6.63	3.13	2.71	6.96	0.14
Eunpa	820.00	38.39	Red	5.96	3.32	2.86	17.43	0.29
Geuru	810.00	46.76	Red	6.91	3.53	2.99	25.82	0.29
Gobun	808.33	38.41	Red	6.40	3.27	2.86	18.25	0.16
Goso	801.67	43.40	Red	6.48	3.38	2.92	2.63	0.03
Hanbaek	782.50	51.87	White	7.28	3.68	3.19	81.72	0.87
Jeokjoong	777.33	46.73	White	6.81	3.48	3.00	48.42	0.58
Jinpoom	808.17	38.93	Red	6.20	3.34	2.84	4.46	0.14
Joeun	837.67	37.81	Red	6.27	3.36	2.94	15.12	0.40
Jokyoung	800.00	47.94	White	7.06	3.61	3.06	80.13	0.48
Jonong	793.17	45.37	Red	6.93	3.49	3.03	12.90	0.08
Jopoom	815.67	39.10	Red	6.92	3.27	2.78	15.80	0.14
Keumkang	831.83	47.41	White	6.77	3.54	3.00	37.64	0.36
Milsung	813.33	34.02	Red	5.96	3.20	2.79	3.44	0.05
Namhae	779.67	38.49	Red	6.11	3.44	2.94	3.62	0.13
Ol	794.00	40.80	Red	6.24	3.44	2.91	2.74	0.73
Olgeuru	806.50	42.63	Red	6.55	3.44	2.95	17.58	0.26
Saeol	813.00	36.89	Red	6.79	3.23	2.75	9.84	0.10
Seodun	689.67	39.17	Red	6.11	3.35	2.84	42.26	0.46
Shinmichal	800.17	36.43	Red	6.46	3.27	2.81	26.41	0.36
Shinmichall	807.00	33.27	Red	6.14	3.10	2.72	30.99	0.19
Suan	807.83	46.73	Red	6.68	3.44	2.90	1.14	0.04
Sukang	795.83	39.59	Red	6.42	3.45	2.96	1.75	0.04
Tapdong	818.67	37.71	Red	6.13	3.41	2.92	6.19	0.06
Uri	791.67	39.27	Red	6.56	3.24	2.77	1.42	0.06
Younbaek	781.17	45.68	White	6.74	3.49	2.99	81.13	0.63
LSD	61.28	0.40	-	0.02	0.02	0.02	2.55	0.03

^zLeast significant difference ($P < 0.05$)

Fig. 1. The differences in 1,000-grain weight (A), grain length (B), grain width (C), grain thickness (D), pre-harvest sprouting percentage induced by mist (E) and germination index (F) of Korean wheat cultivars according to the grain color. Each bar represents mean $\pm$ standard error and values on the bars with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

계통에 대한 *Rht* 유전자가 국내 환경에서 수량증진에 미치는 영향뿐만 아니라 수발아 관련 연구가 진행되어야 할 것이다.

국내 밀 품종 중에서 금강밀, 백중밀, 적중밀, 연백밀, 조정밀과 한백밀은 백립계이며, 나머지 25 품종은 적립계인데, 이러한 종피색은 수발아율과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Flintham et al. 1999, Mori et al. 2005, Mares et al. 2005). 국내 품종을 조사한 결과에서도 백립계 품종은 적립계 품종에 비하여 수발아율이 높은 것으로 나타났다(Kim et al. 2012). 본 연구에서는 종피색과 농업형질 및 종실 특성과의 상관 관계를 분석한 결과(Fig. 1.), 농업형질은 종피색과 상관성이 없었지만, 종실 특성은 종피색에 따라 다른 양상을 나타내는 것을 확인하였다. 리터중은 종피색에 상관성이 없었지만, 백립계 품종의 천립중(47.39 g, Fig. 1-A), 종자 길이(6.90 mm, Fig. 1-B), 종자 폭(3.55 mm, Fig. 1-C)과 종자 두께(3.04 mm, Fig. 1-D)는 적립계 품종에 비하여 높은 것으로 나타났다(39.18 g, 6.36 mm, 3.34 mm, 2.86 mm). 국내 품종에서 백립계과 적립계의 종실 특성이 차이가 나는 이유는 백립계 밀 품종 육성의 교배모본으로 금강밀이 많이 이용되었기 때문인 것으로 생각된다. 1997년에 육성된 금강밀의 경우 중단간이면서 제분율이 높고 가공적성이 양호하여 국내

에서 가장 많이 재배되는 품종인데(Song et al. 1997), 2000년 이후 가공적성 향상의 중요성 때문에 육종 모재로 금강밀이 많이 이용되면서 이후에 육성된 백립계 품종이 금강밀의 종실 특성을 나타낸 것으로 생각된다. 이러한 영향으로 백립계 품종은 제분율이 양호하고 가공적성이 좋지만 금강밀이 지닌 수발아 감수성 특성을 동시에 나타낸다. 높은 제분율과 가공제품의 선택 때문에 백립계 품종의 선호도가 많지만 앞으로 품종 육성에 있어서는 금강밀이 지닌 단점을 보완할 수 있는 육종 모재 선발과 계통의 선발에 있어서 다양성을 확보해야 할 것이다.

국내 밀 품종의 수발아 특성

모래물이법으로 측정한 국내 밀 품종의 수발아율과 종자 휴면성과 상관 있는 GI (Germination Index)는 품종간, 년차간 및 품종과 년차간 상호작용 모두 영향을 받는 것으로 나타났다(Table 4). 2009년과 2010년에 수확한 국내 품종의 실험에서는 GI가 년차간 변이가 없는 것으로 나타났지만 본 연구에서는 년차간 영향을 받는 것으로 나타났다(Kim et al. 2012). 이러한 차이는 2009년과 2010년의 기상은 큰 차이가 없었지만, 2011년과 2012년은 년차간 평균기온과 강수량의

차이가 크기 때문에 영향을 받은 것으로 보인다. 2012년의 등숙기 고온으로 수발아율과 GI (30.45%, 0.30)은 2011년에 비하여 높게 나타났다(12.67%, 0.21). 수발아율은 GI와 정의 상관관계를 나타내었는데($r = 0.770$, $P < 0.001$, Fig. 2), 이는 국

Fig. 2. Relationship between pre-harvest sprouting percentage induced by mist and germination index in 31 Korean wheat cultivars with red grain color (●) and white grain color (○).

내 밀 품종을 이용한 이전의 결과와 일치한다(Kim et al. 2012). 백립계 밀 품종은 수발아율이 37.64%이상으로 높았으며, GI도 0.36이상으로 높았다. 적립계 품종에서는 서둔밀의 수발아율이 42.26%로 높았으며, 신미찰밀은 GI가 0.36으로 높았다. 수안밀, 우리밀, 수강밀, 다홍밀, 알찬밀, 고소밀과 올밀은 수발아율이 3.0%이하로 수발아에 저항성인 것으로 생각되며, 고소밀, 수강밀, 수안밀, 밀성밀과 알찬밀은 GI가 0.05이하로 휴면성이 강한 품종으로 생각된다. 수안밀, 수강밀, 알찬밀과 고소밀은 수발아 저항성이면서 휴면성이 강한 품종으로, 국내 밀 육종 프로그램에서 수발아 저항성 육성 모재로 이용할 수 있을 것이다.

수발아율과 GI는 농업형질과는 상관관계가 없는 것으로 나타났지만, 천립중, 종자의 길이 폭과 두께는 정의 상관관계를 나타내었다(Fig. 3). 이러한 결과는 종실의 크기나 무게가 증가할수록 수발아 위험성이 국내에서도 높다는 것을 의미한다. 인위적으로 발생시킨 수발아와 자연 발생시킨 수발아 종자 모두 Falling Number 값이 급격히 떨어지는 것으로 나타나며, Falling Number 값을 수발아 밀을 선발하는데 적용을 하고 있다(Trethowan et al. 1996). 또한, 같은 품종 내에서도 종자 크기가 작은 종자의 Falling number값이 큰 종자의 Falling

Fig. 3. Relationship between 1,000-grain weight (A), grain length (B), grain width (C), grain thickness (D) and pre-harvest sprouting percentage induced by mist, and 1,000-grain weight (E), grain length (F), grain width (G), grain thickness (H) and germination index in 31 Korean wheat cultivars with red grain color (●) and white grain color (○).

number값 보다 높은 경향을 나타낸다(Evers et al. 1995). 국내에서 주로 재배되는 금강밀을 포함한 주요 품종은 현재 수발아 위험성이 상존하기 때문에 수발아 저항성을 지닌 품종 개발은 반드시 이루어져야 하는데, 이를 위해서는 다수성 적립계 이면서 천립중이나 종실의 형태가 적은 계통 위주로 선발이 이루어져야 할 것이다.

적 요

국내 밀 재배 환경에서 수발아 저항성 밀 품종 육성의 기초 자료를 제공하기 위하여 금강밀 등 31 품종을 이용하여 2년 동안 조사한 농업 형질과 종자 특성이 수발아율 및 GI에 미치는 영향을 평가하였다. 농업형질은 출수기, 성숙기, 간장, 수장, 망장, 경수와 1수립수를 조사하였고, 종자 특성으로는 리터중, 천립중, 종자의 길이, 폭과 두께를 측정하였다. 수발아 관련 특성으로는 모래문이법을 이용한 수발아율과 종자 휴면성과 상관 있는 GI를 조사하였다. 수장과 경수는 년차간 변이가 없었으며, 리터중은 년차간 및 품종간 차이가 없었고, 이외 나머지 농업형질과 종자 특성 및 수발아율은 년차간, 품종간 및 품종과 년차간 상호작용에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 농업형질은 수발아 특성과 상관성이 없었지만, 출수기와 성숙기는 1수립수 및 종자 길이와 상관을 나타냈으며, 천립중과 종자 길이는 간장과 망장과는 정의 상관을 1수립수와는 부의 상관을 나타내었다. 수장과 경수는 종자 폭 및 두께와 상관을 보였다. 천립중은 수발아율 및 GI와 정의 상관을 나타내었으며($r = 0.618$, $P < 0.001$, $r = 0.525$, $P < 0.01$), 종자의 길이, 폭과 두께 역시 수발아율 및 GI와 정의 상관을 나타내었다. 백립계 품종은 적립계 품종에 비하여 리터중을 제외한 모든 특성에서 높은 값을 나타내었으며, 수발아율과 GI 값도 높게 나타났다. 적립계 품종인 수안밀, 수강밀, 알찬밀과 고소밀은 수발아 저항성이면서 휴면성이 강한 품종으로, 국내 밀 육종 프로그램에서 수발아 저항성 육성 모재로 이용할 수 있을 것이다. 국내 밀 품종의 수발아 저항성 증진을 위한 계통 선발에서 종피색과 종실의 무게와 크기도 고려해야 한다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 아젠다 과제 PJ008392 의 지원에 의해 이루어진 연구결과의 일부임.

References

1. Auld AS, Paulsen GM. 2003. Effects of drought and high temperature during maturation on preharvest sprouting of hard white winter wheat. *Cereal Res. Commun.* 31: 169-176.
2. Barnard A, van Deventer CS, Maartens H. 2005. Genetic variability of preharvest sprouting-the South African situation. *Euphytica* 143: 291-296.
3. Bayer AC. 1987. Pre-harvest sprouting. *Annu. Wheat Newsl.* 33: 40.
4. Chang C, Feng JM, Si HQ, Yin B, Zhang HP, Ma CX. 2010. Validating a novel allele of *viviparous-1(Vp-B1f)* associated with high seed dormancy of Chinese wheat landrace, Wanixianbaimaizi. *Mol. Breeding* 25: 517-525.
5. DePauw R, Clarke FR, Fofana B, Knox R, Humphreys G, Cloutier S. 2009. RL4137 contributes preharvest sprouting resistance to Canadian wheats. *Euphytica* 168: 347-361.
6. Edwards RA, Ross AS, Mares DJ, Ellison FW, Tomlinson JD. 1989. Enzymes from rain-damaged and laboratory-germinated wheat. I. Effects on products quality. *J. Cereal Sci.* 10: 157-167.
7. Evers AD, Flinham J, Kotecha K. 1995. Alpha-amylase and grain size in wheat. *J. Cereal Sci.* 21: 1-3.
8. Finch-Savage WE, Leubner-Metzger G. 2006. Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist* 171: 501-523.
9. Flinham J, Adlam RE, Gale MD. 1999. Seedcoat and embryo dormancy in wheat. In: Weipert D (ed) Eighth international symposium on preharvest sprouting in cereals 1998'. Association of Cereal Science Research Federal Centre for Cereal Potato and Lipid Research, Detmold, Germany. pp.77-81.
10. Flinham JE, Angus WJ, Gale MD. 1997. Heterosis, overdominance for grain yield, and alpha-amylase activity in F₁ hybrids between near-isogenic Rht dwarf and tall wheats. *J. Agric. Sci.* 129: 371-378.
11. Fofana B, Humphreys DG, Rasul G, Cloutier S, Brûlé-Babel A, Woods S, Lukow OM, Somers DJ. 2009. Mapping quantitative trait loci controlling pre-harvest sprouting resistance in a red × white seeded spring wheat cross. *Euphytica* 165: 509-521.
12. Gale MD, Salter AM, Lenton JR. 1987. The induction of germination α-amylase during wheat grain development in unfavourable conditions. In: D.J. Mares (Ed.), *Proceedings*

- of the Fourth International Symposium on Pre-Harvest Sprouting in Cereals. Westview Press, Boulder, Co., USA. pp.273-282.
13. Grunberg AM, Costa JM, Kratochvil RJ. 2002. Pre-harvest sprouting in soft red winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in the US mid-Atlantic. *Cereal Res. Commun.* 30: 95-102.
 14. Halverson J, Zeleny L. 1988. Criteria of wheat quality. pp 15-45: in Y. Pomeranz ed. *Wheat: chemistry and technology*. American Association of Cereal Chemists, ST. Paul, MN. USA.
 15. Hatcher DW, Symons DW. 2000. Influence of sprout damage on oriental noodle appearance as assessed by image analysis. *Cereal Chem.* 77: 380-387.
 16. Hedden P. 2003. The genes of the green revolution. *Trends Genet.* 19: 5-9.
 17. Himi E, Mares D, Yanagawa A, Noda K. 2002. Effect of grain colour gene (*R*) on grain dormancy and sensitivity of the embryo to abscisic acid (ABA) in wheat. *J. Exp. Bot.* 53: 1569-1574.
 18. Kim KH, Kang CS, Park JC, Shin SH, Hyun JN, Park CS. 2012. Evaluation of pre-harvest sprouting in Korean wheat cultivar. *Korean J. Breed. Sci.* 44: 526-537.
 19. King RW, Richards RA. 1984. Water uptake in relation to pre-harvest sprouting damage in wheat: ear characteristics. *Aust. J. Agric. Research* 35: 327-336.
 20. King RW, Wettstein-Knowles PV. 2000. Epicuticular waxes and regulation of ear wetting and pre-harvest sprouting in barley and wheat. *Euphytica* 112: 157-166.
 21. King RW. 1984. Water uptake in relation to pre-harvest sprouting damage in wheat: grain characteristics. *Aust. J. Agric. Research* 35: 337-345.
 22. Lee CK, Nam JH, Kang MS, Ku BC, Kim JC, Park KG, Park MW, Kim YH. 2002. Current wheat quality criteria and inspection systems of major wheat producing countries. *Korean J. Crop Sci.* 47: 63-94.
 23. Lenton J. 2001. Opportunities for the manipulation of development of temperate cereals. *Adv. Bot. Res.* 52: 127-164.
 24. Lunn GD, Major BJ, Kettlewell PS, Scott RK. 2001. Mechanisms leading to excess alpha-amylase activity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grain in UK. *J. Cereal Sci.* 33: 313-329.
 25. Mares D, Mrva K, Cheong J, Williams K, Watson B, Storlie E, Sutherland M, Zou Y. 2005. A QTL located on chromosome 4A associated with dormancy in white- and red-grained wheats of diverse origin. *Theor. Appl. Genet.* 111: 1357-1364.
 26. Mares DJ, Mrva K, Fincher GB. 2004. Enzyme activities. pp 357-365 in: *Encyclopedia of Grain Science*. Wrigley C, Corke H, Walker CE eds. Elsevier Academic Press. Oxford. UK.
 27. Mares DJ. 1987. Pre-harvest sprouting tolerance in white grained wheat. pp 64-74 in: *Fourth international symposium on preharvest sprouting in cereals*. Mares DJ ed. Westview Press. Boulder. USA.
 28. Mares DJ. 1993. Pre-harvest sprouting in wheat. I. Influence of cultivar, rainfall and temperature during grain ripening. *Aust. J. Agric. Res.* 44: 1259-1272.
 29. Martin C, Herrman TJ, Loughin T, Oentong S. 1998. Micropycnometer measurement of single kernel density of healthy, sprouted, and scab damaged wheats. *Cereal Chem.* 75: 177-180.
 30. Milach SCK, Federizzi LC. 2001. Dwarfing genes in plant improvement. *Adv. Agron.* 73: 35-63.
 31. Mori M, Uchino N, Chono M, Kato K, Miura H. 2005. Mapping QTLs for grain dormancy on wheat chromosome 3A and the group 4 chromosomes, and their combined effect. *Theor. Appl. Genet.* 110: 1315-1323.
 32. Munck L. 1987. The control of pre-harvest sprouting in cereals for seed, malting, and milling. pp 176-187 in: *Fourth international symposium on preharvest sprouting in cereals*. Mares DJ ed. Westview Press. Boulder. USA.
 33. Munkvold JD, Tanaka J, Benscher D, Sorrells M. 2009. Mapping quantitative trait loci preharvest sprouting resistance in white wheat. *Theor. Appl. Genet.* 119: 1223-1235.
 34. Neethirajan S, Jayas DS, White NDG. 2007. Detection of sprout wheat kernel using soft X-ray image analysis. *J. Food Eng.* 81: 509-513.
 35. Posner E. 2009. Wheat flour milling. pp 119-152 in: *Wheat Chemistry and Technology*. 4th Ed K Khan and PR Shewry, eds. Am. Assoc. Cereal Chem.: St. Paul, MN.
 36. Rasul G, Humpherys DG, Brûlé-Babel A, McCartney CA, Knox RE, DePauw RM, Somers DJ. 2009. Mapping QTLs for pre-harvest sprouting traits in the spring wheat cross 'RL4452/AC Domain'. *Euphytica* 168: 363-378.
 37. Reddy LV, Metzger RJ, Ching TM. 1985. Effect of temperature on seed dormancy of wheat. *Crop Sci.* 25: 455-259.
 38. Rural Development Administration (RDA). 2003. *Agricultural*

- Research Standard. pp.271-309.
39. Singh R, Matus-Cádiz M, Bâga M, Hucl P, Chibbar RN. 2010. Identification of genomic regions associated with seed dormancy in white-grained wheat. *Euphytica* 174: 391-408.
40. Skerritt JH, Heywood RH. 2000. A Five-minute field test for on-farm detection of pre-harvest sprouting in wheat. *Crop Sci.* 40: 742-756.
41. Song HS, Nam JH, Park HH, Heo HY, Park MW. 1997. A new high milling, early maturing and white grain with good bread quality wheat variety "Keumkangmil". *Korean J. Breed. Sci.* 29: 500.
42. Torada A, Amano Y. 2002. Effect of seed coat color on seed dormancy in different environments. *Euphytica* 126: 99-105.
43. Trethowan RM, Rajaram S, Ellison FW. 1996. Pre-harvest sprouting tolerance of wheat in the field and under rain simulation. *Aust. J. Agric. Research* 47: 705-716.
44. Walker-Simmons M, Sesings J. 1990. Temperature effects on embryonic abscisic acid level during development of wheat grain dormancy. *J. Plant. Growth Regul.* 9: 51-56.
45. Walker-Simmons M. 1987. ABA levels and sensitivity in developing wheat embryos of sprouting resistant and susceptible cultivars. *Plant Physiology* 84: 61-66.
46. Xia LQ, Ganai MW, Shewry PR, He ZH, Yang Y, Röder MS. 2008. Exploiting the diversity of Viviparous-1 gene associated with pre-harvest sprouting tolerance in European wheat varieties. *Euphytica* 159: 411-417.
47. Xia LQ, Yang Y, Ma YZ, Chen XM, He ZH, Röder MS, Jones HD, Shewry PR. 2009. What can the Viviparous-1 gene tell us about wheat pre-harvest sprouting? *Euphytica* 168: 385-394.
48. Yang Y, Zhao XL, Xia LQ, Chen XM, Xia XC, Yu Z, He ZH, Röder M. 2007. Development and validation of a Viviparous-1 STS marker for pre-harvest sprouting tolerance in Chinese wheats. *Theor. Appl. Genet.* 115: 971-980.
49. Zanetti S, Winzeler M, Keller M, Messmer M. 2000. Genetic analysis of pre-harvest sprouting resistance in a wheat spelt cross. *Crop Sci.* 40: 1460-1417.