세대단축을 위한 장일처리 시 국내 밀 품종의 출수 및 생육 특성

차진경 · 이종희 · 이소명 · 고종민 · 신동진*

농촌진흥청 국립식량과학원 남부작물부

Heading Date and Growth Character of Korean Wheat Cultivars by Controlling Photoperiod for Rapid Generation Advancement

Jin-Kyung Cha, Jong-Hee Lee, So-Myeong Lee, Jong-Min Ko, and Dongjin Shin*

Department of Southern Area Crop Science, National Institute of Crop Science, RDA, Miryang, 50424, Republic of Korea

Abstract A speed-breeding system using photoperiod characteristics has recently been developed to reduce the entire growth period in wheat. In this study, the entire growth period of four Korean varieties was examined to investigate whether this speed-breeding system would be beneficial for our wheat breeding program. When four varieties were cultivated under a 22-hour light/2-hour dark cycle in a glasshouse, the number of days to heading of Jokyoung and Baekgang was 44 and 43, respectively, and the number for Keumgang and Joongmo2008 was more than 75. Around twelve seeds per plant were obtained from Jokyoung and Baekgang, and the seeds of these varieties completely germinated when harvested at 20 days after heading. These results suggest that this speed-breeding system can be a reliable method of reducing the growth period in Korean wheat breeding.

Keywords wheat, breeding, speed breeding, single seed descent

Received on October 22, 2019. Revised on November 6, 2019. Accepted on November 6, 2019.

* Corresponding Author (E-mail: jacob1223@korea.kr, Tel: +82-55-350-1185, Fax: +82-55-352-3059)

서 언

국내 밀의 1인당 연간 소비량은 2017년 기준으로 32.4 kg이며, 쌀 다음으로 소비가 많은 제 2의 주곡이다. 하지만 밀 수입 자유화와 수매제도 폐지 이후 생산 기반이 급격히 약화되었고(Lee et al. 1997), 지난 5년간의 평균 밀 자급률은 1.3%로 매우 저조한 상황이다. 따라서 국내 밀 산업은 기후변화 등으로 인한 세계 밀 생산량 감소와 가격 상승 등의 외부 요인에 매우 민감하게 반응할 수밖에 없다. 최근 정부는 밀 자급률 향상을 위해 2022년까지 목표 자급률을 9.9%로 설정하였으며, 정책적 대안으로 밀 산업 육성법을 제정하였다. 밀 자급률 향상을 위한 정부정책에 보조를 맞추기 위해 가장 시급한 것은 가공 특성이 우수한 고품질의 밀 품종을 육성하는 것이다.

계통육종법은 신품종 개발에 가장 크게 기여한 육종방법이지만, 신품종을 육성하는 데 긴 시간을 필요로 한다는 단점이 있다. 국내에서 개발된 밀 품종은 대부분 계통육종법으로 육성되었으며, 평균 육성 기간은 약 12년 정도이고, 선발된 계통을 고정하는 데만 최소 5~6년이 소요되었다. 이는 밀의 염색체 크기가 17Gb

로 매우 크기 때문이며(Uauy 2017), 미국에서는 품종의 유전적 고정도를 높이기 위해 F₁₂세대까지 계통육종법으로 전개하기도 한다. 사회적·경제적 발전과 더불어 소비자의 요구는 다양해지고 있고, 소비 트렌드 역시 급변하고 있지만 신품종 개발은 이에 발맞추어 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 식량작물 육종에서도 소비자 요구에 맞는 신품종을 개발하고 보급하기 위해서는 육종 연한을 단축시키는 것이 중요하다.

다양한 작물에서 육종 연한 단축을 위한 세대단축 방법에 대한 연구가 있으며, 밀에서는 주로 약배양법과 왕복육종법(shuttle breeding)이 활용되었다. 약배양법은 반수체인 밀 소포자의 염색체를 배가하여 정상 식물체로 재분화 하는 방법으로, 재분화된 식물체는 당대에 바로 유전적으로 고정되기 때문에 육종 연한을 크게 단축할 수 있다는 장점이 있지만, 조직배양을 수행해야하는 등 재분화 과정이 복잡하고, 효율이 낮다는 단점이 있다(Niroula & Bimb 2009). 왕복육종법은 1년에 2세대를 전개할 수 있는 방법으로, 위도 및 고도에 따른 기후 차이를 이용해 세대를 전개하면서 동시에 자연 선발의 효과를 볼 수 있는 방법이다(Reynolds & Borlaug 2006). 국내에서도 왕복육종법의 하나

로 여름철 기온이 낮은 대관령에 하파하여 연 2회 재배한 보고와 (Cho et al. 1978), 수원 지역에서 7월 상순에 이식할 경우 재배가 가능하였으나 여름철 온도가 32°C 이상일 경우에는 재배가 불가능하였다(Seong et al. 1980)는 보고가 있었다.

최아 종자를 생장점 및 종자 상부에 복토를 하지 않은 채 파종하여 8°C 저온에서 Vitalux-A를 식물체 20 cm 정도 위에서 24시간 연속조명하는 춘화처리방법인 종자녹체춘화처리법이 종자춘화 및 녹체춘화 처리와 비교해 지엽전개일수 단축에 가장 효과가 높았다(Mukade et al. 1973). 종자녹체춘화처리법으로 맥류를 온냉조절온실에서 재배할 경우 연간 4.5-6세대의 재배가 가능하였다(Mukade 1973, Cho et al. 1976). 이후 종자녹체춘화법을 활용한 복토처리방법, 시비량 및 춘화처리 후 이식 방법 등에 관한 연구가 진행되었으며(Shin & Mukade 1983), 교배 후대 집단을 이용한 온실 재배(F₁, F₃, F₄, F₅) 및 노지재배(F₂)를 병행하는 실증시험을 통해 2년에 5세대를 전개하는 세대단축법이 제안된 바 있다(Shin 1987). 그러나, 종자녹체춘화처리법은 실용적으로 육종 현장에 활용되지는 못하였다.

최근 장일식물인 밀의 특성을 이용하여 장일 처리를 통한 봄밀의 출수기 단축 및 건조, 저온 처리를 통한 미성숙 종자의 휴면 타파로 1년에 6세대까지 전개할 수 있는 스피드육종법이 제안되었다. 장일 처리에 의한 밀 세대 촉진 방법은 온실의 명조건 22°C에서 22시간 LED조명을 처리하고, 암조건 17°C에서 2시간을 소등하여 일장과 온도를 조절하는 방법이다. 스피드육종법은 밀 뿐만 아니라 트리티케일, 병아리콩 등 다양한 작물에서도 활용 가능하다(Hicky et al. 2019). 본 연구에서는 Ghosh et al. (2018)과 Watson et al. (2018)이 제안한 일장 처리 중심의 스피드 육종법을 활용하여 국내 기상 환경 조건에서의 밀 세대 단축 가능성을 검토하였다.

재료 및 방법

공시 재료 및 재배 조건

본 시험은 2018년 11월부터 2019년 2월까지 밀양(N35°50')에 위치한 국립식량과학원 남부작물부의 유리 온실에서 수행되었다. 국립식량과학원에서 육성된 밀 품종인 금강, 백강, 조경과 중모2008을 시험 재료로 사용하였다. 각 품종의 종자를 상온에서 48시간 침종한 후 72구 육묘 상자(34cc/구)에 구당 1립씩 파종하였다. 토양은 수도용 상토(Punong, Gyeongju, Korea)와 원예용 상토(Seoul Bio, Eumseong, Korea)를 7:3 비율로 혼합하여 사용하였다.

일장 조절

생육기간 단축을 위한 일장 처리 시간은 Watson et al. (2018)의 조건과 동일하게 명조건 22시간/암조건 2시간으로 설정하여 파종부터 수확기까지 일장을 조절하였다. 명조건은 낮에는 자연광을 최대한 활용하고, 야간에는 형광등을 이용하여 18시~03시, 05시~08시까지 인공조명으로 일장을 조절하였다. 2시간의 암조건은 03~05시까지 형광등을 소등하여 온실 외부로부터 인공적인 빛의 방해를 최소화하도록 설정하였다(Fig. 1). 형광등은 육묘상자가 놓인 받침대로부터 660±10 lx의 조도로 설정되었다. 온실의 온도 조절은 Watson et al. (2018)은 명/암조건에 따라 22°C/17°C로 변온 처리를 하였으나, 본 연구에서는 변온 조절을 위한 냉방시설 설치 및 운영에 따른 경제적 비용을 줄이고자, Shin (1987)의 방법에 따라 겨울철에만 온실 내 최저 온도를 25°C로 설정하여 실험을 수행하였다.

생육 조사

생육조사는 농촌진흥청 연구조사분석기준(RDA 2012)에 따라 수행하였으며, 출수 일수는 파종 후 각 품종 처리구의 이삭이 40% 이상 출수된 날까지의 소요 일수로 계산하였다. 간장과 수장은 출수 후 25일에 각 10개체씩 조사하였다. 간장은 지상에서 이삭목까지의 길이를 조사하였고, 수장은 간장 조사 식물체의 이삭목부터 이삭망을 제외한 이삭 끝까지의 길이를 측정하였다. 수수는 식물체에서 이삭이 달린 분얼의 수를 조사하였고, 1수립수는 하나의 이삭에 달린 종자 수를 조사하였으며, 임실률은 전체 영화수에 대한 전체 종자 수의 비율을 측정하였다.

Fig. 1. Photoperiod of modified-speed breeding system.

발아율 검정

출수기 이후 14일, 17일, 20일에 각각 이삭을 수확하여 35°C에서 3일간 건조하였다. 발아율 검정을 위하여 건조시킨 종자를 25°C, 상대습도 95% 이상 조건에서 1일간 침종하였다. 침종 후 종자를 4°C, 암 조건에서 3일간 저온 처리 하였다. 발아율은 저온 처리한 종자를 25°C, 상대습도 95% 이상에서 8일간 발아시킨 후 초엽이 발생한 종자를 계수하였다.

통계 분석

통계 분석은 던컨다중검정(Duncan's multiple test)을 이용하여 $\alpha=0.05$ 유의성 수준에서 검정하였고, SAS 9.2 (SAS Institute Inc., Cray, NC, USA) 프로그램을 사용하였다.

결과 및 고찰

국내 품종의 출수 및 생육 특성

장일처리에 따른 국내 육성 품종의 세대 단축 가능성 검토를 위해 금강, 백강, 조경과 중모2008의 출수 특성을 분석하였다 (Fig. 2). 파성이 II로 낮은 조경과 백강의 출수 소요 일수는 각각 44일과 43일이었으며, 파성이 III으로 높은 금강과 중모

2008은 출수 소요 일수가 각각 86일과 75일이었다(Table 1). 이러한 결과는 스피드 육종방법에서 보고된 파종부터 개화까지의 소요 일수가 봄밀 품종은 약 47일, 겨울밀 품종은 약 105일인 결과와 비슷하였다(Ghosh et al. 2018). 파성이 낮은 품종은 세대단축이 가능한 것으로 판단되었으나 파성이 높은 품종은 장일 처리만으로는 출수기 단축이 어려운 것으로 판단되었다. 간장은 금강, 백강, 조경과 중모2008이 각각 52 cm, 45 cm, 43 cm과 57 cm로 장일조건에서 일반적인 노지재배보다 약 3~30 cm 정도 작았다. 수수는 품종에 상관없이 한 개의 유효분얼만을 가졌으며, 일수립수는 출수가 빨랐던 조경, 백강이 각각 11.9개와 12.5개였으며, 금강과 중모2008은 3.5개이하로 파성이 영향을 미치는 것으로 나타났다. 임실률도 조경과 백강은 각각 34.0%과 35.4%였으나, 금강과 중모2008은 15.9%이하로 낮았다. 파성이 높은 금강과 중모2008은 출수 지연에 따른 분얼 증가 등 지속적인 영양생장으로 육묘상자 내 생육 환경이 불량해지고, 곰팡이 병 등 병해충 발생이 증가하여 불임률이 높아진 것으로 판단된다.

파성이 낮은 조경과 백강은 1개체 1계통법(SSD, single seed descent method)을 활용한 세대 진전을 위한 충분한 종자 양이 확보되었기 때문에 72구 육묘상자를 활용한 장일조건에서 세대 단축이 충분히 가능할 것이다. 반면, 파성이 높은 금강과 중모

Fig. 2. Comparison of days to heading according to cultivars in 22-hour photoperiod. (55days after seeding) A. Jokyoung, B. Baekgang, C. Keumgang, D. Joongmo2008.

Table 1. Agronomic characters of four Korean wheat varieties in 22-hour photoperiod.

Cultivar	Days to heading	Culm length (cm)	Spike length (cm)	No. of spikes/plant	No. of grains/spike	Fertility rate (%)
Baekgang	43.0±2.0c ²	45.1±4.3c	5.6±0.5a	1.1±0.3a	12.5±2.4a	35.4±7.4a
Keumgang	86.0±1.0a	52.1±5.2b	4.9±0.4bc	1.0±0.0a	3.3±2.2b	4.0±5.2b
Jokyoung	43.5±0.5c	42.5±5.2c	5.1±0.6b	1.3±0.4a	11.9±5.1a	34.0±16.0a
Joongmo2008	74.5±1.5b	56.7±5.2a	4.8±0.4c	1.2±0.4a	3.5±0.7b	1.4±4.2b

²Means for the same characteristics with different letters are significantly different from each other ($p<0.05$) according to the Duncan test. Results are expressed as means±SD (n=10). One way ANOVA was performed for each characteristics.

Fig. 3. Germination rates of Jokyoung and Bakkang in 72-cell trays, harvested 14, 17 and 20 days after heading. A. Germination rates. White circle: Jokyoung. Black circle: Bakkang. B. Seeds of Jokyoung harvested and dried 14days after heading.

2008은 국내 온실조건에서 단순 장일처리만으로는 세대단축이 어려운 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 장일처리를 활용한 스피드육종법이 Chinese Spring과 같은 봄밀의 세대단축은 가능하지만, 영국 추파밀인 Trinity와 같은 겨울밀에서는 출수가 늦어 진다는 이전 보고와 비슷하다(Ghosh et al. 2018, Watson et al. 2018). 국내 환경에서 금강, 중모2008과 같이 파성이 높은 품종은 세대단축을 위해 종자녹체춘화처리법을 활용한 2년 5세대 세대단축법에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

수확시기별 미숙종자 발아특성

출수기 이후 생육일수 단축을 위해 출수 후 14일부터 수확 시기를 달리하여 발아 특성을 분석하였다. 조경은 출수 후 14일, 17일 및 20일 수확한 종자의 발아율이 각각 74.9%, 89.3%과 100%였다. 백강은 14일과 17일에는 조경보다 약 2~3% 낮은 발아율을 보였으나, 출수 20일 후에는 조경과 같은 100%의 발아율을 보였다(Fig. 3A). 식물체 이삭 및 종자 상태는 Fig. 3B에서 보는 바와 같이 이삭과 종자는 녹색을 유지하고 있었으나, 종자의 외적 크기 성장은 완료되어 성숙기 종자의 형태를 보이고 있었다. 배유는 유숙기 단계로 수분을 다량 함유하고 있어, 건조 후 종자 부피가 크게 줄어드는 현상을 보였다. 종자녹체춘화처리법에서는 성숙기에 도달한 종자를 수확하여 1% H_2O_2 처리를 통해 미숙 종자의 발아를 유도하였지만(Mukade et al. 1973, Shin 1987), 스피드육종법은 건조 및 저온처리만으로 개화 후 2~3주 후에 수확한 미숙 종자의 발아를 유도하였다(Watson et al. 2018). 본 연구에서도 출수 후 20일경에 미숙 종자를 수확하여 건조 3일, 저온 처리 3일 후 발아율을 분석한 결과 발아율이 100%로 나타났다.

적 요

밀의 일장 조절을 통한 세대단축방법인 스피드 육종 시스템에 대하여 국내 밀 품종인 금강, 백강, 조경과 중모2008을 공시하여 품종 별 출수 특성, 작물학적 특성 및 적정 수확 시기를 분석한 결과, 온실에서 장일 처리 시 조경과 백강의 출수일수는 44일 내외로 스피드 육종 시스템을 이용한 세대 단축이 가능하였고, 금강과 중모2008은 출수일수가 75일 이상으로 늦어 스피드 육종 시스템의 적용이 불가능하였다. 장일 조건에서 육묘상자에서의 일수립수가 12개 이상 확보되어 세대단축을 위한 적정 종자량을 확보할 수 있었으며, 세대단축을 위한 적정 수확 시기는 출수 후 20일경으로 종자는 미성숙 상태이지만 건조 및 저온 처리 후 생리적으로 성숙기에 도달하여 100% 발아하였다. 따라서 온실에서 22시간 장일 처리를 하여 국내 밀 품종의 생육기간을 단축시키고, 향후 이를 이용하여 세대를 대량으로 전개하는 품종 육성에도 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제명: 영남지역 적응 조숙 내재해성 용도별 밀 품종 개발, 세부과제번호: PJ01120201)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Barabas ZC, Csepely IT. 1978. Shortening vernalization of winter wheat with kinetin. *Euphytica* 27: 831-835.
- Cho CH, Ahn WS, Nam YI, Ji KH. 1978. Studies on procedures for accelerating generation advancement in wheat and barley breeding. *Korean J Breed Sci* 10: 35-43.
- Cho CH, Ha YW, Ahn WS. 1976. Studies on procedure for accelerating generation advancement in wheat and barley breeding. *Korean J Crop Sci* 21: 57-64.
- Ghosh S, Watson A, Gonzalez-Navarro OE, Ramirez-Gonzalez RH, Yanes L, Mendoza-Suarez M, Simmonds J, Wells R, Rayner T, Green P, Hafeez A, Hayta S, Melton R, Steed A, Sarkar A, Carter J, Perkins L, Lord J, Tester M, Osbourn A, Moscou MJ, Nicholson P, Harwood W, Martin C, Domoney C, Uauy C, Hazard B, Wulff BBH, Hickey LT. 2018. Speed breeding in growth chambers and glasshouses for crop breeding and model plant research. *Nat Protoc* 13: 2944-2963.

5. Hickey LT, Hafeez AN, Robinson H, Jackson SA, Leal-Bertioli SCM, Tester M, Gao C, Godwin ID, Hayes BJ, Wulff BBH. 2019. Breeding crops to feed 10 billion. *Nat Biotechnol* 37: 744-754.
6. Kim HS, Kim YJ, Kim KH, Lee KW, Shin SH, Cheong YK, Par KH. 2012. Effect of mechanical working system on labor-saving in wheat cultivation. *Korean J Crop Sci* 57: 331-336.
7. Lee SY, Hur HS, Song JC, Park NK, Chung WK, Nam JH, Chang HG. 1997. Comparison of noodle-related characteristics of domestic and imported wheat. *Korean J Food Sci Technol* 29: 44-50.
8. Mukade K, Kamio M, Hosoda K. 1973. The acceleration of generation advancement in breeding rust-resistant wheat. *Proc. 4th int. Wheat Genet Symp* 439-444.
9. Mukade K. 1974. New procedures for accelerating generation advancement in wheat breeding. *Jpn Agric Res Quart* 8: 1-5.
10. Niroula RK, Bimb HP. 2009. Overview of wheat X maize system of crosses for dihaploid induction in wheat. *World Applied Sci J* 7: 1037-1045.
11. RDA (Rural Development Administration). 2012. Manual for standard evaluation method in agricultural experiment and research. pp. 316-344.
12. Reynolds MP, Borlaug NE. 2006. Impacts of breeding on international collaborative wheat improvement. *J Agric Sci* 144: 3-17.
13. Seong BY, Cho CH, Park MW, Hong BH, Ahn WS, Nam JH. 1980. Studies on the procedures of accelerating generation advancement in wheat and barley breeding. *Korean J Crop Sci* 25: 35-42.
14. Shin DC. 1987. Studies on the selection efficiency of some agronomic characters in rapid generation advancement of wheat. *Rs Rept RDA (Crops)* 29: 159-177.
15. Shin DC, Mukade K. 1983. Studies on accelerating generation advancement in wheat breeding I. Effect of a few treatments on seed-green vernalization in wheat. *Korean J Breed Sci* 15: 286-292.
16. Uauy C. 2017. Wheat genomics comes of age. *Curr Opin Plant Biol* 36: 142-148.
17. Watson A, Ghosh S, Williams MJ, Cuddy WA, Simmonds J, Rey MD, Asyraf Md Hatta M, Hinchliffe A, Steed A, Reynolds D, Adamski NM, Breakspear A, Korolev A, Rayner T, Dixon LE, Riaz A, Martin W, Ryan M, Edwards D, Batley J, Raman H, Carter J, Rogers C, Domoney C, Moore G, Harwood W, Nicholson P, Dieters MJ, Delacy IH, Zhou J, Uauy C, Boden SA, Park RF, Wulff BBH, Hickey LT. 2018. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nat Plants* 4: 23-29.