한국 돌연변이육종 연구의 역사와 주요 성과 및 전망

강시용* · 김상훈 · 류재혁 · 김진백

한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Brief History, Main Achievements and Prospect of Mutation Breeding in Korea

Si-Yong Kang*, Sang Hoon Kim, Jaihyunk Ryu, and Jin-Baek Kim

Advanced Radiation Technology Institute (ARTI), Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Kuemgu-gil 29, Jeongeup, Jeonbuk 56212, Republic of Korea

Abstract Research on mutation breeding started in the early 1960s by researchers at the Atomic Energy Research Institute, Rural Development Administration (RDA) and several universities in Korea. The Radiation Agriculture Research Institute (RARI) was established in 1966, and studies of mutation breeding using radiation were actively conducted for a while. RARI was merged into the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) and RDA in 1973, and radiation breeding research was neglected by the two agencies. In the 1980s, the relevant research department was lost, which resulted in a recession period of radiation breeding research. The Advanced Radiation Research Institute (ARTI), under the KAERI, was established to promote radiation research and the industry in 2005, which led to the activation of radiation breeding research. Then, the Radiation Breeding Research Center (RBRC) at the ARTI was established with support of the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs in 2013. Recently, the importance of seed and genetic resources has been emphasized in Korea, and many institutes, companies and private breeders are interested in mutation breeding. The RBRC is trying to develop advanced radiation breeding techniques and new genetic resources using mutation techniques combined with bio-tech. This is to deal with the loss of biodiversity due to global climate change and environmental degradation, growing global demand for food and bio-energy, and to strengthen the protection for new plant varieties. Approximately 180 new mutant varieties were developed and registered officially in Korea. Recently, new mutant varieties, especially of flowers and ornamental plants, have quickly increased and are being commercialized, mainly by private company and breeders.

Keywords breeding, genetic resource, mutant, mutation, radiation, variety

Received on December 24, 2019. Revised on January 10, 2020. Accepted on February 12, 2020.

* Corresponding Author (E-mail: sykang@kaeri.re.kr, Tel: +82-63-570-3310, Fax: +82-63-570-3319)

서론

생명체는 유전자 정보전달 및 복제 과정에서 어떤 착오나 자연 환경 등의 영향에 의해 유전자에 변이가 발생할 수 있으며 이를 자연돌연변이라고 한다. 자연돌연변이 현상은 생물 진화의 한 원동력이며, 인간에 의한 야생식물의 순화 및 재래종의 선발 과정에서도 이것을 주로 이용한다고 볼 수 있다. 하지만, 자연 돌연변이의 발생빈도는 낮기 때문에 방사선 및 화학물질 등 돌연변이원(mutagen)을 생물체에 처리하여 자체의 변이를 인위적으로 일으켜 그 후대에서 발생하는 유용한 변이체를 선발하여 육성하는 것을 돌연변이 육종(mutation breeding)이라고 한다 (FAO/IAEA 2018). 돌연변이원으로 방사선을 처리한 경우에 방사선육종(radiation breeding)이라고 한다. 돌연변이육종은 교배육종과 함께 전통 육종기술의 하나로 전세계적으로 널리 활용

되고 있지만(Ahloowalia et al. 2004), 그동안 우리나라의 돌연변이육종 기술은 육종연구나 종자산업 측면에서 많은 역할을 수행하지 못하였다(Kang et al. 2007). 그 원인은 1966년도에 설립되어 자리를 잡아갔던 방사선농학연구소가 1973년도에 원자력연구소와 통·폐합되면서 돌연변이육종 분야의 연구조직이 와해가 되고 연구개발이 많이 이루어지지 않은 것이 가장 크다고 할 수 있다. 그러나, 2000년대에 들어 외국산 종자의 로열티 문제가 부각되고 국산 유전자원의 중요성이 인식되면서 돌연변이육종에 대한 관심과 연구가 증가하는 경향이다. 본고에서는 우리나라에서 돌연변이육종 연구의 역사 및 현황을 정리하고 앞으로의 발전 방안을 모색해보고자 한다.

돌연변이 육종 역사 및 기술 특성

세계 돌연변이육종 역사 및 동향

1928년 L.J. Stadler가 맥류와 옥수수 종자에 X-선을 조사(照射)하여 X-선이 식물체에 돌연변이를 일으킨다는 것을 최초로 보고하였다(FAO/IAEA 2018, Kharkwal 2012). 이어서, 방사선을 이용한 돌연변이육종 연구는 유럽과 미국을 중심으로 발전하게 되는데, 이어서 알키화제 등의 화학물질도 식물체에 돌연변이를 일으키는 것이 밝혀지면서 이용되게 되었다. 1964년에는 IAEA (세계원자력기구)가 원자력의 평화적 이용의 일환으로 방사선을 이용한 농업분야의 국제협력을 지원하기 위하여 FAO (세계식량농업기구)와 함께 비엔나 IAEA 본부에 협력부서와 연구소를 설립하면서 전 세계적으로 돌연변이육종 연구가 보급되게 된다(Wikipedia 2019). 2019년 12월 기준으로 FAO/IAEA 돌연변이품종 데이터베이스(<http://mvd.iaea.org>)에 의하면 전세계의 돌연변이품종수는 총 220종 식물에 3,314개에 달한다. 나라별로는 중국이 801개로 1위이고, 일본, 인도가 그 뒤를 따르며, 아시아 국가가 2,009개(60.6%), 유럽 국가 970개(29.3%), 북미 179개(5.4%) 그리고 아프리카와 남미가 각각 72개씩(2.2%)을 점하고 있다. 식물종류별로는 벼 및 맥류 등 곡물류가 1,617개(48.8%)로 가장 많고, 화훼류 710개(21.4%), 두류 504개(15.2%), 채소류 91개(2.7%), 유료작물 89개(2.7%), 과실류 82개(2.5%), 섬유작물 67개(2.0%)와 약용, 사료용 및 버섯류 등 기타가 154개(4.6%)를 점하고 있다. 돌연변이 유지원별 품종수는 감마선 이용 52%, X-선 이용 18%과 함께 중성자, 이온빔 등을 포함한 물리적(방사선) 돌연변이원이 77%로 점하고 있다. 세계의 돌연변이 품종이 모두 이곳 데이터베이스에 등록되어 있는 것은 아니며, 미등록된 품종을 포함하면 실제로는 이것보다 2~3배 이상 많지 않을까 추정된다. 우리나라는 이 데이터베이스에 40건의 돌연변이 품종을 등록하여 세계 12위에 랭크되어 있으나, 실제로는 180건이 개발되어 있다.

돌연변이육종 품종이 전세계적으로 안전하게 널리 이용되고 있는데, 돌연변이육종의 강국이라 할 수 있는 중국 및 일본은 물론이거니와 많은 아시아 국가들은 방사선육종 전담 국공립 연구기관을 운영하면서 많은 성과를 내고 있다. 돌연변이 품종의 이용 정도를 보더라도 재배면적 기준으로 중국은 20%, 일본은 10% 정도를 차지하고 있는데(Ahloowalia 2004, Wikipedia 2018), 국내는 필자 등이 추계를 해보아도 1%를 넘지 못하는 실정이다. 돌연변이육종에 의해 개발된 품종수 이외에 우리나라의 돌연변이육종 연구 수준은 어느 정도일까에 대해서 관련 논문수를

분석한 결과가 있다(KAERI 2017). Scopus 인용색인 DB를 대상으로 검색어 “Mutation breeding”, “Radiation breeding”을 입력하여 2006~2015년까지 10년간의 논문을 검색한 결과, 총 1,396건의 관련 논문이 검출되었다. 국가별 검출 순위는 중국(347건), 일본(219건), 미국(184건), 인도(129건), 한국(72건) 순이었다. 대표기관별로는 1위는 일본 RIKEN (41건), 2위 중국 Zhejiang Univ. (38건), 3위 일본 NIAS (36건), 4위 중국농업과학원(28건), 5위는 한국원자력연구원(27건) 이었다(Table 1). 돌연변이육종 관련 논문수가 최근의 이 분야 연구의 질적 수준을 나타낸다고 간주하면, 최근 국내 관련 연구가 급속도로 발전하고 있는 것을 반영하고 있다고 볼 수도 있다.

돌연변이육종 기술의 특성

식물의 육종기술에는 다른 품종(형질)의 부친과 모친을 교배하여 잡종 후대에서 유용한 변이체를 선발하는 교배(교잡)육종법, 방사선 등 인위적인 방법으로 식물체의 유전적인 변이를 유도하는 돌연변이육종법, 그리고 생명공학기법을 이용하여 다른 종(심지어 동물 또는 미생물도 포함)의 유전자를 뽑아 삽입하여 유용한 유전자변형작물(GMO; Genetically Modified Organism)을 만드는 유전자변형(형질전환) 육종기술로 대별할 수 있다. 돌연변이 육종은 돌연변이원 처리에 의한 무작위로 발생하는 자체의 유전자 변이를 이용하는 반면, 다른 두 가지 육종법은 다른 품종 또는 종의 유전자를 재조합하는 과정을 거친다는 측면에서 큰 차이점이 있다. 돌연변이 육종의 장점을 들자면, 돌연변이원 처리를 위한 변이유기 육종 재료로는 종자, 삼수체, 조직배양체, 꽃가루, 구근 및 전식물체 등을 처리할 수 있기 때문에 교배육종이 곤란한 식물종에도 적용이 가능하다. 그리고, 돌연변이체는 신규 유전자의 탐색 및 유전자의 기능을 밝히는 기능유전체 연구를 위한 중요한 유전자원 소재로 활용되고 있다(FAO/IAEA 2018, Nakagawa & Kato 2017). 또한, 돌연변이 품종은 70여년 이상 전세계적으로 안전하게 널리 활용되고 있기 때문에 교배육종과 같은 전통육종의 한 방법으로 간주되며, 품종 등록시에도 GMO와 달리 안전성 검사 등이 필요없다(Ahloowalia 2004, Schum 2003).

우리나라 돌연변이육종 변천사

기술의 태동 및 발전기

우리나라에서 돌연변이(방사선)육종 연구가 시도된 것은 1958년경 미국에서 감마선 조사된 씨앗을 국내 농과대학 시험농

Table 1. Rank of published research papers related with mutation breeding by each country and institution.

Rank	Country	No. of research article	Major Institution (rank by institution)
1	China	347	-Zhejiang University (2)* -Chinese Academy of Agricultural Science (4) -Chinese Academy of Science (6) -Huazhong Agriculture University (7)
2	Japan	219	-RIKEN (1) -National Institute of Agrobiological Science (3) -Kyoto University (9) -National Agricultural & Food Research Organization (10)
3	USA	184	-USDA-ARS (7) -University of California, Davis (12)
4	India	219	-Bhabha Atomic Energy Research Institute (16) -Indian Agricultural Research Institute (19)
5	Rep. of Korea	72	-Korea Atomic Energy Research Institute (5)
6	French	57	-Centre National de la Recherche Scientifique
7	Germany	56	-Technische Universität München -Max Planck Institute
7	England	56	-John Innes Institute (20)
9	Pakistan	40	-Nuclear Institute for Agriculture & Biology (13)
10	Italy	34	-Consiglio Nazionale delle Ricerche

* The numbers in parentheses indicate the ranking of published article by the institutions.

Fig. 1. Various gamma radiation facilities for acute and chronic irradiation: (A) Gamma greenhouse of Radiation Agriculture Research Institute in Gongneung-dong, Seoul, established in 1969, and (B) Gamma room and (C) Gamma phytotron (right) of the Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute in Jeongeup, Korea, operated since 2005.

장에 심었던 것이 처음으로 알려져 있다(KAERI 2013). 1960년대 초반에는 1959년에 설립된 원자력연구소의 방사선생물학실과 농촌진흥청 산하 농업시험장에서 방사선 및 방사성동위원소의 농학적 이용 분야의 연구가 처음으로 시작되었다. 그리고, 1965년 4월에는 원자력연구소내에 방사선농학연구실이 설치되고, 1966년 11월 30일 방사선농학연구소로 독립하게 되면서 방사선육종 연구가 활성화되었다. 1968년 2월에는 방사선농학연구소 부설로 원자력시험농장이 양주군 미금면 호평리에 설치되었었고, 200Ci 규모의 ^{60}Co 감마온실 등을 갖추게 되었다(Fig.

1A, Kim et al. 1971). 이 당시 방사선농학연구소는 유전육종연구실 이외에도 생리영양연구실, 작물가축보호연구실, 식품공학연구실 등을 갖춘 방사선 및 방사성동위원소를 이용한 농업과학 분야의 작은 종합연구소 성격이었다. 유전육종연구실에서는 감마선조사에 의한 벼, 보리, 콩 등 우리나라 주곡의 돌연변이 육종 연구를 중점적으로 수행하였다. 벼 연구에서는 단간, 조숙, 내도복성의 형질이 개량된 돌연변이 품종을 다수 선발하였으나, 당시 통밀계 품종의 개발 등에 밀려 ‘밀양10호’의 장려품종 1호를 만드는 것 이외는 큰 성과가 없었다. 한편 대두에서는

금강 대립종에서 모품종에 비해 숙기가 12일 빠르고 수량도 높은 ‘KEX-2’를 유가하였고, 또한 농촌진흥청 연구진과 협력으로 미국에서 도입한 CB-27에 방사선을 조사하여 재래 콩나물용 대두보다 30% 이상 증수되고, 광지역 적응성의 신품종인 ‘방사콩’을 개발하여 보급하는 데에 기여하였다. 보리에서는 방주 품종에서 생육을 2주간 단축시켜 남부 이모작 지대에 적합한 조숙성의 ‘방사6호’를 1977년에 개발하여 보급하였다. 식물의 조직배양 분야에서는 1966년 방사선농학연구소의 연구진이 국내 최초로 양란의 생장점 배양을 시작하여 양란의 mericlone 대량증식과 돌연변이 연구가 이루어져 조직배양을 통한 양란증식 산업화의 효시가 되었다. 인삼자엽에서의 체세포배(somatic embryo) 획득과 *Solanum nigrum*의 약배양은 최초의 성공사례가 되었다. 원형질체 배양 및 융합연구는 1972년에 시작되어 벼, 담배, 양파, 파의 원형질 배양과 융합에 성공하였고, 국내 식물유전공학 연구 및 기술을 발전시키는 근간이 되었다고 볼 수 있다. 학술활동 분야에서는 한국육종학회(1969년)와 현재 한국식물생명공학회(1973년)의 전신인 한국식물조직배양학회(1973년)를 창립하는데 방사선농학연구소가 중심 역할을 하였으며, 학회 본부를 연구소에 두고 운영되다가 연구소 통폐합 후 서울농대와 농촌진흥청으로 각각 이전하였다.

돌연변이육종 기술의 침체기

방사선농학연구소는 연구투자의 중복을 피하고 농업 연구를 농촌진흥청에 일원화해야 한다는 명목으로 1973년 원자력연구소(현 한국원자력연구원)와 통폐합되면서 기초연구 분야 인력 50여명만 남기고, 응용연구 분야는 80여명의 인력과 함께 농촌진흥청으로 이관하게 되었다(KAERI 2013). 여기에는 1970년대 초반 교배육종 기술에 의한 주곡인 벼 육종에서 획기적인 다수확성인 통일계 품종 개발에 성공함에 따라, 돌연변이 육종이나 방사선농학 연구의 성과에 대한 비판이 비등했던 점도 작용하였던 것으로 보인다. 그러나 방사선농학연구소의 인력과 업무를 이관 받은 양기관은 방사선농학 연구를 등한시 하게 되어 우리나라의 돌연변이육종 연구는 침체하게 된다. 농촌진흥청에 이관된 연구 인력은 방사선이용 연구 담당관실 기구를 신설하여 존속하다가, 1977년 담당관실이 해체되어 인력이 여러 부서로 분산 배치됨으로서 농촌진흥청 내에서의 방사선농학 연구가 거의 중단되게 된다. 원자력연구소 또한 1970~80년대에는 원자력발전(發電) 기술의 국산화가 가장 선결 과제이었기 때문에, 방사선농학이나 생물분야의 연구 인력이 결원이 생기면, 거의 충원이 되지 않게 되었다. 1980년대 초반에는 원자력연구소에서 방사선

육종 관련 연구조직도 사라졌다가, 다행히 1985년에 방사선유전공학연구실이 출범하면서 방사선을 이용한 돌연변이육종과 조식작물 연구의 명맥은 유지하게 되었다. 1991년 12월에는 방사선유전공학연구실은 대덕 본소로 이전하였고, 1990년대 중반부터는 원자력중장기 연구개발사업에 돌연변이육종 연구과제가 선정되어 산·학·연 협력 연구가 추진되게 되었다. 이 시기의 방사선육종 분야 주요 연구 내용으로는 원자력연구소에서는 벼, 콩 및 무궁화 등 일부 품목의 돌연변이 신품종 개발에 주력하였으며, 2000년부터 시행된 품종보호권 등록제도가 시행됨에 따라 몇몇 돌연변이 신품종이 국립종자원에 등록되게 되었다.

돌연변이육종 기반확충 및 재도약기

2000년대 들어 남양주의 원자력시험농장 부지가 도시계획에 따라 수용됨에 따라 대체 부지 구입이 추진되면서, 정부는 국내의 낙후한 방사선이용 분야의 연구와 실용화 촉진을 위해 전북 정읍에 한국원자력연구원의 분원으로 첨단방사선연구소를 2005년 설립하게 된다. 정읍 연구소에는 감마선 및 전자빔 등 다양한 방사선조사시설 이외에도 감마파괴분석기, 시험포장, 종자저온저장고, 유리온실 등을 갖춘 방사선육종시험장이 설치되고(Fig. 1B, 1C), 인력도 보강됨에 따라 방사선육종 연구의 기반을 갖추게 되었다. 이 시기는 우리나라가 세계식물신품종보호동맹(UPOV)에 가입(2002년)하게 되어 외국 품종의 로열티 문제가 부각되고 국산 유전자원의 중요성도 강조되면서 돌연변이육종 기술의 중요성이 재인식되는 계기가 되었다. 2007년부터는 농촌진흥청 바이오그린21사업과 농식품부의 농생명산업기술개발 사업에서 돌연변이육종 관련 산·학·연 공동 연구과제가 지원되게 되었다. 이러한 연구 성과로 벼 및 일부 주요 작목에 국한되었던 돌연변이육종에 연구는 다양한 화훼류, 채소류 및 특약용 작물로 확대되고, 유전체 및 대사체 연구와의 융합 연구도 활발하게 이루어지게 되었다.

정부(농식품부)는 낙후한 국내 종자산업을 미래 성장산업의 하나로 육성하기 위하여 2009년도에 “2020 종자산업 육성대책”을 수립하였고, 민간부문의 육종 연구를 활성화하기 위한 방안의 하나로 정읍의 첨단방사선연구소 내에 각종 실험실 및 연구실과 배양시설 등을 갖춘 방사선육종연구센터 건립을 지원하였다. 2013년 11월에 준공된 방사선육종연구센터는 자체적으로는 방사선육종 기반·원천기술 개발과 전략 품목 중심의 유전자원 개발을 중점적으로 수행함과 아울러 국내 산·학·연 기관에 방사선육종 기술을 지원하는 것에 주안점이 주어지고 있다. 특히 국내 돌연변이육종 기술의 저변확대를 위해 2012년부터 돌연변이

이육종 전문가 교육과정을 개설하여 매년 20여 명씩 교육을 실시하고 있으며, 민간육종 중심의 방사선육종생산자연합회의 활동을 지원해오고 있다.

국내 돌연변이육종 동향 및 주요 성과

국립종자원 품종보호권 등록 데이터 분석

2019년 12월 18일을 기준으로 국립종자원의 품종보호권 등록 데이터베이스(<http://www.seed.go.kr>)에 의하면, 돌연변이 육종 기술로 개발된 품종중에 품종보호권이 등록된 건수는 26개 기관 및 업체(개인)에서 32개 식물종 180개(전체 등록 품종 7,879건의 약 2.3%)가 등록되어 있다(Table 2). 여기에는 자연돌연변이나 아조변이를 이용하여 육종된 것이나 조직배양과정에 출현한 변이를 선발한 것을 제외하였고, 방사선이나 화학변이체를 처리해서 발생한 변이를 품종화한 실적만 정리한 것이다. 또한, 국립 산림품종관리센터나 국립수산물과학원 소관인 산림자원이나 해조류 자원은 제외한 것으로 실제로는 더 많은 돌연변이 품종이 등록되어 실용화되고 있다고 볼 수 있다. 종묘업체중에는 우리시드그룹(박공영 대표)이 46건으로 압도적으로 많고, 바보난농원(강경원 대표) 9건 및 시드피아(조유현 대표) 5건 등이다. 대학에서는 서울대 6건, 서울여대 5건 및 전남대 5건이었고, 지자체 중에는 경상남도가 5건으로 가장 많았다(Table 2). 품종을 출원 등록한 품종보호권자 기준으로는 민간 종묘업체(개인 및 외국업체 포함)가 76건(42.2%)으로 가장 많고, 한국원자력연구원 39건(21.7%), 농촌진흥청 26건(14.4%), 대학교 24건(13.3%), 도농업기술원 등 지자체가 15건(8.3%)을 차지하고 있다(Table 3). 작목별 품종수는 벼가 38건으로 가장 많고, 코레오시스(Coreopsis)가 35건, 국화 17건, 심비디움(춘란 포함)이 10건, 가우라와 장미가 각각 8건 순이었다. 전체 32개 품목중에서 화훼류가 108건으로 60%를 점하였으며, 식량작물이 44건(24.4%), 채소류 8건(4.4%)과 유료작물 8건(4.4%), 특용 6건(3.3%), 과수 4건(2.2%) 및 약용 2건(1.1%)순 이었다(Table 4). 돌연변이원별로는 방사선이 144건(80.0%)이고, 화학 변이원이 36건(20.0%)이었다. 방사선원별로는 엑스선과 양성자빔 각 2건씩을 제외하고는 전부 감마선을 이용한 것이었다. 화학변이체는 MNU (N-Methyl-N-nitrosourea) 처리가 17건으로 가장 많고, 콜히친 4건, EMS (Ethyl-methanesulfonate) 3건 및 NaN₃ (3건) 이용이 있었으며, 일부는 불명확한 것도 있었다(Table 5). 품종보호권 등록제도가 실시된 2000년대 들어 품종 등록건수의 시대별 추이를 보면 2010년 이후에 급속도로 증가하는 추세를 볼 수 있다(Table 6).

Table 2. Number of mutant variety registered by each institution.

Institution	No. of mutant variety
UriSeed Group Co.	46
Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)	39
Rural Development Administration (RDA)	26
Babo Orchid Nursery	9
Seoul National Univ.	6
Seoul Women Univ.	5
Gyeongnam Province	5
Cheonnam National Univ.	5
Seedpia Co.	5
Agricultural Union of Orchid Research	4
Chonbuk National Univ.	4
Chungnam Province	3
Hojawon (SJ Kang)	3
PJ Kuig & SN BV	2
Chungbuk Province	2
Cheonbuk Province	2
Cheonnam Province	2
Bio-breeding Research Institute	2
Hyeondae Seed Co.	2
Honam Univ.	2
Chuncheon City	1
Sunkyu Choi	1
JNH Japan Iron C	1
Takamatsu Tomooki	1
Korea Univ.	1
Kangwon National Univ.	1
Total	180

Table 3. Number of mutant variety registered by each sector.

Sector	No. of mutant variety
Private company and breeder	76
KAERI	39
RDA	26
University	24
Local government	15
Total	180

주요 돌연변이 품종 개발과 활용 사례

돌연변이 품종의 개발 및 실용화 사례를 살펴보면, 한국원자력 연구원은 1990년대 이후 기존 품종을 개량하여 수량성과 내도복

Table 4. Number of mutant variety registered by each plant species.

Plant scientific name	No. of mutant variety
<i>Oryza sativa</i> L.	38
<i>Coreopsis</i> spp.	35
<i>Chrysanthemum</i> spp.	17
<i>Cymbidium</i> spp.	10
<i>Gaura lindheimeri</i>	8
<i>Rosa</i> spp.	8
<i>Hibiscus cyriacus</i> L.	7
<i>Euphorbia pulcherrima</i> Wild. ex Klot.	6
<i>Hosta</i> spp.	5
<i>Dendrobium</i> Sw.	4
<i>Brassica napus</i> L.	4
<i>Perilla frutescens</i> Britt. var.	3
<i>Glycine max</i> (L.)	3
<i>Crassula ovata</i> (Mill.) Druce	3
<i>Hibiscus cannabinus</i>	3
<i>Nertera granadensis</i>	2
<i>Platycodon grandiflorum</i>	2
<i>Allium sativum</i> L.	2
<i>Brassica rapa</i> × <i>Raphanus</i>	2
<i>Brassica rapa</i> subsp. <i>pekinensis</i> (Lour.) Hanelt	2
<i>Hordeum vulgare</i> L.	2
<i>Citrullus vulgaris</i> Schrad.	2
<i>Ornithogalum</i> spp.	2
<i>Aster yomena</i>	2
<i>Lycium chinense</i> Miller.	1
<i>Avena sativa</i> L.	1
<i>Sesamum indicum</i>	1
<i>Brachyscome</i> spp.	1
<i>Morus</i> spp.	1
<i>Euphorbia hypericifolia</i>	1
<i>Neofinetia falcata</i> Hu.	1
<i>Rubus fruticosus</i>	1
Total	180

성이 개량된 ‘원청벼’, ‘원평벼’ 등 10여종의 일반벼 품종을 개발하여 등록하고 농가에 보급하였다. 또한, 남해안 지역에서 녹미로 이용되던 재래종 생동찰벼의 출수기를 앞당기고 키를 작게하여 전국에서 안전하게 재배하도록 ‘녹원찰벼’(Fig. 2A)를 개발하였다. 이 품종은 클로로필 및 카로티노이드 등 색소 함량이 높고 녹색 찰현미로 이용이 가능하여 개발후 20년 이상 꾸준히 농가에서 재배되어 지역 특산브랜드미로 생산 판매되고 있다. 동안벼

Table 5. Number of mutant variety registered by each mutagen.

Mutagen	No. of mutant variety
Gamma ray	140
Ion beamn	2
X-ray	2
MNU	17
colchicine	4
EMS	3
MMS	3
NaN3	3
dES	1
unidentified	5
Total	180

Table 6. Number of mutant variety registered by each 5 years.

Category of 5 years	No. of mutant variety
2000~2005	20
2006~2010	22
2011~2015	80
2016~2019	58
Total	180

배(씨눈)를 떼어내어 배양한 캘루스에 감마선 조사와 5 MT (5-methyl tryptopan) 저항성 세포를 선발하여 양성한 변이체 집단에서 아미노산이나 토코페롤 등의 함량이 높은 ‘골드아미 1호’, ‘토코홍미’ 등이 최근에 품종 등록되어 주목을 받고 있다. 농촌진흥청 벼 육종연구진은 일품벼의 수정배에 MNU를 처리하여 697개체의 돌연변이체를 얻고, 그 후대에서 ‘백진주’(반찰), ‘고아미벼2호’(고 아밀로스-고 식이섬유), ‘설갱’(뽕안 뽕쌀, 양 조용) 및 ‘큰눈’(거대배아미), 찰(수원428호)등 다양한 특수미 품종들을 육성하였다(Fig. 2B, 2C). 일품벼 유래의 돌연변이 한 집단 내에서 내도복성과 초형 등 원품종의 우수한 특성을 그대로 간직하면서 쌀의 구성 성분만 변화시켜 특수미를 만든 것으로 돌연변이육종 기술의 장점을 최대한 살린 대표적인 성공 사례라 할 수 있다. 서울대에서도 화청벼에 MNU를 처리하여 기능성물질 감마아미노낙산(GABA: γ -amino butyric acid)이 함량이 높은 거대배아미 ‘서농6호’를 개발하여 실용화하였다. 최근에는 민간업체인 시드피아(주)에서도 밥맛이 좋은 ‘쿨든퀵-2호’와 ‘-3호’를 돌연변이육종 기술로 개발하여 실용화하였다.

2000년대 들어 국내 돌연변이 육종 연구에서 큰 변화는 화훼류 품종 개발에 많은 성과가 있었다는 것이다. 특히, 종묘업체 및

Fig. 2. Rice grains of ‘Nogwonchal’ (A) bred by KAERI, and ‘Giant embryo’ (B), and ‘Seolgang’ (C) bred by RDA.

Fig. 3. Various mutant varieties of ornamental flowers; (A) orchid cv. ‘Royal gold’ by Babo Orchid Nursery, (B) Coleopsis cv. ‘URI Dream Pink’ by UriSeed Co., (C) Crasula Ovata, ‘Hot Leaf’ by Hojawon, (D) Poinsettia cv. ‘Clara pink’ by RDA, (E) Rose of sharon cv. ‘KKoma’ by KAERI.

민간 육종가들도 돌연변이 육종 성과로 많은 품종 개발과 상업화를 달성하고 있다. 몇가지 사례를 보면, 난의 경우 바보난농원에서 감마선조사와 조직배양 기술을 이용하여 ‘둥이’, ‘은설’, ‘로얄 골드’, ‘로얄프레젠트’, ‘상작’ 등 식물체는 소형이면서 잎무늬 위주의 돌연변이품종을 개발하여 농가재배 및 상품화가 이루어졌는데, 선물용으로도 인기가 높다(Fig. 3A). 우리시드그룹(우리꽃연구소)에서는 가우라 및 코레오시스속 식물을 중심으로 많은 돌연변이 품종을 개발하였고(Fig. 3B), 호사원에서는 염자를 대상으로 관상가치가 높은 컬러 잎을 나타내는 신품종을 개발하였다(Fig. 3C). 이들 업체에서 개발된 품종은 국내 상품화 뿐만 아니라 일부는 외국에 로열티를 받고 수출이 되고 있는데, 이들은 비주류인 품목을 선택하여 세계적인 경쟁력을 갖는 우수한 품종을 육종하여 상품화한 대표적인 성공사례라 할 수 있다. 이 외에도 화훼류에서는 한국원자력연구원과 경남 및 충남 도농업기술원에서는 감마선을 조사하여 다양한 화색의 국화 돌연변이 신품종을 개발하였고, 전남대와 호남대에서는 장미 품종을 개발하였다. 포인센티아의 경우, 농촌진흥청 연구진이 포엽 색깔이 기존의 붉은색에서 보라색과 분홍색을 나타내는 돌연변이 품종을 감마선조사로 개발하여 품종등록과 기술이전을 실시하였다(Fig. 3D). 이외에도 한국원자력연구원에서는 감마선 조사로 무궁화 신품종을 다수 개발하였는데, 그 중에 ‘꼬마’ 품종은

키가 작은 왜성 품종으로 분재용 및 화분 재배가 가능하여 많은 주목을 받았다(Fig. 3E).

식량작물 및 화훼류 이외에도 최근에는 외국에서 신도입된 작물, 특약용 작물, 채소류 및 과수류 분야에서도 돌연변이육종 기술을 활용한 연구가 적극적으로 이루어져 성과를 내고 있다. 한국원자력연구원에서는 친환경 산업소재용 섬유식물인 케나프(Kenaf, 양마)를 도입하여 방사선육종기술을 이용하여 국내 기후환경에서도 생장성이 뛰어나고 종자 채취가 가능한 신품종 ‘장대’를 개발하여 국내 최초로 품종 등록을 하고 민간업체에 품종실시권을 이전하였다(Fig. 4A). 최근 케나프는 사료용 및 바이오연료용 펠렛 생산을 위한 대규모 국내 재배가 추진되고 있다. 과수 분야에서는 민간업체와 협력으로 감마선조사와 조직배양 기술을 이용하여 블랙베리(Blackberry) 신품종을 개발하였고, 정읍 지역의 특산 산업화가 추진되었다(Fig. 4B). 재래종 차조기를 감마선을 이용하여 개량한 신품종 “안티스페릴”의 경우, 천연물연구팀과의 공동연구를 통하여 항염증 효능 물질인 이소에코마케톤(IK) 함량이 원품종 보다 10배 이상 증가한 것을 확인하였다(Fig. 4C). 이 IK의 효율적 성분 추출 방법을 개발하고, 추출물을 활용한 동물실험과 인체적용 실험을 통하여 관절염 개선 효과가 뛰어나다는 것을 밝혀 특허를 출원 등록하였으며, 안티스페릴의 품종실시권과 관절염개선 추출물 관련 기술이

Fig. 4. Mutant varieties by some special crops bred by KAERI; (A) Kenaf cv. 'Jangdae', (B) Blackberry cv. 'Maple' and (C) Perilla cv. 'Anti-sperill'.

산업체에 이전되어 건강기능성 식의약 소재로 상품화가 추진되고 있다. 이는 육종가와 천연물연구자의 협력에 의해 돌연변이 육종 기술로 특정 기능성물질의 함량을 크게 증진한 자원을 육종할 수 있고, 고부가가치 식의약소재로도 산업화할 수 있다는 것을 보여준 성공사례라고 할 수 있다.

앞으로의 전망

국내의 돌연변이 육종연구는 교배육종 및 생명공학의 발전으로 한동안 소외되어 왔으나, 그동안 국내외의 꾸준한 품종개발 성과와 돌연변이가 유전자원 확대에 유용하다는 것이 밝혀지면서 최근 관련 연구도 증가하는 추세이다. 그리고 방사선 돌연변이 육성 품종은 안전하다는 것이 이미 검증되어 소비자들의 오해도 해소된 상태이기 때문에 현재 환경·식품적인 위해성 논란으로 막대한 연구비와 시간을 소요하여 개발해 놓고도 이용이 제한되고 있는 GMO와의 차별성도 갖추고 있다. 따라서 앞으로 돌연변이 기술은 국내 식물 품종개발 뿐만 아니라 *post-genome* 시대의 기능유전체 연구발전에 크게 기여할 것이다. 마지막으로 국내 돌연변이육종의 발전을 위한 기술적 및 정책적 방안에 대하여 제시하고자 한다.

돌연변이유기 기술의 선진화

돌연변이원 중에서 화학적 변이제는 독성 및 폐액 처리 등의 문제로 민간에서 이용하기는 어려운 점이 있다. 돌연변이 유기에 주로 이용되는 감마선 조사시설의 경우, 국내에는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소(정읍) 및 제주대학교의 방사선응용과학연구소 밖에 없는데, 앞으로 이들 조사시설의 활용도 제고와 함께 신규 시설의 확충도 필요하다. 일본에서는 1990년대부터 중이온가속기를 이용한 중이온빔 육종 기술을 개발하여 품종개발에 많은 성과를 내고 있고(Nakagawa & Kato 2017), 중국에서는 우주선을 이용한 우주육종 기술도 이용되고 있다. 우리나라에

도 경주에 양성자가속기가 구축이 되어 빔조사가 가능하여 최근 원자력연구원을 중심으로 육종에 활용하기 위한 작목별 조사조건 설정 및 적용 연구가 진행중이다. 그리고, 대전의 기초과학연구원에 2021년 준공을 목표로 건설중인 중이온가속기에도 육종용으로 활용한 빔라인이 구축되고 있어 앞으로 이를 활용한 중이온빔육종 연구도 활발하게 추진되어야 한다.

유용 변이체 선발 효율 증진 및 Omics 융합 연구 추진

최근 첨단 생명공학 기술이 급속도로 발전함에 따라 이를 이용한 육종 효율을 증진하는 방안과 함께 돌연변이 자원을 유전체연구에 활용하는 연구 등이 활발히 이루어지고 있다. 교배육종에도 마찬가지로, 분자표지에 의한 유용 돌연변이체의 초기세대 선발이 가능해짐에 따라 선발 효율이 비약적으로 발전하고 있다. 또한, 유전체 분석 기술의 발전으로 돌연변이 변이 기작의 규명과 함께 전사체, 단백질체, 대사체 및 표현체 분석 연구 등이 활발하게 이루어지고 있어, 유전자의 기능을 탐구하는 기능유전체 연구의 필수 재료로도 각광을 받고 있다. 따라서, 돌연변이 자원을 활용한 Omics 연구는 새로운 첨단 육종 시스템의 구축에도 크게 기여할 것이다. 그리고, 최근에 각광을 받고 있는 유전자편집 육종의 경우, 효소를 이용하여 목표로 하는 자체 유전자의 염기 일부를 결실(SDN-1)시키거나 치환(SDN-2)시키는 방법을 많이 이용하는데, 이는 방사선이나 화학변이제에 의한 자체 유전자 변이와 유사한 면이 있다. 앞으로 돌연변이 육종과 유전자편집 육종의 융합 발전의 모색은 물론이거니와 유전자편집 육종의 빠른 발전을 위해서는 목표하는 형질과 연관된 유전자와 변이 염기 부위에 대한 정보 확보가 중요한데, 돌연변이 유전자원에 대한 유전체 연구정보는 이러한 측면에 크게 기여할 것으로 보여진다.

돌연변이 육종의 연구기반 구축 및 기술 저변확대

우리나라의 돌연변이육종 연구가 한동안 경쟁국에 비교하여

낙후되었으나 2천년대 들어 재도약의 경향을 보이는 것은 돌연변이육종 관련 전담 연구조직의 존재 여부와 정부의 연구개발에 대한 지원의 정도와 밀접한 관계가 있다는 것을 앞에서 지적하였다. 미국과 대부분의 유럽 국가 등도 1980년대 들어 방사선육종 관련 국가 연구조직이 없어졌지만, 육종연구 및 종자개발이 주로 민간업체에서 이루어지기 때문에 큰 영향은 없었다. 그러나, 영세한 국내 종묘업체 및 종자산업 등을 고려할 때 육종연구에 대한 정부의 인프라 구축 및 연구개발의 지원은 종자산업 경쟁력 증진을 위해서 매우 중요하다. 농식품부의 지원으로 건립된 한국 원자력연구원의 방사선육종연구센터는 자체적으로는 방사선육종 기반·원천기술 개발과 전략 품목 중심의 유전자원 개발을 중점적으로 수행하고, 아울러 국내 산·학·연 연구개발 및 실용화 지원 등을 실시할 것이다. 이와 아울러 산·학·연 연구자 및 육종가에 대한 방사선육종 기술지원, 돌연변이유전자은행(Gene-bank) 사업 수행과 국제 공동연구 및 협력사업도 추진하는 등 국내외 방사선육종의 핵심거점 역할을 수행하게 될 것이다. 민간부문의 방사선육종 기술지원을 활성화하기 위하여 농식품부의 종자산업진흥센터로 지정을 받아 민간육종가 기술지원 기능을 강화하는 것도 한 방법이다. 전북 지역에는 김제의 민간육종연구단지와 농촌진흥청 산하 연구소와 연계한 종자삼각벨트 구축과 같은 혁신 기관과의 협력과 연계도 중요하다. 그리고, 돌연변이 육종의 저변을 확대하기 위해서는 국내 산·학·연 연구자 및 육종가가 참여할 수 있는 정부의 연구개발사업의 지원 등도 필요하다. 이러한 연구개발 및 기술지원 진흥을 통하여 앞으로는 돌연변이육종연구가 국내 육종연구 및 종자산업 발전에 기여할 수 있고, 세계를 선도하기를 기대해본다.

적 요

우리나라에서 돌연변이육종은 1960년 전후에 원자력연구소, 농촌진흥청 및 농과대학에서 감마선 조사한 시료를 이용하여 처음 시도되었다. 1966년 방사선농학연구소가 설립하면서 돌연변이육종 및 방사선농학 관련 연구가 활성화되었으나, 방사선농학연구소가 1973년 원자력연구소와 농촌진흥청으로 통폐합되면서 한동안 침체 상태를 견게 된다. 2000년대 들어 한국원자력연구원 산하에 첨단방사선연구소가 설립되면서 방사선육종 시설이 갖추어지고, 종자로열티 문제가 부각되면서 다시 돌연변이육종 연구에 관심이 증대되고 있다. 최근에는 농식품부 지원으로

방사선육종연구센터가 건립되어 국내 돌연변이육종의 핵심거점 역할의 기반을 갖추게 되었다. FAO/IAEA 돌연변이품종데이터베이스에는 40여건이 등록되어 있지만, 국립종자원에 등록된 돌연변이품종수는 180여개로 벼 품종수가 가장 많고, 최근에는 화훼류 품종이 급속도로 증가하고 있다. 그리고, 최근에는 돌연변이유전자원을 이용한 유전체 및 대사체 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 앞으로 국내의 돌연변이육종 연구 활성화를 위해서는 새로운 변이 유기기술의 개발, 첨단 생명공학 기술과의 융합에 의한 신기술 개발과 활용 그리고 기술저변을 확대할 필요성이 있다.

REFERENCES

1. Ahloowalia BS, Maluszynski M, Nichterlein K. 2004. Global impact of mutation-derived varieties. *Euphytica* 135: 187-204.
2. FAO/IAEA. 2018. Manual on Mutation Breeding-Third edition. p. 301. In: Spencer Lopes MM, Forster BP, Jankuloski L (Eds.) Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
3. KAERI. 2013. Radiation Breeding Technology. In Technical Record Report of Atomic Energy, KAERI, Daejeon, Korea. p. 201.
4. KAERI. 2017. ARTI R&D Capability Report. Daejeon, Korea. p. 172.
5. Kang SY, Kim DS, Lee GJ. 2007. Genetic improvement of crop plants by mutation techniques in Korea. *Plant Mutation Reports* 1: 7-15.
6. Kharkwal MC. 2012. A brief history of plant mutagenesis. pp. 21-30. In: Shu QY et al. (Eds.) *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. CABI, UK and FAO, Rome.
7. Kim CM, Harn CY, Kim YS, Rhee YI. 1971. The facilities and exposure rate of gamma greenhouse. *Korean J Breed Sci* 3: 93-97.
8. Nakagawa H, Kato H. 2017. Induced mutation for food and energy security: Challenge of inducing unique mutants for new cultivars and molecular research. *Bull NARO Crop Sci* 1: 33-124.
9. Schum A. 2003. Mutation breeding in ornamentals: An efficient breeding method. *Acta Hort* 612, ISHS 2003.
10. Wikipedia. 2019. Mutation breeding. https://en.wikipedia.org/wiki/mutation_breeding.