감마선 조사에 따른 수수[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]의 감수성 평가 및 우수농업형질 변이체 선발

김정민[1,2] · 류재혁[2] · 이민규[1,2] · 김동건[1,3] · 홍민정[1] · 김진백[1]
강시용[1] · 안준우[1] · 하보근[2] · 권순재[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]전남대학교 응용식물학과,
[3]순천대학교 생명자원학과

Evaluation of Radiosensitivity to Gamma-ray Irradiation and Selection of Lines with Elite Agricultural Traits in Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]

Jung Min Kim[1,2], Jaihyunk Ryu[2], Min-Kyu Lee[1,2], Dong-Gun Kim[1,3], Min Jeong Hong[1], Jin-Baek Kim[1], Si-Young Kang[1], Joon-Woo Ahn[1], Bo-Keun Ha[2] and Soon-Jae Kwon[1,*]

[1]*Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongup 56212, Republic of Korea*
[2]*Division of Plant Biotechnology, Colleage of Agriculture and Life Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea*
[3]*Department of Life-resources, Graduate School, Suncheon National University, Suncheon 59722, Republic of Korea*

Abstract - This study was carried out to examine radio-sensitivity to gamma-rays irradiated at different doses and to determine optimal dose for mutation breeding in sorghum [*Sorghum bicolor*(L.) Moench]. Ten cultivars were irradiated with gamma-rays at 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, and 1000 Gy. The germination rate of M_1 seeds was gradually decreased at doses higher than 300 Gy and showed no germination over 600 Gy. Likewise, the survival rate of M_1 seedling decreased at doses higher than 200 Gy and there were no survival over 500 Gy in all cultivars. However, the median lethal doses(LD_{50}) and the median reduction doses(RD_{50}) values of the tested sorghum cultivars were slightly different between cultivars. The LD_{50} was 240(DINE-A-M), 225(IS225), 335(IS2868), 180(Moktak), 214(Banwoldang), 213(ChalI), 231(ChalII), 182(KLSO79125), 287(KLSO79075), and 274(Mesusu) Gy. The RD_{50} was 179(DINE-A-M), 175(IS225), 210(IS2868), 142(Moktak), 174(Banwoldang), 163(ChalI), 175(ChalII), 159(KLSO79125), 199(KLSO79075), and 195(Mesusu) Gy depending on the plant height. Afterwards, we confirmed growth characteristics and mutants of the M_2 generation and then were collected mutant lines better than original cultivars. As a result, we suggest that the optimal doses of gamma-ray irradiations for mutation breeding of sorghum are 180 Gy(Moktak, KLSO79125),

* Corresponding author: Soon-Jae Kwon, Tel. +82-63-570-3312, Fax. +82-63-570-3814, E-mail. soonjaekwon@kaeri.re.kr

200 Gy(DINE-A, IS645, Banwoldang, ChalI, ChalII), 250 Gy(KLSO79075, Mesusu), and 300 Gy(IS2868). By irradiation of gamma-rays at the suggested optimal doses, we constructed M_2 lines for sorghum breeding.

Key words : Gamma-ray, Optimal dose, Median lethal dose(LD_{50}), Median reduction dose(RD_{50}), Sorghum

서 론

수수는 외떡잎식물 벼목 화본과의 한해살이풀로 미국에서 가장 많은 양을 재배하고 있으며(36.1%), 나이지리아, 수단, 멕시코, 에티오피아, 인디아 등에서 주로 재배되고 있다(FAO 2016). 생산량은 매년 전 세계적으로 약 64 M·ton에 이르며 쌀, 밀, 옥수수, 보리 다음으로 중요한 세계 5대 작물이다(FAO 2016). 수수는 아프리카, 라틴 아메리카 및 아시아의 반 열대 지방에서 살고 있는 7억 5천만명의 주요 곡물이지만(Iqbal *et al*. 2010; Jahansouz *et al*. 2014), 국내에서 수수는 타 작물과 비교하여 대부분 소규모 재배로 인해 식량 자원으로서 경쟁력이 떨어진다(Park *et al*. 1999). 국내 재배면적은 1980년 약 3,856 ha였으나 지속적으로 감소하여 2009년 1,547 ha가 재배되어 2,562톤을 생산하였으며(최 등 1996; FAO 2016), 전체 공급량 17,664톤 중 85%를 수입에 의존하고 있는 상황이다(윤 등 2016).

수수 종자의 크기는 다양하고 색깔은 빨강, 검정, 갈색, 검정색, 노란색 등이 존재하며, 보리와 맥아와 달리 수확한 수수는 겉껍질이 없다(Palmer 1992). 수수는 용도에 따라 곡용수수, 장목수수, 사탕수수로 분류되고 있으며, 국내 기후조건에는 열대작물인 사탕수수의 재배가 적합하지 않아 대체 작물인 단수수(*Sorghum bicolor* var. *dulciusculum* Ohwi) 품종을 육성하고 있다. 국내 단수수 품종으로는 국립식량과학원에서 육성된 동안메(2012)와 초롱(2013) 품종이 있다. 단수수 품종은 옥수수가 자랄 수 없는 건조한 기후와 우리나라와 같은 온대지방에서도 재배가 가능하며 바이오 연료의 원료로서 높은 각광을 받고 있으며, 낱알만 이용할 수 있는 옥수수에 비해 수수는 식물체 전부를 에너지원으로 활용될 수 있다(안 등 2012).

수수는 다목적 기능으로서 역할이 가능하여 기능성 식품, 동물 사료, 벽판 섬유, 울타리 및 포장재 생산에 사용된다(Rooney and Waniska 2000; Chang and Park 2005; 김 등 2013). 또한 유용 성분인 페놀화합물, 식물스테롤, 폴리코사놀, 탄닌을 다량 함유하여 항산화, 항염 및 항암 활성에 효과가 있으며, 콜레스테롤을 낮추어 심혈관계 질환에 효과적이다(Dykes *et al*. 2009; Ryu *et al*. 2016). 국내 수수 소비량의 90% 이상은 혼반용으로 이용되고 있으며 다른 곡류를 섞어 만든 선식이나 만성 기침, 천식에 효과적인 조청이나 차의 형태로도 많이 섭취되고 있다(최와 박 2015; 방 등 2017). 또한, 밀, 호밀, 보리 등에 들어있는 gluten 성분에 알레르기 반응으로 소화장애가 일어나는 셀리악 환자들을 위한 대체재로써 수수를 이용한 gluten-free 빵, 쿠키, 시리얼 등 다양한 식품의 원재료로 사용된다(Schober *et al*. 2007).

수수는 기능성 식품과 바이오 에너지의 잠재적인 소재로 세계적으로 주목 받고 있으며, 국내의 좁은 재배면적과 화석연료 수입국가로서 앞으로 수수의 수요가 증가할 것으로 전망되는 등 미래에는 국내 유전자원에서 차지하는 비중이 높아질 전망이다(윤 등 2010). 일본, 중국 인도, 인도네시아, 말리, 미얀마 등 감마선을 이용한 수수 돌연변이 육종을 통해 단간, 조숙, 저항성, 고수량성, 종피변이 등 원품종과 비교하여 우수한 형질을 지닌 다양한 유전자원을 구축하여 세계적인 경쟁력을 갖추고 있다(Human *et al*. 2006; Anand and Kajjidoni 2014; Htun *et al*. 2015). 그러므로 국내 재배에 불리한 수수 유전자원에 대해 전통육종과 돌연변이 육종을 통한 품종개량으로 다양한 유전자원을 육성할 뿐만 아니라 생명공학기술 연구의 활발한 진행을 통해 수수의 돌연변이 육종에 유용하게 사용될 수 있는 기반이 필요하다.

1930년대부터 시작된 식물 돌연변이 육종은 자연상태에서 발생 빈도가 낮은 유전적 변이를 인위적으로 유기시켜 유용한 형질을 가진 식물을 만드는 것으로, 다양성이 제한적인 식물종에 대한 신규 유전자원의 확보에 장점이 있으며(강 2014), 원품종의 우량형질을 보존하면서 새로운 유용형질이 추가된 신품종 창출에 유리한 측면이 있다(Kimura and Ohta 2014; Lee *et al*. 2016). 돌연변이 육종에 사용되는 돌연변이원으로 엑스선, 감마선, 이온빔 등과 같은 물리적 돌연변이원과 EMS, MNU, EI 등과 같은 화학적 돌연변이원이 있다. 이 중 물리적인 돌연변이원은 취급이 쉽고, 종자, 화분, 배양체, 식물체 등 다양한 종류의 식물조직에 적용이 가능하다. 반면 화학적 돌연변이원은 종자번식식물에서 많이 사용되며, 돌연변이율과 재현성이 높고 여러 종류의 돌연변이가 유발된다. 하지만 대부분의 물질이 인체에 유해한 발암물질로 분류되고, 휘발성이 강하고 발암물질이므로 다루기 어려우며, 폐액 처리가 어려운 단점이 있다(배 등 2005; 류 등 2012). 물리적 돌연변이원 처리 시에는 작물 및 품종에 따라 변이율과 폭이 다르므로 돌연변이 집단 전개에 앞서 돌연변이 유기를 위한 적정 조사선량의 규명이 필요하

Table 1. Ten selected sorghum accessions for this study

No.	Name	Origin	Heading date	Plant height (cm)	Sugar content (Brix°)	Seed yield (kg · ha^{-1})
1	DINE-A-M	Unknown	12th Aug.	307.5d	15.5b	682d
2	IS645	United State	8th Aug.	321.6c	14.1a	792c
3	IS2868	South Africa	5th Aug.	274.5f	13.1c	1232a
4	Moktak	Korea	9th Aug.	308.9d	12.3d	713cd
5	Banwoldang	Korea	27th Jul.	371.5a*	9.5g	1144ab
6	ChalI	Korea	8th Aug.	372.6a	10.5f	660d
7	ChalII	Korea	30th Jul.	361.2a	12.4d	618e
8	KLSO79125	Korea	5th Aug.	312.8d	11.2e	614e
9	KLSO79075	Korea	26th Jul.	268.4f	12.6d	770c
10	Mesusu	Korea	8th Aug.	342.5b	12.1d	968b

*a,b,c,d,e: Duncan's multiple range test at 5% level.

며(Misra *et al*. 2003; Lee *et al*. 2016), 적정 선량의 결정에는 M_1 세대에서 생존율과 생장률이 주요 선발인자로 활용되고 있다(Cvejic *et al*. 2011; Kang *et al*. 2003).

본 연구에서는 농촌진흥청 유전자원센터에서 분양 받은 30개의 수수 품종과 계통에서 국내 재배에 적합한 7개 품종(IS645, IS2868, Moktak, Banwoldang, ChalI, ChalII, Mesusu)과 3개 계통(DINE-A-M, KLSO79125, KLSO79075)의 종자에 대하여 각 선량별로 감마선 조사 후 M_1 세대 초기 생장특성 조사를 통해 돌연변이 유도에 필요한 적정 감마선량을 규명하고 M_2 세대에서의 유용한 형질인 바이오매스 증가, 종자수량 증가, 조숙, 단간 등 육종적 가치가 높은 계통 구축에 필요한 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사시료 선정 및 감마선조사

2013년 농촌진흥청(Rural Development Administration, RDA) 유전자원센터에서 분양 받은 30개 품종 및 유전자원의 종자를 대상으로 한국원자력연구원 육종시험포장에서 2년간 증식하여 채종이 가능한 품종 및 계통을 선별하여 감마선 조사에 사용하였다(Table 1). 감마선 조사는 한국원자력연구원의 감마선(^{60}Co) 저준위 조사시설에서 24시간 동안 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 1000 Gy의 조사선량으로 처리하였다.

2. 감마선 처리 종자의 발아율 및 초기 생육조사

원예용 상토(홍농 1호)를 넣은 파종트레이(5×10)에 선량별 감마선 처리 종자를 50립씩 2반복 파종하였다. 발아율 검정에서는 파종 14일 후 유묘가 0.2 cm 이상 돌출한 것을 발아로 간주하였으며, 생존율 검정은 파종 30일 후 고사하지 않고 본엽이 출현한 개체를 기준으로 하였다. 생육특성 조사는 파종 후 30일 생존 개체를 대상으로 선량별 20개체를 무작위로 선정하여 초장, 엽수, 분얼 수, 생체중을 측정하였다.

3. M_2 세대 생육특성 및 돌연변이 계통 선발

처리 선량별 종자를 맺은 각각의 M_1 개체로부터 개체당 2~3립씩 종자를 채종하여 pooling한 M_2 종자를 20×60 cm 간격으로 300립씩 파종하였고, 각 선량별 우수한 돌연변이 계통으로 선발된 개체로부터 출수기, 초장, 수장, 경직경, 수당립수, 당도, 돌연변이 양상을 조사하였다. 바이오매스가 증대된 계통과 종자수량 증가, 기타 형태적 돌연변이가 일어난 계통을 개체수확하여 선발하였다.

4. 통계처리

생장 특성 결과의 유의성 검정은 Duncan's multiple range test ($P<0.05$)로 하였다. LD_{50} 및 RD_{50} 선량의 결정은 생장값의 단순선형회귀분석(simple linear regression analysis)으로 추정하였다. 모든 통계처리는 SPSS Ver. 22 (SPSS Inc., USA)를 이용하였다.

결 과

1. M_1 세대 초기 생육특성 및 적정 조사선량 결정

감마선을 이용하여 수수의 돌연변이 유도에 적합한 조사선량의 범위를 규명하고자 조사된 종자에 대하여 파종 후 발아율, 생존율 및 초기생육(초장, 엽수, 근장, 생체중)을 조사하였다. 발아율을 조사한 결과, DINE-A-M은 200 Gy 이상 처리구에서 대조구와 비교하여 유의적으로 발아율이 감소하였으며($P<0.05$), 나머지 9개 품종 및 계통에서는 300 Gy 이상의 처리구에서 발아율이 감소하였다(Table 2). 모든 처리구는 500 Gy 이하의 선량에서는 발아하였지만, 600 Gy 이상의 선량에서는 모두 발아하지 못하였다. 파종 30일 후 생존율을 조사한 결과, Moktak, Banwoldang, KLSO79125는 100 Gy 이상 처리구에서 유의적으로 생존율이 감소하였고

($P<0.05$), DINE-A-M, IS645, ChalI, ChalII, KLSO79075, Mesusu는 200 Gy 이상 처리구에서 대조구와 비교하여 유의적으로 감소하였으며, IS2868은 타 처리구보다 높은 300 Gy 이상의 선량에서 생존율이 감소하였다(Table 3). Moktak, KLSO79125는 300 Gy 이상의 처리구에서는 생존하지 못하였고 타 품종과 계통의 처리구에서는 5~69% 생존하였다. 400 Gy 이상의 선량에서는 IS2868, Banwoldang의 처리구에서만 각각 41%, 5% 생존하였다.

생존율을 기준으로 측정한 LD_{50} 선량은 DINE-A-M, IS645, IS2868, Moktak, Banwoldang, ChalI, ChalII, KLSO79125, KLSO79075, Mesusu에서 각각 240 Gy, 226 Gy, 335 Gy, 180 Gy, 215 Gy, 213 Gy, 232 Gy, 182 Gy, 288 Gy, 275 Gy으로 나타났다(Fig. 1). 생장요소별 측정된 값을 단순선형회귀분석으로 각각에 대한 대조구 생장과 비교하여 50%가 저해된 선량(RD_{50})을 부위별로 추정한 결과, 초장의 RD_{50} 값은 최저 155 Gy (KLS079125), 최고 257 Gy (IS2868)로 평균 198 Gy였다(Table 4). 엽수의 RD_{50} 값은 174 Gy (KLSO79075)에서 382 Gy (IS2868) 사이로 평균 252 Gy로 나타났다. 근장은 최저 194 Gy (Banwoldang), 최고 324 Gy (IS2868)로 평균 RD_{50} 값은 237 Gy였다. 생체중은 143 Gy (Moktak)에서 211 Gy (IS2868) 사이로 평균 RD_{50} 값은 177 Gy로 나타났다. 위의 결과, IS2868에서 LD_{50}과 RD_{50} 선량 값이 가장 높게 나타났다.

M_1 세대의 초기 생육의 변화를 부위별로 조사한 결과, KLSO79125는 100 Gy 이상 처리구에서 대조구와 비교하여 초장이 유의적으로 감소하였으며, 나머지 처리구에서는 200 Gy 이상의 선량에서 감소하였다. IS2868, Moktak, ChalI, KLSO79125의 엽수는 100 Gy 이상 처리구에서 대조구와 비교하여 유의적으로 감소하였고, DINE-A-M, Banwoldang, ChalII, KLSO79075, Mesusu는 200 Gy 이상 처리구에서 감소하였으며, IS645는 가장 높은 선량인 300 Gy 이상 처리구에서 감소하였다. IS645의 근장은 100 Gy 이상 처리구에서 대조구와 비교하여 유의적으로 감소하였으며, DINE-A-M, Banwoldang, ChalI, KLSO79075는 200 Gy 이상 처리구에서 감소하였고, IS2868, ChalII, Mesusu는 300 Gy 이상의 처리구에서 감소하였다. Moktak의 생체중은 100 Gy 이상의 처리구에서 대조구와 비교하여 감소하였으며, DINE-A-M, IS2868, Banwoldang, ChalI, ChalII, KLSO79125, KLSO79075, Mesusu는 200 Gy 이상 처리구에서 대조구와 비교하여 유의적으로 감소하였다. 위 결과, 모든 처리구에서 감마선 선량이 증가함에 따라 대조구에 비해 생육이 저해되었다(Table 5).

2. M_2 세대 생육특성 및 돌연변이

감마선 조사한 품종 각각의 M_1 개체마다 2~3립씩 종자를 수확하여 pooling하였다. M_2 세대 계통은 각 선량별 300립씩 10,000여 개체를 전개하여 바이오매스 증가 23계통, 종자수량 증가 3계통 기타 형태적 돌연변이(종피색, 압경형, 단간) 20계통을 선발하였다(Fig. 2 and Table 6).

M_2 세대에서 원품종 대비 우수한 형질을 보이는 돌연변이 개체선발 결과, DINE-A-M는 100 Gy 처리구에서 5개 계통이 선발되었다. 각 형질별로 초장 380~319 cm, 수장 26~36 cm, 엽수 9~11개, 당도 9.7~13.6 Brix°로 원품종과 비교하였을 때 대부분 증가하였고, 줄기 직경은 선발된 모든 계통에서 2배 이상 증가하였으며, 형태적인 특이성으로 바이오매스 증가, 수형의 변화, 종자수량 증가, 종피변이가 확인되었다.

IS645는 100 Gy와 200 Gy 계통에서 10개 계통이 선발되었으며, 초장 252~480 cm, 수장 24~58 cm로 원품종과 비교하여 대부분 증가하였다. 엽수(6~12개)와 당도(10.5~16.1 Brix°)는 전체적으로 감소하였지만 8-200 Gy-2 계통은 당도가 원품종과 비교하여 증가하였고, 8-200 Gy-1 계통은 줄기에 수분이 없었다. 줄기 직경은 15.32~30.7 cm로 모든 계통에서 원품종과 비교하여 2~4배 증가하였으며, 형태적인 특이성으로 바이오매스 증가, 압경형, 종피변이, 수형변화가 발견되었다.

IS2868는 100 Gy와 400 Gy 계통에서 4개 계통이 선발되었으며, 초장 270~378 cm로 원품종과 비교하여 감소하였으며, 수장 18~43 cm, 엽수 8~12개, 당도 12.1~16.9 Brix°로 원품종과 비교하여 근소하게 감소하거나 증가하였고, 17-100 Gy-1 계통은 줄기에 수분이 없었다. 줄기 직경은 20.05~24.63 cm로 원품종에 비교하여 약 3배 증가였으며, 형태적인 특이성으로는 바이오매스 증가, 종자수량 증가와 다수의 분얼수가 확인되었다.

Moktak은 100 Gy 계통에서 한 개 계통이 선발되었으며 초장, 수장, 줄기 직경, 엽수, 당도가 원품종과 비교하여 모두 증가한 바이오매스 증가 계통이었다.

Banwoldang은 100 Gy, 200 Gy, 400 Gy 계통에서 15개 개체가 선발되었으며, 초장 217~443 cm, 수장 19~42 cm, 엽수 8~16개, 당도 4.1~17.5 Brix°로 나타났으며, 줄기 직경은 18.62~34.53 cm로 원품종과 비교하여 2배 이상 높게 나타났다. 형태적인 특이성으로는 종피변이, 종자수량 증가, 압경형, 바이오매스 증가, 단간이 관찰되었다.

ChalI은 100 Gy와 200 Gy에서 5개 계통이 선발되었고 초장 305~465 cm, 수장 40~46 cm, 엽수 11~13개, 당도 6.2~16.4 Brix°로 전체적으로 증가하였다. 줄기 직경 20.0~24.63 cm로 원품종에 비해 3배 이상 높게 나타났으며, 형태적인 특성으로는 바이오매스 증가와 긴 수장이 관찰되었다.

ChalII는 100 Gy 계통에서 한 개체가 선발되었으며, 초장, 수장, 엽수, 당도 모두 원품종과 비교하여 감소하였지만, 줄기 직경은 약 3배가 증가하였고, 수형이 압경형인 형태적인

Table 2. Germination rates of gamma-rays irradiated sorghum seeds with different doses

	Germination rate (%)									
Dose (Gy)	DINE-A-M	IS645	IS2868	Moktak	Banwoldang	ChalI	ChalII	KLSO79125	KLSO79075	Mesusu
0	95.0±1.0a*	94.7±0.9a	98.3±0.9a	96.0±0.6a	94.3±0.7a	95.0±1.0a	94.7±0.9a	97.7±1.2a	98.7±0.7a	98.7±0.7a
100	95.3±0.3a	94.7±0.3a	97.0±1.5a	95.3±0.3ab	93.7±0.9a	94.7±0.7a	95.0±0.6ab	95.3±0.3a	96.7±1.7a	96.3±1.9a
200	89.3±0.3b	92.0±1.2a	95.3±1.8ab	94.3±1.9ab	92.3±1.2a	91.0±0.6a	90.3±0.9ab	92.7±1.5a	94.7±2.4a	94.3±2.7a
300	82.0±1.2c	83.0±0.6b	90.3±0.9b	90.0±1.0b	82.3±1.2b	83.7±0.3b	81.7±1.5b	87.3±1.2b	84.0±3.1b	84.0±3.1b
400	64.3±2.3d	71.3±1.9c	76.0±2.1c	74.3±3.0c	72.0±1.5c	71.0±1.0c	64.7±2.6c	69.3±2.3c	66.0±2.1c	66.0±2.1c
500	3.3±3.3e	48.7±3.4d	50.0±3.2d	47.0±2.1d	44.7±3.3d	48.0±2.1d	33.0±4.0d	26.0±2.3d	46.7±2.2d	46.7±2.2d

*a,b,c,d,e: Duncan's multiple range test at 5% level, values in each column are mean±S.E. (n=3).

Table 3. Survival rate of gamma-rays irradiated sorghum seeds with different doses

	Survival rate (%)									
Dose (Gy)	DINE-A-M	IS645	IS2868	Moktak	Banwoldang	ChalI	ChalII	KLSO79125	KLSO79075	Mesusu
0	99.0±0.6a*	99.3±0.7a	99.3±0.7a	99.3±0.7a	98.7±0.7a	99.3±0.7a	100±0.0a	97.7±1.5a	98.3±0.3a	100±0.0a
100	96.6±1.2a	99.7±0.3a	98.7±0.9a	85.3±2.7b	91.3±0.7b	98.3±0.9a	99.3±0.3a	84.3±2.3b	92.3±1.5ab	95.3±3.2a
200	85.0±2.9b	80.3±1.5b	98.7±0.3a	55.3±2.0c	42.0±1.5c	66.3±0.9b	80.0±2.0b	59.0±3.8c	86.3±1.3b	83.7±3.5b
300	24.0±3.1c	8.3±0.9c	65.3±1.8b	0.0±0.0d	15.3±2.9d	5.0±2.5c	15.7±3.4c	0.0±0.0d	69.0±3.8c	59.0±2.1c
400	0.0±0.0d	0.0±0.0d	41.0±0.6c	0.0±0.0d	5.3±0.7e	0.0±0.0d	0.0±0.7d	0.0±0.0d	0.0±0.0d	0.0±0.0d

*a,b,c,d,e: Duncan's multiple range test at 5% level, values in each column are mean±S.E. (n=3).

Table 4. The median reduction dose (RD_{50}) values for gamma irradiation

Traits	RD_{50} (Gy) of lines										Mean
	DINE-A-M	IS645	IS2868	Moktak	Banwoldang	ChalI	ChalII	KLSO79125	KLSO79075	Mesusu	
Plant height	206	201	257	158	165	181	210	155	217	229	198
Number of leaves	235	260	382	203	235	261	242	174	252	272	252
Root length	212	225	324	227	194	224	226	200	265	268	237
Fresh weight	179	175	211	143	174	164	175	159	199	195	177

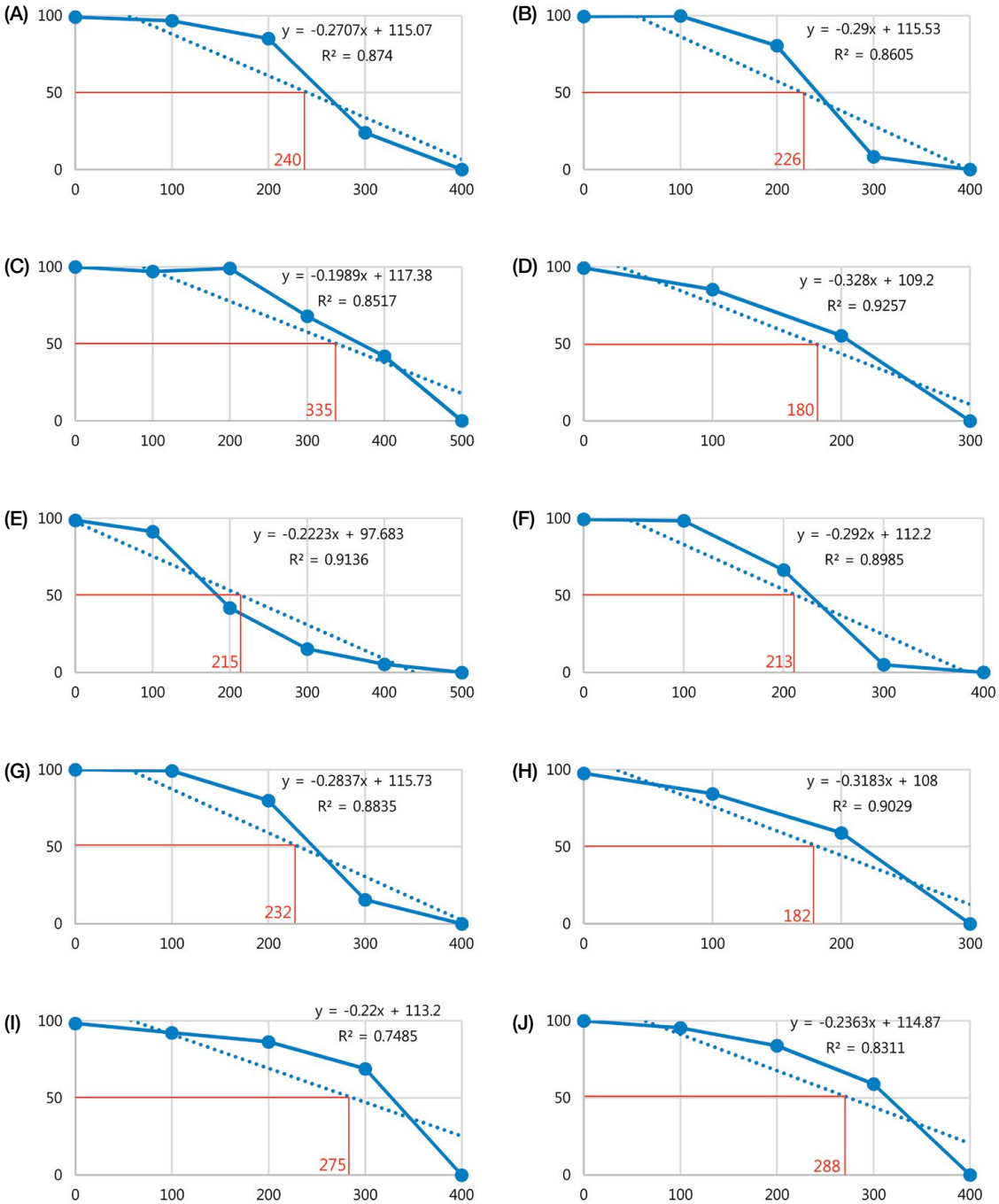

Fig. 1. Median lethal dose (LD_{50}) values of selected sorghum cultivars. A, DINE-A-M; B, IS645; C, IS2868; D, Moktak; E, Banwoldang; F, ChalI; G, ChalII; H, KLSO79125; I, KLSO79075; J, Mesusu.

특성을 띄었다. KLSO79125은 100 Gy 계통에서 한 개체 선발되었으며, 초장과 당도는 감소하였지만, 줄기 직경이 5배 증가하였으며, 엽수는 변화가 없었고, 바이오매스가 증가한 형태적 특성이 나타났다.

KLSO79075는 400 Gy 계통에서 한 개체 선발되었다. 초장, 수장 및 엽수가 감소하였으며, 줄기에 수분이 없고 단간인 형태적 특성을 나타냈지만 줄기 직경은 2배 이상 증가하였다.

Mesusu는 100 Gy, 200 Gy 계통에서 5개 개체를 선발하였으며, 초장 320~431 cm, 수장 35~46 cm, 엽수 8~12개로 전체적으로 증가하였고, 당도는 원품종과 비교하여 모든 계통에서 감소하였다. 줄기 직경은 모든 계통에서 3배 이상 증가하였으며, 바이오매스 증가, 종자수량 증가, 종피변이가 나타났다.

Table 5. Growth characteristics of gamma-rays irradiated sorghum seeds with different doses

Dose (Gy)	DINE-A-M	IS645	IS2868	Moktak	Banwoldang	ChalI	ChalII	KLSO79125	KLSO79075	Mesusu
					Plant height (cm)					
0	37.3±4.2a*	35.0±5.0a	34.7±0.6a	33.0±1.0a	36.0±6.6a	38.3±5.1a	33.3±5.8a	32.7±1.2a	33.0±2.0a	34.0±1.0a
100	36.7±4.2a	32.0±9.5a	35.3±0.6a	25.0±7.0a	28.0±9.0a	33.3±4.2a	33.0±6.1a	25.0±5.0b	32.0±3.5a	33.7±3.2a
200	19.0±3.6b	19.0±4.4b	22.0±3.6b	11.7±7.5b	6.7±2.1b	11.8±3.0b	19.0±3.5b	9.7±4.5c	16.7±5.7b	21.0±5.3b
300	3.7±0.6c	2.3±0.6c	10.3±6.0c	0.0±0.0c	2.3±0.6b	2.3±0.6c	3.0±1.0c	0.0±0.0d	8.3±3.8c	9.7±5.1c
400	0.0±0.0d	0.0±0.0d	4.7±1.8c	0.0±0.0c	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0c	0.0±0.0d	0.0±0.0d	0.0±0.0d
					Number of leaves (ea)					
0	6.3±0.6a	5.7±1.2a	5.3±0.6a	6.0±0.0a	6.0±0.0a	6.3±0.1a	6.0±1.0a	6.0±0.0a	5.3±0.6a	5.3±0.6a
100	5.7±0.6a	5.7±0.6a	4.7±0.6b	5.3±0.6b	5.3±1.2ab	5.7±0.6b	5.7±0.6ab	5.3±0.6b	5.3±0.6a	4.7±0.6ab
200	4.7±0.6b	5.3±0.6a	4.7±0.6b	4.7±0.6c	4.3±1.2b	5.0±0.0c	4.7±0.6b	2.7±1.2c	4.3±0.6b	4.3±0.6b
300	2.0±0.0c	2.0±0.0b	4.0±1.0b	0.0±0.0d	2.0±0.0c	2.0±0.0d	2.0±0.0c	0.0±0.0d	2.0±0.0c	3.3±0.6c
400	0.0±0.0d	0.0±0.0c	2.0±0.0c	0.0±0.0d	0.0±0.0d	0.0±0.0e	0.0±0.0d	0.0±0.0d	0.0±0.0d	0.0±0.0d
					Root length (cm)					
0	21.7±1.5a	21.5±0.6a	17.3±2.3a	13.7±1.5a	15.7±5.1a	15.0±1.0a	20.7±1.5a	14.7±3.1a	16.7±2.1a	17.3±2.3a
100	19.0±2.0a	19.1±1.6b	16.0±2.0a	15.3±4.2a	14.7±5.8a	13.0±1.7ab	17.3±4.6a	14.3±4.5a	17.3±1.2a	16.0±2.0a
200	14.0±4.0b	18.7±1.8b	14.3±3.1ab	12.0±5.6a	5.3±1.2b	11.0±2.6b	18.0±6.1a	12.0±3.6a	13.0±1.7b	16.0±4.6a
300	3.0±0.6c	2.4±0.2c	8.3±3.2c	0.0±0.0b	2.2±0.8b	3.3±1.2c	2.9±0.6b	0.0±0.0b	8.2±2.4c	7.1±1.2b
400	0.0±0.0d	0.0±0.0d	10.0±1.0bc	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0d	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0d	0.0±0.0c
					Fresh weight (g/three plants)					
0	3.7±0.6a	3.4±0.5a	3.2±0.5a	3.3±0.2a	3.6±0.2a	3.1±0.5a	3.4±0.5a	3.6±0.1a	3.1±0.5a	3.2±0.5a
100	3.0±1.7a	2.8±1.9a	2.8±0.7a	2.4±0.2b	3.0±0.3a	2.6±0.6a	2.8±1.9a	3.2±1.5a	2.8±0.8a	2.8±0.7a
200	1.1±0.3b	1.0±0.5a	1.2±0.2b	0.6±0.1b	1.0±0.5b	0.4±0.1b	1.0±0.5b	0.9±0.2b	1.5±0.5b	1.4±0.6b
300	0.3±0.1c	0.1±0.0c	0.4±0.1c	0.0±0.0c	0.2±0.0c	0.1±0.0c	0.2±0.0c	0.0±0.0c	0.3±0.1c	0.4±0.1c
400	0.0±0.0c	0.0±0.0c	0.2±0.1c	0.0±0.0c	0.0±0.0d	0.0±0.0c	0.0±0.0d	0.0±0.0c	0.0±0.0d	0.0±0.0d

*a,b,c,d: Duncan's multiple range test at 5% level, values in each column are mean±S.E. (n=3).

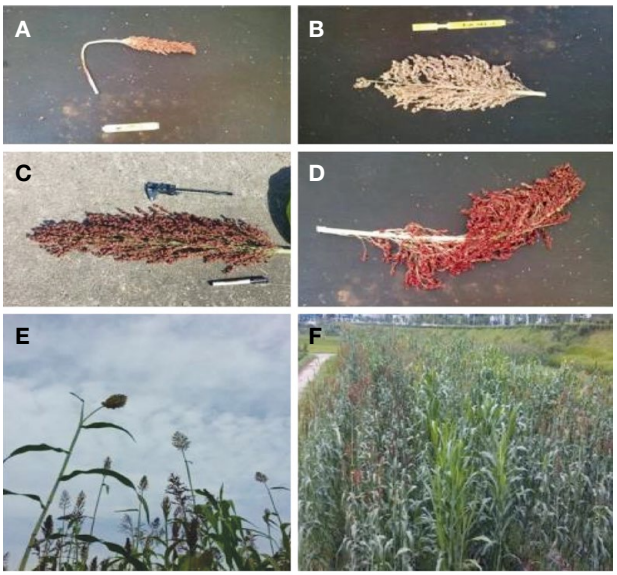

Fig. 2. A part of selected sorghum mutant lines. A, Goose neck; B, Head shape and color (white) change; C, High seed yield (high biomass); D, Seed color change (Red); E, High biomass; F, Heading date delayed (high biomass).

종합적으로, 선발된 모든 계통에서 원품종과 비교하여 줄기 직경이 2배 이상 증가하였으며, 바이오매스가 증가한 수수 계통의 경우 대부분 출수기가 원품종에 비해 지연되었고, 바이오매스가 증대된 계통 중 4개 계통(8-100 Gy-1, 8-100 Gy-4, 12-100 Gy-4, 30-100 Gy-1)은 수장이 크게 증가하면서 종자 수량도 향상되었다.

고 찰

선량별로 각각 100립의 수수 종자에 감마선 조사를 실시한 결과, 모든 선량별 처리구에서 500 Gy까지 발아하였다. 하지만 Moktak은 300 Gy 이상 처리구는 발아 후 고사하였고 IS2868, Banwoldang은 가장 높은 선량인 400 Gy 선량에서 발아 후 생존하였다. 500 Gy 이상 모든 처리구에서는 개체가 발아는 하였지만 전부 고사하였다. 이처럼 높은 선량이 조사된 식물이 발아율이 낮아지고 고사하는 현상은 화본과 식물인 보리(Borzouei *et al*. 2010)와 귀리(류 등 2016), 콩과 식물인 렌틸(Lee *et al*. 2016)과 감초(류 등 2014) 등 다양한 식물종에서 관찰되는 것이 보고되어있다.

돌연변이 유도를 위한 감마선의 적정 조사선량의 결정은 M_1 세대에서 단순히 발아율과 생장률을 조사하는 것이 아니라 생육감소가 30~50% 생존율 40~60% 정도가 바람직한 조사선량으로 보고되어있다(Ryu *et al*. 2012; Lee *et al*.

Table 6. Growth, sugar content, and characteristics of M_2 lines

Number	Line	Plant height (cm)	Head length (cm)	Stem diameter (mm)	Number of leaves (ea)	Sugar content (Brix)	Characteristics
DINE-A-M		325	33	10.75	10	15.5	–
1	3-100 Gy-1	380	33	22.82	9	13.6	High biomass
2	3-100 Gy-2	335	26	22.6	10	12.5	Head shape mutation
3	3-100 Gy-3	319	30	20.17	9	10.5	High grain yield
4	3-100 Gy-4	365	36	21.78	11	9.7	High biomass
5	3-100 Gy-5	354	34	21.16	10	10.1	Pericarp mutation
IS645		337	31	8.75	12	14.2	–
6	8-100 Gy-1	480	58	30.7	11	13	High biomass
7	8-100 Gy-2	460	40	23.76	9	13	High biomass
8	8-100 Gy-3	252	24	18.66	6	11.2	Goose neck
9	8-100 Gy-4	445	53	26.46	9	11.7	High biomass
10	8-100 Gy-5	443	44	30.45	12	16	High biomass
11	8-100 Gy-6	342	40	23.06	10	13.8	Pericarp mutation
12	8-100 Gy-7	430	40	28.85	8	12.5	High biomass
13	8-100 Gy-8	347	40	20.76	9	10.5	Goose neck
14	8-200 Gy-1	245	30	15.32	8	–	Pericarp mutation
15	8-200 Gy-2	391	30	28.13	11	16.1	Head type mutation
IS2868		383	37	7.55	9	14.4	–
16	17-100 Gy-1	270	18	20.26	8	–	Warpage
17	17-400 Gy-1	345	42	24.63	9	16.9	Multi tillering
18	17-400 Gy-2	378	40	23.96	10	12.1	High biomass
19	17-400 Gy-3	347	43	20.05	12	14.9	High grain yield
Moktak		308	27	8.5	11	12.9	–
20	19-100 Gy-1	420	37	28.07	14	15.3	High biomass
Banwoldang		384	36	11.6	10	8.4	–
21	20-100 Gy-1	372	26	24.45	9	17.5	Pericarp mutation
22	20-100 Gy-2	443	40	27.86	9	8.4	High biomass
23	20-100 Gy-3	414	35	25.92	10	5.1	High biomass
24	20-100 Gy-4	373	28	28.4	9	6	Warpage
25	20-100 Gy-5	357	37	26.27	10	14.6	Dwarf
26	20-200 Gy-1	425	42	24.13	16	7.3	High biomass
27	20-200 Gy-2	304	23	20.59	8	12	Goose neck
28	20-200 Gy-3	398	38	22.6	9	10.9	High biomass
29	20-200 Gy-4	320	31	21.1	11	10.5	Pericarp mutation
30	20-400 Gy-1	365	33	23.22	9	4.1	High biomass
31	20-400 Gy-2	342	32	34.53	10	6.7	High grain yield
32	20-400 Gy-2	412	37	21.58	10	10.8	High biomass
33	20-400 Gy-4	217	19	18.62	8	8.7	Dwarf
ChalI		391	39	10.9	11	6.6	–
34	12-100 Gy-1	408	40	23.24	11	11.4	High biomass
35	12-100 Gy-2	443	41	24.4	11	7	High biomass
36	12-100 Gy-3	468	46	24.27	11	6.2	High biomass
37	12-100 Gy-4	445	46	20.38	11	12.4	High biomass
38	12-200 Gy-1	305	46	26.98	13	16.4	Long neck
ChalII		401	38	8.8	10	14	–
39	21-100 Gy-1	302	36	23.67	9	13.4	Goose neck
KLSO79125		369	34	5.5	11	17.3	–
40	28-100 Gy-1	352	38	24.93	11	13.3	High biomass
KLSO79075		323	33	6.55	12	13.1	–
41	29-400 Gy-1	200	20	15.07	8	–	Dwarf
Mesusu		342	32	8.65	10	12.6	–
42	30-100 Gy-1	431	46	26.2	12	6.6	High biomass
43	30-100 Gy-2	370	35	25.32	8	4.1	High grain yield
44	30-100 Gy-3	320	36	25.66	10	5.3	Pericarp mutation
45	30-200 Gy-1	350	35	28.57	10	6	High biomass
46	30-200 Gy-2	350	35	26.17	11	7.9	High biomass

2016). 수수의 발아율을 기준으로 LD_{50} 선량을 확인한 결과, 최고 335 Gy (IS2868)에서 최저 182 Gy (KLSO79125) 사이로 평균 239 Gy로 나타났으며, 대조구와 비교하여 50% 생장이 저해된 RD_{50}을 확인한 결과 최고 211 Gy (IS2868), 최저 143 Gy (Moktak) 사이로 평균 177 Gy로 나타났고, 위 결과로 미루어 볼 때, 적정 조사선량은 Moktak과 KLSO79125는 180 Gy, DINE-A, IS645, Banwoldang, ChalI, ChalII는 200 Gy, KLSO79075와 Mesusu는 250 Gy, IS2868은 300 Gy로 판단된다. 기존 연구에서 밝혀진 수수의 LD_{50} 선량인 504 Gy (Huma *et al*. 2006)와 비교하여 낮았다. 수수가 속해있는 벼목 화본과 작물에서 보고된 감마선에 대한 LD_{50} 선량은 귀리 392 Gy (류 등 2016), 수단그라스 307~345 Gy (Golubinova and Gecheff 2011), 옥수수 700 Gy (Marcu *et al*. 2013), 벼 300 Gy (Yamaguchi *et al*. 2009)로 종간에 차이가 크다. 이와 같은 감마선 감수성에 대한 식물 종간 및 종내 차이의 주요 원인으로는 유전체의 크기 및 배수성, 과산화수소를 제거하는 능력, 조사 시료의 수분함량 등을 들 수 있다(Wada *et al*. 1998; Irfaq and Nawab 2001; 은 등 2007).

M_1 세대에서 pooling한 M_2 종자를 선량별로 300립씩 시험포장에 전개하여 바이오매스 증가 계통, 종자수량 증가 계통, 기타 형태적 돌연변이(종피색, 압경형, 종피변이, 단간, 수형변화) 우수 계통을 선발하였다.

결 론

본 연구에서는 국내 재배 환경에 우수한 적응성을 보인 수수[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]를 대상으로 감마선에 대한 발아율과 생존율 및 초기 생육 특성을 파악하여 돌연변이 유도를 위한 적정 방사선선량을 규명하였다. 감마선 조사된 M_1 세대 계통의 LD_{50}과 RD_{50} 선량을 기준으로 결정한 수수의 적정 조사선량은 180 Gy (Moktak, KLSO79125), 200 Gy (DINE-A, IS645, Banwoldang, ChalI, ChalII), 250 Gy (KLSO79075, Mesusu), 300 Gy (IS2868)로 판단되었다. M_2 세대 진전을 통한 선발 결과 총 46개의 우수한 계통을 선발하였지만, 다수의 동일 M_2 개체에서 반복적으로 확인한 결과가 아니므로 재배과정과 형질조사 중 오류가 발생할 수 있다. 그러므로 동일 M_1 유래 M_2 계통의 대량 재배와 M_3 이상의 반복적인 세대진전을 통해 각각의 개체마다 특성의 재현 여부를 확인할 필요가 있다. 선발된 개체들은 세대진전을 통해 기능성 식품, 산업용 소재 및 바이오 에탄올의 원료 등 유용 유전자원으로 활용 가능할 것이다.

본 연구결과로 추정된 적정 선량은 수수 돌연변이 육종을 위한 기초 자료로 활용될 것이며, 수수 유전자원의 방사선 육종을 통해 종자수량 증가, 바이오매스 증가, 조기출수 등 우량 신품종 수수 개발 및 수수 육종 및 재배 저변 확대에 기여할 것이다.

사 사

이 논문은 한국원자력연구원의 연구개발 프로그램과 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 자원을 받아 수행된 연구임(과제번호: NRF-2017M2A2A6A05018538).

참 고 문 헌

강시용. 2014. 돌연변이 기술을 이용한 원예작물 육종. 원예과학기술지. **32**(2):30-30.

김진영, 이수지, 하태정, 박기도, 이병원, 김상곤, 김용철, 최인수, 김선태. 2013. 국내 수수 종자 분석을 위한 프로테오믹스-기반 바이오마커 개발. 한국환경농학회지. **32**(1):48-54.

류재혁, 권순재, 임승빈, 정상욱, 안준우, 김진백, 최기춘, 김원호, 강시용. 2016. 감마선 조사가 귀리(*Avena sativa*)의 감수성에 미치는 영향. 한국자원식물학회지. **29**(1):128-135.

류재혁, 소현수, 류재일, 권오도, 이영일, 진일두, 이효연, 배창휴. 2012. 방사선조사 유래의 조기출수 식물(*Oryza sativa* L.) 계통의 유전적 변이 분석. 한국자원식물학회지. **25**(1):142-151.

류재혁, 임승빈, 김동섭, 안준우, 김진백, 김상훈, 강시용. 2014. 감마선 조사가 감초(*Glycyrrhiza uralensis*)의 초기 생육 및 DNA 손상에 미치는 영향. 한국방사선학회지. **8**(2):89-95.

방예솔, 장은희, 정현정. 2017. 발아현미 선식의 품질 및 이화학적 특성. 한국식품과학회지. **49**(5):513-518.

배창휴, 채종서, 김재홍, 양태건, 류재일, 이효엽, 양덕춘. 2005. Neutron 빔조사 담배 및 식물체의 특성. 한국자원식물학회지. **18**(3):359-366.

안승현, 남상식, 방진기, 유창연, 최용환, 문윤호, 박선태, 차영록, 구본철, 박광근. 2012. 바이오에탄올 생산 유망작물 단수수 유전자원의 특성. 한국국제농업개발학회지. **24**(1):32-35.

윤성탁, 許震宇, 張慶宇, 김인숙, 김태호, 남중창. 2010. 수수 유전자원의 작물학적 특성. 한국작물학회지. **55**(1):83-90.

윤성탁, 정인호, 한태규, 김영중, 유제빈, 楊 景, 예민희, 백승우, 김건우. 2016. 우수자원 선발을 위한 수수(*Sorghum bicolar* L.) 유전자원의 특성평가. 한국자원식물학회지. **29**(4):479-494.

은종선, 김준수, 임환수, 한석교, 최소라, 장영석. 2007. 양성자 및 감마선 처리가 유채 M_1 세대의 감수성에 미치는 영향. 원예과학기술지. **25**(1):17-23.

최병한, 김성국, 송득영, 조성홍, 진문섭, 박근용. 1996. 수수 도입유전자원의 생육특성 및 종실 수량성. 한국국제농업개발학회지. **8**(2):143-150.

최정희, 박금순. 2015. 조청의 이용실태 및 선호도 연구. 동아시아식생활학회지. **25**(6):979-989.

Anand Y and Kajjidoni ST. 2014. Genetic enhancement of grain size and other productivity related traits through induced

variability in *kharif* sorghm. *Karnataka J. Agric. Sci.* **27**(2): 121-124.

Borzouei A, Kafi M, Khazaei H, Naseriyan B and Majdabadi A. 2010. Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestibum* L.) seedlings. *Pak. J. Bot.* **42**(4):2281-2290.

Chang HG and Park YS. 2005. Effects of waxy and normal sorghum flours on sponge cake properties. *Food Eng. Prog.* **9**(3):199-207.

Cvejić S, Afza R, Jocić S, Prodanović S, Miklič V, Škorić D and Dragin S. 2011. Radiosensitivity of sunflower inbred lines to mutagenesis. *Helia.* **34**(54):99-106.

Dykes L, Seitz LM, Rooney WL and Rooney LW. 2009. Flavonoid composition of red sorghum genotypes. *Food Chem.* **116**(1):313-317.

FAO. 2016. Crop prospects and food situation - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **4**:6-29.

Golubinova I and Gecheff K. 2011. M1 cytogenetic and physiological effects of gamma-rays in sudan grass [*Sorghum sudanense* (PIPER.) Stapf]. *Bulgarian J. Agric. Sci.* **17**(4):417-423.

Human S, Sihono S and Parno P. 2006 Application of mutation techniques in sorghum breeding for improved drought tolerance. *Atom Indonesia* **32**(1):35-43.

Htun KW, Min M and Win NC. 2015. Evaluation of genetic variability for agronomic traits in M_2 generation of sorghum through induced mutation. *IJTRA* **3**(6):145-149.

Iqbal A, Sadia B, Khan A, Awan F, Kainth R and Sadaqat H. 2010. Biodiversity in the sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) germplasm of Pakistan. *Genet. Mol. Res.* **9**(2):756-764.

Irfaq M and Nawab K. 2001. Effect of gamma irradiation on some morphological characteristics of three wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *J. Biol. Sci.* **1**(10):935-945.

Jahansouz MR, Afshar RK, Heidari H and Hashemi M. 2014. Evaluation of yield and quality of sorghum and millet as alternative forage crops to corn under normal and deficit irrigation regimes. *Jordan J. Agric. Sci.* **10**(4):699-715.

Kang EJ, Lee YM, Sung SY, Ha BK, Kim SH, Kim DS, Kim J-B and Kang SY. 2013. Analysis of the genetic relationship of gamma-irradiated in vitro mutants derived from standard-type chrysanthemum cv. Migok. *Hortic. Environ. Biotechnol.* **54**(1):76-81.

Kimura M and Ohta T. 1971. Protein polymorphism as a phase of molecular evolution. *Nature* **229**:467-469.

Lee MK, Ryu JH, Jeong SW, Kim JB, Kang SY and Kwon SJ. 2016. Radiosensitivity of lentil beam (*Lens culinaris* L.) to gamma-irradiation. *J. Radiat. Ind.* **10**(4): 211-217.

Marcu D, Damian G, Cosma C and Cristea V. 2013. Gamma radiation effects on seed germination, growth and pigment content, and ESR study of induced free radicals in maize (*Zea mays*). *J. Biol. Phys.* **39**(4):625-634.

Mehmood S, Orhan I, Ahsan Z, Aslan S and Gulfraz M. 2008. Fatty acid composition of seed oil of different Sorghum bicolor varieties. *Food Chemistry* **109**(4):855-859.

Misra P, Datta S and Chakrabarty D. 2003. Mutation in flower colour and shape of Chrysanthemum morifolium induced by γ-radiation. *Biologia Plantarum* **47**(1):153-156.

Palmer GH. 1992. Sorghum-food, beverage, and brewing potentials. *Process Biochemistry* **47**(3):145-153.

Park HS, Ko MS, Kim JT, Oh KW and Pae SB. 1999. Agronomic characteristics of common millet (*Panicum miliaceum* L.) varieties. *Korean J. Breed* **31**(4):428-433.

Rooney LW and Waniska RD. 2000. Sorghum food and industrial utilization. Sorghum: origin, history, technology, and production. John Wiley & Sons Inc, New York: 689-729.

Ryu JH, Im SB, Kwon SJ, Ahn JW, Jeong SW and Kang SY. 2016. Chemical and genetic diversity of high-seed-yield sorghum (*Sorghum bicolor* M.) germplasms. *Genet. Mol. Res.* **15**(3):gmr.15038677.

Ryu JH, So HS, Syu JI, Kwon OD, Lee YI, Jin ID, LEE HY and Bae CH. 2012. Genetic variation analysis of early-heading plant (*Oryza sativa* L.) lines derived from gamma-ray irradiation. *Korean J. Plant Res.* **25**(1):142-151.

Schober TJ, Bean SR and Boyle DL. 2007. Gluten-free sorghum bread improved by sourdough Fermentation: Biochemical, rheological, and microstructural background. *J. Agric. Food Chem.* **55**(13):5137-5146.

Shikazono N, Yokota Y, Tanaka A, Watanabe H and Tano S. 1998. Molecular analysis of carbon ion-induced mutations in Arabidopsis thaliana. *Genes Genet. Syst.* **73**(3): 173-179.

Wada H, Koshiba T, Matsui T and Satô M. 1998. Involvement of peroxidase in differential sensitivity to γ-radiation in seedlings of two Nicotiana species. *Plant Sci.* **132**(2): 109-119.

Yamaguchi H, Hase Y, Tanaka A, Shikazono N, Degi K, Shimizu A and Morishita T. 2009. Mutagenic effects of ion beam irradiation on rice. *Breeding Science* **59**(2):169-177.

Received: 24 January 2018
Revised: 23 February 2018
Revision accepted: 11 March 2018