

식물의 생물학적 시스템에 대한 방사선의 상호작용

최종일 · 김진규

Effect of Irradiation on the Biological System in Plants

Jong-il Choi · Jin-Kyun Kim

Received: 17 July 2013 / Accepted: 10 August 2013
© Korean Society for Plant Biotechnology

Abstract Research on the basic interaction of radiation with biological systems has contributed to human society through various applications in pharmaceutical, medicine, agriculture and other technological developments. In the agricultural sciences and food technology sectors, the last few decades have witnessed a large number of pertinent works regarding the utilization of radiation for evolution of superior varieties of agricultural crops of economic importance. This review presents general information about the effect of radiation on plant specificity, dose response, and benefits. There has been summarized of the effects observed after exposure and influenced by several factors including plant characteristics and radiation features. We also report on the effect of γ -irradiations on plants, focusing on metabolic alterations, modifications of growth and development and changes in biochemical pathways.

Keywords Biochemical aspect, Irradiation dose, Gamma ray, Development stage

서론

1896년 W.C. Roentgen에 의한 X-ray의 발견과, 1901년과 1903년에 돌연변이 발생의 개념을 주사위 돌연변이 이론

(Die mutations theorie)으로 보여주는 Hugo de Varies의 제안에 의해, 식물 육종 및 개량 분야에서 방사선 이용에 대한 기대가 제시되었다(Gaul 1958). 방사선 조사를 통한 성장증진 또는 이온화 방사선의 낮은 선량에 식물 또는 씨앗을 노출시킴으로써 식물 성장을 자극하는 첫 번째 시도는 1960년대(Sax 1963)로 거슬러 올라간다. 이로부터, 고준위 또는 저준위 이온화 방사선은 넓은 스펙트럼에 걸쳐 돌연변이를 유발시키는 것으로 예상되었으며, 이를 이용하여 농작물의 개량 분야에 광범위하게 이용되어졌다(Yamaguchi et al. 2003; Okamura et al. 2003; Zhou et al. 2006). 방사선 노출 후 유발된 식물 성장의 유리한 특성으로는 반왜성 성장, 조기 성숙, 높은 수확률, 질병에 대한 저항성 등이 있으며(Mei et al. 1994; Li et al. 2007), 그 밖의 다른 결과물들로부터 방사선은 식물의 갑작스런 유전적 변화의 출현 비율을 높일 수 있다는 가능성이 제시되었다(Muller 1927). 방사선 조사에 대한 변이의 증거와 식물에 대한 영향은 그 밖에도 많은 문헌을 통해 광범위하게 밝혀졌다. Johnson (1939) 은 원예작물의 70종에 대하여 방사선 영향을 보고하였다. 밀(*Triticum aestivum* L)의 묘목과 보리 종자(*Hordeum vulgare* L.)는 방사선 조사에 의해 성장이 감소되었지만, 포기 벌기의 증가를 보여주었다. 이러한 방사선에 대한 노출은 종자 발아, 식물 성장, 원예, 식물 크기, 수확에 영향을 미친다(Breslavets 1946).

그러나 매우 다양했던 과거 실험의 변수와 모델로서 방사선 조사의 식물 반응에 대한 지금까지의 실험 데이터를 비교하는 것은 어렵다. 왜냐하면 방사선 조사의 종류(예, 일시적이거나 만성적인), 선량률 또는 적용된 선량, 고려된 품종/변종/종 같은 생리학적 변수, 방사선 조사 시점에서의 식물발전 단계, 그리고 각각의 반응 사이의 변형은 실험들 사이에 다르게 나타날 수 있기 때문이다(Gunckel at al. 1953; Gunckel 1957; Boyer et al. 2009; Kim

J. I. Choi (✉)
전남대학교 생물공학과
(Department of Biotechnology and Bioengineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, South Korea)
e-mail: choiji01@jnu.ac.kr

J. K. Kim
한국원자력연구원 첨단방사선연구소
(Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongseup 500-185, South Korea)

et al. 2009). 심지어 같은 종의 유전자형 사이에서도 이러한 차이가 관찰되었다(Kwon and Im 1973). 묘목의 성장 단계는 방사선에 가장 민감한 것으로 알려져 있다. 방사선 조사의 다른 실험으로 낙진 γ -선 노출 실험을 통하여 곡물 묘목의 생존이 밝혀졌으며, 동물 세포의 방사선에 대한 저항성 보다 식물 씨앗의 저항이 더 강하다는 것이 알려졌다(Casarett 1968; Kumagai et al. 2000; Real et al. 2004). 사실, 다른 성장 단계에서 식물내의 기관들과 비교했을 때, 씨앗은 구조적 특성과 물질대사의 특성 때문에 환경적 요소에 대한 더 높은 저항성을 갖는 식물 성장 사이클의 특이한 단계로 알려져 있다. 배아에 도달하는 것과 침투된 이온의 수용력에 영향을 주는 구조와 수분 함량 때문에 건조한 씨앗과 신선한 씨앗 사이에서 방사선 조사에 대한 민감성의 차이를 갖는 것으로 알려져 있다 (Yu 2000; Wu and Yu 2001; Qin et al. 2007). 복합 조직 기관은 다세포일 때, 세포와 조직의 회복이 이루어지기 때문에 방사선 조사에 의한 돌연변이 발생에 더욱 저항성을 갖는 것으로 알려져 있다(Chadwick and Leenhouts 1981; Friedberg 1985; Kranz et al. 1994; Huang et al. 1997; Shikazono et al. 2002; Durante and Cucinotta 2008).

이러한 일련의 선행연구와 식품 산업에 적용하여 얻어진 일부 결과들, 그리고 체르노빌 사고와 같은 사건으로부터 얻어진 결과들은 방사선 조사에 의한 영향을 설명하는데 결과의 균일성의 결핍을 야기하였다. 적용된 방사선의 선량의 차이는 그 결과에 대한 해석을 더욱 복잡하게 한다. 식물의 방사선조사에서 방사선 조사의 선량은 몇 Gy (gray)부터 수백 Gy까지 다양하다. 또한 영농 또는 변종 선택에서는 그 범위가 수 kGy에까지 이를 수 있

다(Bhat et al. 2007; Maity et al. 2009). 더욱이, 선량에 대한 반응 범위는 실험대상이 되는 식물 중에 강하게 의존적이다. 따라서 식물에 방사선의 반응을 예상하는 것은 어려워진다.

γ -선은 전자기 방사선의 가장 활동적인 형태이며, 10 KeV (kilo electron volts) 부터 수백 KeV의 에너지 레벨을 지니며, 알파와 베타선 같은 다른 선원과 비교하여 가장 높은 침투력을 갖는 방사선 선원으로 알려져 있다(Kovacs and Keresztes 2002). γ -선은 이온화 방사선의 범주 안에 속하며, 세포 안에 자유에너지 변환을 야기하는 분자 또는 원자와 상호작용한다. 이러한 자유에너지 변환은 식물 세포의 중요한 요소를 손상시키거나 변형시킬 수 있고, 방사선조사의 단계에 따라, 식물의 생리학, 생화학, 형태학적으로 다르게 영향을 준다고 보고되어 왔다. 이러한 효과는 식물 세포 구조, 물질대사의 변화를 포함한다. 예로써 틸라코이드 세포막(thylakoid membranes)의 팽창, 광합성의 변환, 항산화 시스템의 조절과 phenolic 화합물의 축적 등이 보고되어 있다(Kim et al. 2004; Wi et al. 2005). 이온화 방사선에 노출된 식물 시스템에서 세포유전학과 돌연변이의 몇몇 연구결과들을 Table 1에 정리하였다. 이러한 선행연구들의 목적은 방사선의 유해 영향을 실험하고 결정하는 것과 일반적으로 더 적합한 식물 시스템의 개발을 위한 방사선 선량의 범위를 설정하는 것이다.

종자 발아

종피를 뚫고 배아로부터 유아나 유근이 출현하는 것으로 씨앗 배아에서 활동적 성장의 재개는 발아로 일컬어진다

Table 1 Effects of radiation on chromosome aberrations of different plant parts

Source of radiation	Species	Plant part	Parameter studied	References
X-rays, neutrons	<i>Haplopappus gracilis</i>	Cell suspensions	Cell survival	Werry and Stoffelsen 1979
Gamma, neutrons	<i>Nicotiana</i>	Protoplasts	Cell survival	Magnien et al. 1981
Gamma, ^{40}Ar , ^{56}Fe	<i>Oryza sativa L.</i>	Seeds	Micronuclei and chromosomal aberrations	Mei et al. 1994
Gamma, H^+ , He , N^+	<i>Pisum sativum</i>	Seedlings	Micronuclei	Vasilenko and Sidorenko 1995
Gamma, H^+ , He , C^{5+}	<i>Nicotiana tabacum</i>	Seeds	Chromosomal aberrations	Hase et al. 1999
Gamma	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Transgenic seed and seedlings	Homologous recombination	Kovalchuk et al. 2000
Gamma, C^{5+}	<i>N. tabacum</i>	Seeds	Chromosomal aberrations in roots of different length	Hase et al. 2002
Gamma, C^{5+}	<i>N. tabacum</i>	Protoplasts	Cell survival	Yokota et al. 2003
Gamma	<i>N. tabacum</i>	Protoplasts	Unrepaired double strand breaks	Yokota et al. 2007
Gamma	<i>Triticum durum</i>	Seeds	Chromosomal aberrations in the M1 generation	Cao et al. 2009
Ne, Si, ^{40}Ar	<i>Allium cepa</i>	Seedlings	Micronuclei	Takatsuji et al. 2010

다. 특별히 미리 방사선조사(pre-irradiation)가 포함되었을 때, 배아의 방사선 노출 영향과 관련된 결과는 가변적으로 보고되어 있다. 다양한 실험에서 배아율과 같은 변수들은 방사선 조사 이후 변화되지 않고 그대로거나, 증가, 감소되었음이 보고된다. 몇몇의 연구(Bora 1961; Kumari and Singh 1996; Radhadevi and Nayar 1996)에서 방사선은 호르몬의 개념, 즉 씨앗이 낮은 선량의 방사선으로 미리 방사선조사(pre-irradiation)되었을 때 다른 생물학 과정의 자극(더 빠른 배아 성장, 뿌리와 잎의 성장 증가)을 보고하였다(Luckey 1980; Bayonove et al. 1984; Zimmermann et al. 1996; Sparrow 1966; Thapa 1999). 배아의 γ -선의 자극 효과는 40Gy 선량의 방사선을 조사한 종자의 배아 초기 단계 동안 발생하는 단백질 합성(Kuzin et al. 1976) 또는 RNA 합성(Kuzin et al. 1975)의 활성화의 결과를 초래하였

다. 이것은 묘목의 옥신(auxin) 물질대사 또는 호흡 작용의 향상을 때문일 것으로 추측된다(Table 2). 높은 선량의 γ -선으로 조사될 경우 (a) 많은 조직학적 변화와 세포학적 변화; (b) γ -선 노출의 강도에 직접 비례하는 씨앗 층 또는 튜닉(tunica)의 붕괴와 분열; (c) 또는 발아하는 동안 분열 조직 부분에서 세포 분열의 사실상 제거 또는 손상된 분열(Lokesh et al. 1992)의 원인으로 인하여 발아하는 종자의 불임을 유발한다는 연구 결과가 보고되었다. 방사선 조사에 의한 종자 발아와 묘목 성장의 억제에는 방사선이 조사된 종자의 자유에너지 변환의 형성에 기인한다고 알려져 있다(Kumagai et al. 2000; Kovács and Keresztes 2002). 이렇듯 많은 연구들이 γ -선 조사에 의한 식물의 발아, 생존율, 치사율에 대한 연관성을 나타내고 있다.

Table 2 Effect of gamma radiation on seed germination

Dosage applied	Species	Plant part or age	Parameter studied	References
20 - 500 Gy	Fennel (<i>Foeniculum vulgare</i>)	Seed	Germination increased	Zeid et al. 2001
0.1 - 1 kGy	Lentil (<i>Lens culinaris Medik</i>)	Seed	Germination decreased at 0.2 kGy and no germination at 1.0 kGy dose	Chaudhuri 2002
150 - 300 Gy	Rice (<i>Oryzasativa L.</i>)	Seed	Germination decreased	Cheema and Atta 2003
10 - 300 Gy	<i>Pinus kesiya</i> and <i>P. wallichiana</i>	Seed	<i>P. kesiya</i> seeds exposed to 300 Gy germinated. In <i>P. wallichiana</i> , 300 Gy was lethal and seed germination was restricted at 200 Gy	Thapa 2004
150 - 1000 Gy	Maize (<i>Zea mays</i>), Okra (<i>Abelmoschus esculentus</i>) and Groundnut (<i>Arachis hypogea L.</i>)	Seed	90% germination was achieved at 240 Gy in maize, 70% at 170 Gy in Okra, and 58% at 300 Gy in groundnut	Mokobia and Anomohanran 2005
300 - 800 Gy	Long bean (<i>Vigna sesquipedalis</i>)	Seed	Germination increased at 400 Gy. No germination at 800 Gy	Kon et al. 2007
300 - 800 Gy	Tomato (<i>Lycopersicon esculentum cv</i>)	Seed	Germination decreased	Norfadzrin et al. 2007
300 - 800 Gy	Snap bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Seed	Germination decreased	Ellyfa et al. 2007
20 - 110 Gy	Atropa belladonna	Seed	Germination increased	Abdel-Hady et al. 2008
300 - 800 Gy	Chilli (<i>Capsicum annum</i>)	Seed	Germination decreased. Seeds irradiated at 800 Gy failed to germinate	Rizdiyandi et al. 2008
100 - 1200 Gy	Chick pea (<i>Cicer arietinum L.</i>)	Seed	Germination increased at 100-500 Gy, and decreased at 700-1200 Gy	Shah et al. 2008
50 - 300 Gy	Pumpkin (<i>Cucurbita pepo L.</i>)	Seed, Pollen	Germination increased	Kurtar 2009
200 - 800 Gy	<i>Lepidum sativum L.</i>	Seed	Germination increased	Majeed et al. 2009
100 - 400 Gy	Wheat (<i>Triticum aestivum L.</i>)	Seed, Seedling	Germination decreased	Borzouei et al. 2010
300 - 500 Gy	Okra (<i>Abelmoschus esculentus Moench</i>)	Seed	Germination increased	Hegazi and Hemeldeldin 2010

식물 성장과 발달(development)

식물에서 성장과 발달은 시간이 흐름에 따라 일정한 속도로 진행되지 않는다. 식물 발달은 성장하면서 식물 조직이 분화하고 발달하는 과정의 넓은 범위를 포함하는 용어이다. 성장패턴의 작은 변화라 할지라도 궁극적으로는 성숙과 수확에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 식물 종자의 γ -선 조사는 식물 성장에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. γ -선의 조사는 특정 형태학 변수에 영향을 미치며, 식물의 성장, 씨앗 형성 그리고 물 부족에 견디는 능력에서 식물의 생장을 조절할 수 있다(Dishlers and Rashals 1977; Zaka et al. 2002; Maity et al. 2005; Yu et al. 2007; Melki and Dahmani 2009). 형태학상 기형의 세분화된 묘사는 Gunckel (1957)와 Sparrow (1966)에 의해 처음으로 보고되었다. 이러한 연구를 기반으로 시작된 몇몇의 연구(Patskevich 1961; Davies and Mackey 1973; Auni et al. 1978)들에서 종자에 방사선 조사가 농업분야에서 실질적으로 적용이 가능하다는 가능성을 제시 하였다. 또한, 낮은 선량으로 γ -선 조사된 동물과 식물을 포함한 다양한 유기체에서 세포 분열, 성장, 발달이 향상되는 것으로 관찰되었다. “호르메시스(Hormeoisis)”라는 용어의 이러한 현상은 다양한 식물 종의 성장과 관련하여 논의되었다(Luckey 1980; Sagan 1987; Korystov and Narimanov 1997). 그러나, 방사선이 식물 성장과 발달에 어떻게 영향을 미치는지는 여전히 잘 알려지지 않았고, 얻어진 결과들은 여전히 논란의 여지가 남아있다. 사실, 보고된 방사선의 호르메시

스 영향의 규모가 작아서, 제어값의 대략 10%이며, 작물 수확이 방사선 처리한 종자에 의해 명확하게 증가했음을 보여주는 중요 증거가 항상 나타나는 것은 아니다(Miller 1987). 이러한 호르메시스는 식물 종간의 형태학적 구조와 구조적 변화에 적용된 방사선의 선량의 세기 및 조사 기간에 의존한다. 조사세기 별 다양한 선량으로 조사된 식물에서 자주 관찰되는 증상은 발아의 촉진 및 억제, 묘목 성장, 그 외 나타나는 여러 생물학적 반응이다(Kim et al. 2000; Wi et al. 2005). 낮은 선량의 γ -선 조사와 관련하여, 방사선에 대한 식물 자극의 영향에 관해 확실히 결론을 내릴 수는 없지만, 선행연구 결과들은 방사선은 식물 세포의 호르몬 신호를 보내는 네트워크를 변화시키거나, 또는 성장 조건에서 온도와 빛의 강도와 같은 일상의 스트레스 요소를 쉽게 극복하는 세포의 산화방지의 수용력을 증가시킴으로써, 식물 성장을 자극시킬 것이라는 공통적인 가설을 보여준다(Kim et al. 2004; Wi et al. 2007). 이와는 대조적으로 고선량 조사에 의해 유발된 성장 억제는 체세포(somatic cell)가 분열하는 동안 세포 주기를 정지(cell cycle arrest) 함으로써 나타난다(Preussa and Britta 2003). 방사선 조사된 식물의 성장과 γ -선 조사 선량 사이의 상관관계는 식물의 형태학적 변화와 묘목의 성장을 조사하는 것을 통해서 밝혀지고 있다. 높은 방사선 선량은 식물 내에서 옥신의 활동을 직접적으로 억제하지만, 저선량의 방사선 또한 옥신의 합성을 억제한다. 다른 상처 반응과 마찬가지로 방사선 조사된 조직은 내생(endogenous) 에틸렌(ethylene)을 생산한다(Maxie et al. 1965; Dwelle 1975;

Table 3 Effects of gamma irradiation on morphological and yield attributes of different plant species (seed part)

Dosage applied	Species	Morphological and Yield attributes response	References
1 - 20 Gy	Chineses Cabbage (<i>Brassica campestris</i> L. Cv.)	Increased in plant height and fresh weight	Kim et al. 2000
150 - 300 Gy	Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	Reduction in seedling height and induction of sterility in all the three rice varieties	Cheema and Atta 2003
10 - 100 Gy	Corn (<i>Zeamays</i> L.)	Decrease in shoot length	Al-Salhi et al. 2004
2 - 16 Gy	Red pepper (<i>Capsicum annum</i>)	Increase in stem length, diameter and leaf area except at 16 Gy	Kim et al. 2004
10 - 300 Gy	<i>Pinus kesiya</i> and <i>P. wallichiana</i>	In <i>Pinus kesiya</i> , decrease in root length	Thapa 2004
50 - 350 Gy	Rice (<i>Oryza sativa</i>), Mung (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Increase in seed yield and plant height in <i>O. sativa</i> L and <i>Phaseolus</i>	Maity et al. 2005
100 - 1000 Gy	<i>Crotalaria saltiana</i> L.	Increase in plant height	Shah et al. 2008
200 - 800 Gy	<i>Lepidum sativum</i> L	Decrease in shoot length	Majeed et al. 2009
10 - 100 Gy	Thai Tulip (<i>Curcuma alismatifolia</i> Gagnep)	Decrease in mean survival rate	Abdullah et al. 2009
100 - 400 Gy	Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.).	Decrease in root length, root fresh weight, and shoot length	Borzouei et al. 2010
200 - 1200 Gy	Barley (<i>Hordeum vulgare</i> spp.)	Reduction in shoot length, and decrease in root number	Nasab et al. 2010

Chervin et al. 1992; Liu et al. 2008). 많은 선행 연구 결과들이 식물의 성장과 수확능에서 γ -선 조사 선량에 따른 식물의 변화의 증거를 나타내고 있다(Table 3). γ -선 조사에 의한 식물의 성장 억제는 옥신과 DNA 발생설에 연관이 있는 것으로 알려져 있다(Lage et al. 1995; Momiyama et al. 1999).

γ -선은 복제과정에서의 오류를 통해 종자 인덱스(seed index), 개체 당 꼬투리(pod) 수, 개체 당 꽃의 수 등을 포함하는 산출 속성과 일차 지경에 대한 자극 영향을 지닌다(Charumathi et al. 1992; Khan et al. 2000). 콩과식물의 초기 개화를 유발시키기 위한 방사선 효과에 관하여 연구한 결과, 방사선 조사된 그룹에서 개체 당 씨앗 성숙, 개화, 식물 신장, 수확량에 관한 억제 효과가 나타났다(Yousuf et al. 1991; Sveteva and Petkova 1992). 또한 유사한 결과로써 γ -선 조사는 프랑스 콩(French beans)의 식물 신장을 늦추었고 성장 기간은 연장시켰으며, 오크라(okra) 열매의 수 및 열매 길이 증가가 관찰되었다(Dubey et al. 2007; Mishra et al. 2007; Sharma and Mishra 2007). Soehendi et al (2007)은 녹두 잎의 γ -선 조사 시 잎의 수관에 영향을 줄 수 있고, 씨앗의 산출이 달라질 수 있다고 언급하였고 이 반응은 저선량에서 두드러지게 나타났다고 보고하였다. 종자들이 저선량(25 와 50Gy)의 γ -선으로 조사되었을 때 어떤 품종에서는 수확량과 잠두(faba seed)씨앗 산출의 감소가 발생하였다고 보고되었다(Artık and Peksen 2006). 또한 일부 연구에서 식물의 성장속도와 관련하여 20-60Gy로 조사된 식물의 성장속도가 약 50% 감소한다고 보고하였고, 이것은 곡류의 방사선 반응과 유사하며 이 선량은 방사선 조사시의 발달 단계에 따라 50% 종자 생산을 감소시켰다(Fillipas et al. 1992). 이러한 현상의 원인으로 방사선 조사는 체관부(phloem)의 탄수화물 수송을 담당하는 세포 손상을 야기하였으며, 또한 탄소 분배는 방사선 선량 증가에 의해 달라진다고 보고되었다(Thiede 1995).

생화학적, 생리학적인 영향

γ -선 조사는 한 개 또는 몇 개 형질의 변형을 야기한다고 알려져 있다(Lapins 1983). γ -선 조사에 의해 생성된 광자(photon)들은 세포내 분자들과 반응하는 것으로 알려져 있다. 이전 연구에서, 발아 씨앗에서 더 많은 물질 대사 작용과 가수분해 효소 작용 때문에 총 단백질과 탄수화물 함량이 γ -선 조사에 의해 감소된다고 보고되었다(Adilson et al. 2002; Maity et al. 2004). 방사선은 당근(*Dacus carrota* L.)에서 포도당(glucose)과 피루브산염(pyruvate)의 흡수를 증가시키고 아세트산염(acetate)과 숙신산(succinate)의 흡수를 감소시킨다. 방사선은 또한 모든 기질의 동화작용의 이용을 감소시켰다(Bourke and Massey 1967). 15-30 kGy 선량에서 발린과 세린을 제외한 모든 아미노산의 감소가

발생하였고, 그 결과 점도가 감소되었다는 것이 보고되었다(Irawati and Pilnik 2001). Machaiah and Pednekar(2002)은 벵갈녹두(*Cicer arietinum*), 말콩(*Macrotyloma uniflorum*), 동부콩(*Vigna unguiculata*)에서 방사선 조사구와 비조사구의 올리고당 분해의 차이를 관찰하였다. 동부콩의 건조된 종자에서 방사선 조사된 샘플과 대조 샘플 사이에 가공된 콩류의 올리고당 분해의 미묘한 차이가 관찰되었으며, 이러한 차이는 녹두와 말콩에서 극명하게 나타났다고 보고하였다. γ -선과 아미노산 생산의 영향에 관하여 γ -선의 조사는 종자 단백질을 쉽게 부수고 더 많은 아미노산을 생산한다고 보고되었다(Adilson et al. 2002; Maity et al. 2004; Kiong et al. 2008). 반면, γ -선은 단백질 합성을 억제하기도 한다(Adilson et al. 2002; Maity et al. 2004; Kiong et al. 2008). 높은 선량으로 방사선 조사된 밀과 쌀에서 단백질과 탄수화물의 함량의 감소가 관찰되었다(Hagberg and Persson 1968; Inoue et al. 1975). 그러나 Lester and Whitaker (1996)의 연구에서는 1 kGy 조사된 머스크멜론의 원형 단백질막이 조사 10일 후에도 유지되는 것으로 관찰되었다. 또한 γ -선 조사된 다섯 종의 이라크 대추(*Phoenix dactylifera* L.)의 총 유리 아미노산의 함량을 측정된 결과 프롤린, 글루탐산, 아스파라긴산, 세린, 히스티딘, 리신, 타이로신의 양은 다소 감소한 반면, 메티오닌, 아이소류신, 류신은 다소 증가한다고 보고하고 있다(Auda and Wandawi 1980). 여러 연구들로부터 단백질, 필수아미노산, 미네랄, 미량 원소와 대부분의 비타민 류는 조사 과정 동안 눈에 띄는 손실을 보이지 않았으며, 심지어 10 kGy를 넘는 선량에서도 마찬가지였음이 보고되었다. Pradeep et al. (1993)은 인삼의 잎에서 라이신과 히스티딘이 γ -선에 영향을 받지 않는다고 보고하였다. Al-Jassir (1992)는 garliculbs (*Allium sativum* L)에서 아르지닌, 메티오닌, 라이진, 페닐알라닌, 류신 등의 아미노산이 소량 증가하였음을 발견하였다. 그러나, 조사된 표본들에서 그 밖의 다른 아미노산류의 소량 감소가 나타났으며, 특히 높은 선량에서 이러한 효과가 뚜렷하게 관찰되었다고 보고하였다.

Marchenko et al. (1996)과 Ussuf et al. (1996)의 연구들에서 조사된 식물 세포들이 자기 보호 메커니즘을 가지고 있다는 것을 주장하였다. 또한 이러한 방어 메커니즘은 황함유 아미노산(시스테인, 시스틴), 과산화물 제거효소(superoxide dismutase)를 포함하는 물질이나 이러한 물질을 만들어 내는 효소의 합성을 강화시킴으로 일어난다고 보고하고 있다(Qui et al. 2000). 감자줄기와 고구마 뿌리 안에 있는 자당(sucrose)의 함량은 감자(*Solanum tuberosum* L.)의 경우 3~4 kGy의 γ -선 조사에서, 고구마(*Ipomoea batatas* L.)는 0.8~2 kGy 선량에서 최대로 증가되었다(Hayashi and Kawashima 1981). 낮은 선량의 γ -선은 식물 내 효소 시스템의 활성화를 통하여 엽록소의 합성을 증가시킨다. 이러한 결과는 토마토(*Lycopersicon esculentum* L), 옥수수(*Zea*

mays L.), 쌀(*Oryza sativa* L.), 밀(*Triticum aestivum* L.)과 같은 다양한 식물들의 구성요소의 향상과 엽록소의 변량이 γ -선 조사 후에 증가되었다고 보고한 다른 연구결과들과 일치한다(Zeerak et al. 1994; Al-Kobaissi et al. 1997; Gautam et al. 1998; Rasico et al. 2001; Osama 2002). Soehendi et al. (2007)은 녹두의 작은 잎에 γ -선을 조사할 경우 방사선의 영향으로 획득된 변형이 잎의 수관에 영향을 주며 씨앗 산출에 변형을 줄 수 있다고 기술하였다. 따라서 식물당 더 커진 잎의 면적을 갖는 변형된 녹두 배관은 광합성 속도를 강화시킬 수 있었을 것이며 따라서 더 큰 산출량을 보였다. 또한 γ -선은 약간의 단백질 밴드의 출현과 소실을 야기시켜 단백질 패턴에 변형을 야기시켰다는 것이 발견되었다. Rashed et al. (1994), Yoko et al. (1996)은 옥수수, 콩, 밀의 유전체 DNA의 γ -선 조사 효과를 연구했다. 그 결과 큰 DNA 가닥(strand)은 낮은 조사 용량에서 작은 가닥들로 부서지거나 작은 DNA 가닥들은 높은 조사 선량에서 부서졌다. Artk and Peksen (2006)은 강낭콩 씨앗이 25, 50 Gy의 상대적으로 낮은 γ -선으로 조사되었을 때, 씨앗의 수확량에서의 감소를 발견하였다.

더 높은 선량의 γ -선 조사는 보리에서 엽색소 합성을 하지 못하게 하며(Kovacs and Keresztes 2002), 색소(붉어짐)의 변화는 40, 80 그리고 160 Gy 로 처리된 *Holcus lanatus* 의 잎에서 발견되었다(Jones et al. 2004). 이것은 하얗게된 보리와 밀의 잎 그리고 감자줄기에서도 나타났다. 수확기의 피하조직에 엽록체가 있는 과일(배)에 γ -선 조사(1 kGy)는 엽록체 구조를 변형시켰다(Keresztes and Kovacs 1991). Byun et al. (2002)은 과산화 작용 없는 오일 정제과정에서 잔류 엽록소를 감소시키거나 제거하기 위해 방사선 기술을 이용하였다.

γ -선 조사는 생리적 특성의 변형에 유용하게 사용될 수 있다(Kiong et al. 2008). γ -선의 생물학적 효과는 유리기를 생산하기 위한 세포, 특별히 물의 원자나 분자의 상호활동에 기반을 둔다(Kovacs and Keresztes 2002). 이러한 라디칼은 식물 세포의 중요 구성요소에 손상을 주거나, 변형을 초래할 수 있으며, 방사선 선량에 따라 식물의 생화학 그리고 생리에 각각 다르게 영향을 줄 수 있다고 보고되었다(Ashraf et al. 2003; Kovacs and Keresztes 2002; Kim et al. 2004; Wi et al. 2007; Ashraf 2009). 조사된 식물세포의 구조적 관찰을 통하여, 50 Gy 방사선 조사 이후 엽록체의 현저한 구조적 변화가 관찰되는 것으로 보아 다른 기관에 비하여 엽록체가 γ -선에 민감한 것을 알 수 있었다. 색소체(plastids)는 두 가지 방향으로 방사선 조사에 영향을 받았다. 즉, 노화 억제와 광합성 효율(Kim et al. 2004)이다(Table 4).

엽록체의 발달상의 퇴행은 주로 그라나(grana)의 파괴 때문이라고 가정할 수 있다(Kovacs and Keresztes 1989). 이와 비슷한 결과들은 자외선, 높은 농도의 금속, 산성비,

많은 빛과 같은 다른 환경의 스트레스 요소들로 인하여 야기된다고 보고되어왔다(Molas 2002; Barbara et al. 2003; Quaggiotti et al. 2004). 그러나 낮은 선량의 방사선 조사는 엽록체의 거대 구조에 이러한 변화를 야기하지는 않았다. 높은 선량으로 γ -선으로 씨앗을 조사할 경우 단백질 합성, 호르몬 균형, 잎의 가스 교환, 물의 교환, 그리고 효소의 활동을 방해한다(Hammed et al. 2008). γ -선 조사를 받은 밀의 엽록소 물질은 200 Gy 에서 점차적인 감소를 보여주었다(Borzouei et al. 2010). Kiong et al. (2008)은 엽록체의 감소는 엽록소 b의 생합성이나 엽록소 b 전구물의 파괴 때문이라고 보고하였다. 더욱이 Kim et al. (2004)은 방사선 조사와 고추나무 엽록소의 영향에 관하여 평가하였는데, 16Gy의 방사선에 노출된 식물들에서 엽록소가 약 23% 증가를 보인다고 발표하였다. 이렇듯 조사 한 식물들에 있어서 광합성량의 변형은 부분적으로 식물의 성장 증가에 기여하는 것으로 알려져 있다(Kim et al. 2004; Wi et al. 2007).

썩든 옥수수의 성장과 호흡작용에 있어, 파종전 γ -선 조사 처리의 효과가 연구되었다. 400과 800 Gy의 방사선 조사는 묘목의 성장에 있어 뚜렷한 억제를 유발하였고, 묘목당 산소 흡수로 측정된 호흡을 또한 억제하였다(Woodstock and Combs 1965). 물의 라디칼 반응으로 야기된 간접적 방사선 효과가 주요 역할을 하는 식품 단백질과 탄수화물의 방사선 화학과는 반대로, 물 방사분해에 반응하는 지질 반응에서는 대부분의 상황에서 작은 역할만을 할 뿐이다. 유지류에 있어 전자(elelectron)의 주요 효과는 양이온 라디칼과 절삭된 분자를 야기시킨다. 국소화작용(localization)과 상관없이 양이온 라디칼의 주요반응은 이합체화(dimerization) 또는 불균화(disproportionation)에 뒤따르는 탈양성자화(deprotonation)이다. 또 다른 주요 효과는 해리와 탈 카르보닐(decarbonylation) 또는 이합체 반응(dissociation), 그리고 전자 부착(electron attachment)이다. 이러한 부가적 반응은 들뜬 트리글리세이드 분자(the excited triglyceride molecules)로부터 시작될 수 있다. 이것은, 주요 중간 생성물(principal intermediate)으로써 유리산소기의 형성을 야기시키고 이는 궁극적으로 특정한 최종 생성물을 만들어내는 것이다. 적용된 낮은 선량의 방사선 조사 후 발생하는 것으로 알려진 유리 산소기의 활동에 의한 지질 분해(lipid degradation)의 촉진은 장기간의 효과를 부분적으로 설명할 수 있었을 것이다(Katsaras et al. 1986; Voisine et al. 1991). 10~15kGy 선량의 방사선 조사는 free fatty acid level 단계를 증가시키는 것으로 관찰되었다. γ -선 조사된 너트맥(nutmeg)에서 트리아실글리세롤의 함량의 종속적 감소와 유리지방산의 증가가 관찰되었다(Niyas et al. 2003). 마찬가지로, 씨앗에 대한 방사선 조사는 밀 썩의 과산화작용의 단계를 증가시켰다(Rogozhin et al. 2000). 또한 방사선 조사에 의한 아실글리세롤(acylglycerol)의 붕괴와 이로 인한 지방산류의 유출이 확인 되었다(Niyas et al. 2003).

Table 4 Effects of gamma radiation on physiology and biochemistry in different vegetal systems

Dosage applied	Species	Plant part or age/stage	Physiological and biochemical response	References
2 - 8 kGy	Kidney beans (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Dry kidney bean	Increase in deamidation, and reduction in sulfahydril content	Dogbevi et al. 2000
5 - 160 Gy	Yorkshire fog grass (<i>Holcus lanatus</i>)	Five-leaf growth stage	Increase in shoot nitrogen concentration	Jones et al. 2004
0.15 - 0.30 kGy	Onion (<i>Allium cepa</i> L.)	Bulb	Decrease in glucose, fructose, and sucrose	Benkeblia et al. 2004
20 - 100 Gy	Chamomile (<i>Chamomilla recutita</i> L.)	Seed	Increase in essential oil, carbohydrate content, and sugar content	Nassar et al. 2004
50 - 300 Gy	Rocket (<i>Eruca vesicaria</i> subsp. sativa)	Seed	Increase in total sugar increased, total free amino acid, total soluble phenol at 20 Gy	Moussa 2006
1 - 10 kGy	Soybean seeds (<i>Glycine max</i> L. Merr.)	Seed	Increase in total phenols and tannins at 1 kGy	Stajner et al. 2007
5 - 50 Gy	<i>Paulownia tomentosa</i>	Node explant	Reduction in chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll	Alikamanoglu et al. 2007
2.5 - 30 kGy	Velvet beans (<i>Macuna pruriens</i>)	Seed	Increase in protein content, carbohydrate content, and linoleic acid	Bhat et al. 2007
10 - 70 Gy	<i>Orthosiphon stamineus</i>	Shoot tip	Decrease in total soluble protein content	Kiong et al. 2008
2 - 16 kGy	<i>Nigella sativa</i>	Seed	Increase in extraction yield	Khattak et al. 2008
300 - 500 Gy	Okra (<i>Abelmoschuse sculentus</i> L.)	Seed	Increase in chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll	Hegazi and Hamideldin 2010
100 - 500 Gy	Soybean (<i>Glycine max</i> L. Merrill)	Seed	Decrease in total chlorophyll, Fe, Cu, and Zn, and soluble protein	Alikamanoglu et al. 2010
100 - 400 Gy	Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Seed	Increase in total chlorophyll. Decrease in proline content	Borzouei et al. 2010

더욱이 마늘종 싹의 성장과정에서 감소된 것과 동일하게 인지질, 당지질, 중성 지질은 γ -선 조사 후 상당히 감소하였다(Perez et al. 2007).

생리활성 물질과 오일 성분에 대한 γ -선의 효과

식물에서 추출된 페놀성 화합물(플라보노이드, 이소플라보노이드, 쿠마린, 리그난)은 식물 신진대사의 부차적 산물이다(Dixon and Paiva 1995; Douglas 1996). 고등식물에 있어서, 하이드록시신나믹액씨드(hydroxycinnamic acid), 신나모일 에스테르(cinnamoyl esters), 플라본(flavones), 플라보놀(flavonols), 안토시아닌(abthocyanins)은 UV-A와 UV-B를 흡수한다. 가용성의 phenyl propanoids(PP)s은 304-350 nm의 범위에서, 비가용성의 PPs는 352-385 nm 범주의 파장을 효율적으로 흡수한다. 휘발성 오일의 내용물과 구성요소에 방사선 조사의 효과에 관하여서는, 상반된 다른 결과들이 보고되었다. 이러한 차이들은 주로 식물의 종과 조사된 선량의 차이 때문이다. Koseki et al. (2002)는

브라질 의료용 허브내의 플라보노이드, 에센셜 오일(정유)과 페놀성 화합물의 방사선 조사에 의한 영향에 관하여 연구하였다. 이 연구에 의해 수행된 브라질 의료용 허브의 약물 테스트에서, 10, 20, 30 kGy의 방사선 선량으로 조사된 허브의 약리학적인 작용이 비조사구에 비해 차이가 없음이 확인되었다. 전통 약물과 허브 생산품의 조사는 화학 변화나 유효성분의 중요한 손실을 낳지 않았다. 두 약재 허브, 은행과 과라나(guarana)를 17.8 kGy까지 조사하였을 때 생리 활성 물질의 함량은 변화하지 않았다(Soriani et al. 2005). Mishra et al. (2004)의 연구에서 5 kGy 선량의 방사선 조사는 생강의 매운맛을 담당하는 구성물인, 6-진저롤(6-gingerol)의 감소를 야기하였다고 보고하였으며, Lee et al. (2005)은 고추가루에서는 3, 7, 10 kGy의 조사에도 캡산틴(capsanthin)과 캡사노이드(capsanoids)로 인한 매운맛과 빨간색은 변하지 않았다고 보고하였다. Calucci et al. (2003)은 여러 종류의 향채(바질, 후추, 검은 후추, 시나몬, 너트맥(육두구), 오레가노, 파슬리, 로즈마리, 세이즈)에서 활성 산소(유리기)와 항산화 물질에서 γ -선 조사의 효과에 관하여 연구하였다. 방사선 조사는 electron

paramagnetic resonance (EPR) 분광학에서 나타난 것처럼 모든 표본들에서 퀴논(quinone) 래디컬 물질의 증가와 몇몇의 허브들에서 아스코르브산(ascorbate)의 큰 감소를 보였다. Polovka et al. (2006)은 간 흑후추의 γ -선 조사(5~30 kGy)는 비조사 표본들과 비교할 때, 항산화 활성에 중요한 영향을 미친다는 것을 보고하였다. 가장 중요한 변화는 티오바르비톨산(thiobarbituric acid) 반응성 물질의 생성에서 발견되었다. 15 kGy 선량으로의 방사선 조사된 겨자(*Brassica nigra*)와 세나 꼬투리(*Cassia senna*) (pods)에서 약 1.3%의 페놀 함량의 증가가 나타났다. 최대 증가는 약 70%였으며, 세나(*Cassia senna* L.)잎에서 발견되었다. 냉이(*Lepidium sativum*) (25.6%), 레몬그라스(*Cymbopogon schoenanthus*) (24.9%) 에서도 증가가 나타났다. 이와는 대조적으로 15 kGy의 조사는 호로파(*Trigonella foenum-graecum* L.)의 페놀의 함량을 약 4.1% 감소시켰으며, 히비스커스(*Hibiscus sabdariffa* L), 가시아카시아(*Acacia nilotica* L.)에서도 감소가 나타났다. 방사선 조사에 의한 페놀 함량의 최대 감소는 33%였고 레몬그라스(*Cymbopogon citratus*)에서 관찰되었다. 식물의 페놀함량에 있어 γ -선 조사의 효과는 이전에 연구되지는 않았으나 다른 생물학적 물질의 연구는 보고되었다. Adamo et al. (2004)은 1.0-1.5 kGy 선량으로 조사된 송로의 표본들에서 페놀함량의 증가를 보고하였으며, 산소의 파괴 과정과 조사가 폴리 페놀의 화학적 결합을 깨뜨려 낮은 분자량의 가용성 페놀이 분출된다는 결론을 제안하였다. 너트맥 연구에서 Variyar et al. (1998)은 에센셜 오일의 구성물이 γ -선 조사에 따라 뚜렷한 양적 차이를 나타냄을 보여주었다. 비조사 표본들과 비교

하자면, sabinene, β -pinene, elimicin의 함량은 감소한 반면, α -terpeniol, 1-terpinene-4-ol, myristicin의 물질은 방사선 조사된 너트맥에서 증가하였다. 방사선 조사된 표본들 중에서 몇몇 에센셜 오일(정유) 구성물질이 정향과 cardamom에서 변화하였다. Seo et al. (2007)은 참당귀(*Angelica gigas* Nakai) 에센셜 오일(정유)의 구성성분에서 알파-오데스몰(α -eudesmol), 베타-오데스몰(β -eudesmol), verbenone과 같은 산화 테르펜(oxygenated terpenes)이 방사선 조사 후 증가되었으나 그들의 변화 비율은 추출 방법에 따라 변한다는 것을 나타내었다.

Breitfellne et al. (2002)는 딸기에서 플라보노이드의 γ -선 조사의 효과를 연구했으며 가수분해 표본들에서 네 가지 페놀산(마늘산, 4-하이드록시 벤조산, 파라 쿠마르산, 카페인산)를 확인하였으며, 다섯의 플라보노이드[(+)-catechin, (-)-epicatechin, kaempferol-3-glucoside, quercetin-3-glucoside and quercetin-3-galactoside]가 검출 되었음을 보고하였다. 4-하이드록시벤조산의 농도는 증가하였고, 퀘세틴-3-글루코사이드(quercetin-3-glucoside)의 농도가 6 kGy의 선량까지 변하지 않고 남아있는 것과는 달리, 카테킨과 kaempferol-3-glucosid의 농도는 조사 선량이 증가함에 따라 감소하였다. 세포에서 페놀화합물의 축적이 나타났으며 이는 phenylalanine ammonia-lyase (PAL)활동의 강화 때문이라고 설명될 수 있을 것이다. Bhat et al. (2007)은 벨벳빈의(*Mucuna pruriens*)종자에서 피트산과 같은 몇몇 화합물이 15 kGy의 선량의 방사선 조사로 인해 완전히 제거되었다고 보고하였다. 피트산의 감소 혹은 제거는 방사선 조사가 진행되는 동안 발생한 유리기의 활동에 의해 인산화 이노시톨

Table 5 Effects on gamma irradiation on the oil and metabolite content of different species

Dosage applied	Species	Plant part or age/stage	Metabolites and Oil content/yield	References
5 - 15 kGy	Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	Bran	Decrease in total E vitamers and oryzanol	Shin and Godber 1996
1 - 5 kGy	Mushroom (<i>Agaricus bisporus</i>)	Fruiting body	Decrease in Eight-carbon compounds	Mau and Hwang 1997
0.89 - 8.71 Gy	Orange (<i>Citrus limonia</i>)	Orange juice	Decrease in Myrcene, linalool, geranial and neral	Fan and Gates 2001
10 - 100 Gy	<i>Maytenus aquifolium</i> Martius	Leaf	Decrease in tannic acid	Campos et al. 2005
1 - 20 kGy	<i>Angelica gigas</i> Nakai	Leaf	Non-significant change in the major volatile compounds	Seo et al. 2007
1 - 20 kGy	Licorice (<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fischer)	Root	Maximum level of total yield of volatile compounds at 10	Gyawali et al. 2008
50 - 150 Gy	<i>Atropa belladonna</i> L.	Seed	Increase in alkaloid	Abdel-Hady et al. 2008
2 - 16 kGy	Kalungi (<i>Nigella sativa</i>)	Seed	Increase in Extraction yields and phenol content	Khattak et al. 2008
10 - 70 Gy	<i>Orthosiphon stamineus</i>	Shoot tip	Increase in Rosamarinic acid content	Kiong et al. 2008

과 이노시톨을 낮추기 위한 피테이트의 분해로 인한 것이다. 피테이트 손실에 관한 또 다른 설명은 피테이트 고리파괴를 통한 것으로 설명된다(Duodo et al. 1999). 마찬가지로, γ -선 조사된 잠두 종자에서도 비조사 대조 표본들과 비교해 피트산의 수준을 감소시켰다(Al-Kaisey et al. 2003). 정향과 너트맥에서는 몇몇 페놀산에서 상당한 변화가 나타났다. 조사를 받은 정향에서 마늘산과 시링산(syringic acids)의 함량이 증가하였다고 보고되었다. 대조 표본들에서 파라 쿠마르산, 페놀린산, synaptic acids의 양이 약 절반으로 감소하고 카페인산, 젠티진산의 양이 변하지 않고 그대로 남아있는 반면, 조사를 받은 너트맥의 경우에 그대로 남아있는 프로토키테큐산과 파라 쿠마르산을 제외하고는 다른 페놀산의 내용물은 비조사 대조 표본들의 양과 비교하여 큰 폭의 변화를 보였다. γ -선 조사에 의한 몇몇 화합물(복합물)의 증대는 더 높은 추출수율 때문일 것이다. 일부 연구에서 방사선의 조사가 콩의 씨앗에 있어 타닌을 감소시킨다고 보고하고 있지만 (Villavicencio et al. 2000), 그러한 차이는 유전적 구성물과의 다른 반응 때문일 것이다. 7과 10kGy의 선량으로 *Shahalla sorghum* variety에 방사선을 조사할 경우 타닌 물질의 함량의 감소가 나타났으나, *Hemaira* variety에 있어서는 그 효과가 관찰되지 않았다 (Siddhuraju et al. 2002). 식물의 유효성분에 대한 γ -선 조사의 효과와 다양한 연구들을 Table 5에 요약하였다.

전망(Perspective)

자연적 유전 변이율은 매우 천천히 일어나기 때문에 식물 개량 프로그램에서 이를 활용하기는 매우 어렵다. 따라서 비교적 쉬운 변이를 일으키는 γ -선의 조사가 현재 주로 사용되고 있다. 재래식물의 변식과 함께 발달된 분자생물학적 기법들은 방사선 육종기술이 작물의 증대에 요긴한 것으로 증명하고 있다. 앞으로의 연구는 고부가가치 대사산물을 생산하기 위해 신진대사학적으로 식물을 제어하는 방향이 되어야 할 것이다. 이러한 기능성 대사산물은 방사선에 저항에 관여하며, 또한 다양한 유전 특성의 기회를 제공하기 때문이다. 방사선 조사에 의한 기능성 대사산물의 유도는 목적하는 화합물의 생산성 증대에 막대한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 상업적으로 중요한 소량의 고부가 가치를 갖는 생산물(의학적 가치가 높은 향암, 항종양 활성을 갖는 복합물)이 여기에 속할 수 있다. 식물은 수많은 외부자극에 노출되기 때문에, 다양한 생리적 반응에 대한 단일 식물 형질도입 기술의 적용성을 위해 관심을 받을 것이다. γ -선은 유전자 발견과 기능 유전체학의 기초 연구뿐 아니라 새로운 돌연변이의 다양함을 발전시키기 위해 사용될 수 있다. 현재 환경적 변수들의 급격한 변화로 농업에서 기후 변화의 영

향을 예견하는 것은 매우 어려우므로 환경 변화에 맞서 지속 가능한 작물 생산을 위한 다양한 방법이 개발되고 분포되어야 한다. 이러한 면에서 볼 때 γ -선의 조사는 환경변화에 맞서고 부족한 부존 자원의 문제를 해결하기 위하여 단기간에 적용될 수 있는 새로운 다양성을 발달시킬 수 효과적인 방법이라고 사료된다.

사 사

본 논문은 농림축산식품부-해양수산부-농촌진흥청-산림청 Golden Seed 프로젝트 사업에 지원으로 수행되었습니다.

인용문헌

- Abdel-Hady MS, Okasha EM, Soliman SSA, Talaat M (2008) Effect of gamma radiation and gibberellic acid on germination and alkaloid production in *Atropa belladonna* L. Aust J Bas App Sci 2(3):401-405
- Abdullah TL, Endan J, Nazir BM (2009) Changes in flower development, chlorophyll mutation and alteration in plant morphology of *Curcuma alismatifolia* by gamma irradiation. Am J App Sci 6 (7):1436-1439
- Adamo M, Capitani D, Mannina L, Cristinzio M, Ragani P, Tata A, Coppola R (2004) Truffles decontamination treatment by ionizing radiation. Rad Phys Chem 71:165-168
- Adilson CB, Maria TLF, Ana Lcia CHV, Henry D, Valter A (2002) Identification of irradiated wheat by germination test, DNA comet assay and electron spin resonance. Rad Phys Chem 63:423-426
- Alikamanoglu S, Yaycli O, Atak C, Rzakoulieva A (2007) Effect of magnetic field and gamma radiation on *Paulownia tomentosa* tissue culture. Biotechnology 21(1):129-134
- Alikamanoglu S, Yaycili O, Sen A (2010) Effect of gamma radiation on growth factors, biochemical parameters, and accumulation of trace elements in soybean plants (*Glycine max* L. Merrill). Biol Trac Ele Res 1:11
- Al-Jassir MS (1992) Chemical composition and microflora of black cumin (*Nigella sativa* L.) seeds growing in Saudi Arabia. Food Chemistry 45(4):239-242
- Al-Kaisey MT, HALwan AK, Mohammad MH, Saeed AH (2003) Effect of gamma irradiation on antinutritional factors in broad bean. Rad Phys Chem 67(3-4):493-496
- Al-Kobaisi NM, Ibrahim IF, Kraibat AA, and Kadhem AK (1997) Induced mutations for leaf rust and lodging resistance in wheat *Triticum aestivum* L. Crop Improv 24:256-258
- Al-Salhi M, Ghannam M, Al-Ayed MS, El-Kameesy SU, Roshdy S (2004) Effect of gamma-irradiation on the biophysical and morphological properties of corn. Nahrung 48(2):95-98
- Artk C, Peksen E (2006) The effects of gamma irradiation on seed yield and some plant characteristics of faba bean (*Vicia faba* L.) in M2 generation. Ondokuz-Mays-Universitesi, -Ziraat-Fakultesi-Dergisi 21(1):95-104

- Ashraf M (2009) Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. *Biotech Adv* 27:84-93
- Ashraf M, Cheema AA, Rashid M, Qamar Z (2003) Effect of γ rays on M1 generation in basmati rice. *Pak J Bot* 35:791-795
- Auda H, AlWandawi H (1980) Effect of and storage conditions on composition of some Iraqi dates. *J Agric Food Chem* 28(3):516-518
- Barbara G, Maria S, Anna W, Slawa G, Magdalena G (2003) Changes in the ultra structure of chloroplasts and mitochondria and antioxidant enzyme activity in *Lycopersicon esculentum* Mill. leaves sprayed with acid rain. *Plant Sci* 164:507-516
- Bayonove J, Burg M, Delpoux M, Mir A (1984) Biological changes observed on rice and biological and genetic changes observed on Tobacco after space flight in the orbital station Salyut-7 (Biobloc III experiment). *Adv Space Res* 4:97-101
- Benkeblia N, Onodera S, Shiomi N (2004) Effect of gamma irradiation and temperature on fructans (fructo-oligosaccharides) of stored onion bulbs *Allium cepa* L. *Food Chem* 87:377-382
- Bhat R, Sridhar KR, Tomita-Yokotani K (2007) Effect of ionizing radiation on antinutritional features of velvet bean seeds (*Mucuna pruriens*). *Food Chem* 103:860-866
- Bora KC (1961) Relative biological efficiencies of ionizing radiation on the induction of cytogenetic effect in plants. In: *Proceeding of the Symposium on the effect of ionizing radiation on seed and their significance for crop improvement*. 345-357
- Borzouei A, Kafi M, Khazaei H, Naseriyan B, Majdabad A (2010) Effects of γ radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Pak J Bot* 42(4):2281-2290
- Bourke LM, Massey JT (1967) The influence of gamma irradiation on carbohydrate and citric acid cycle metabolism in carrot tissue. *Rad Res* 30:569-575
- Boyer V, Vichot L, Fromm M, Losses Y, Tatin-Froux F, Guetat P, Badot PM (2009) Tritium in plants: a recent of current knowledge. *Environ Exp Bot* 67:34-51
- Breslavets P. (1946) Variations in the floral morphology of normal and irradiated plants of *Tradescantiapaludosa*. *Bull Torr Botan Club* 80(6):445-456
- Byun MW, Jo C, Lee KH, Kim KS (2002) Chlorophyll breakdown by γ irradiation in a model system containing linoleic acid. *J Amer Oil Chem Soc* 79(2):145-150
- Calucci L, Pinzino C, Zandmeneghi M, Capocchi A, Ghiringhelti S, Tozzi S, Galleschi L (2003) Effect of γ irradiation on the free radical and antioxidant contents in nine aromatic herbs and spices. *J Agric Food Chem* 51(4):927-934
- Campos P, Yariwake JH, Lanças FM (2005) Effect of X- and gamma-rays on phenolic compounds from *Maytenus aquifolium* Martius. *J Radioanal Nucl Chem* 264(3):707-709
- Cao Y, Bie T, Wang X, Chen P (2009) Induction and transmission of wheat *Haynaldia villosa* chromosomal translocations. *J Gene Genomics* 36:313-320
- Casarett AP (1968) Effects of radiation on higher plants and plant communities. *Annals NY Academic Science* 59:514
- Chadwick KH and Leenhouts HP (1981) *The molecular theory of radiation biology*. Springer, Berlin
- Charumathi M, Rao MVB, Babu RV, Murthy KB (1992) Efficiency of early generation for induced micromutations in black gram *Vignamungo* (L.) Hepper. *Nucl Agric Bio* 21(4):299-302
- Chaudhuri KS (2002) A simple and reliable method to detect gamma irradiated lentil (*Lens culinaris* Medik.) seeds by germination efficiency and seedling growth test. *Rad Phys Chem* 64:131-136
- Cheema AA, Atta BM (2003) Radiosensitivity studies in basmati rice. *Pak J Botan* 40(2):605-613
- Chervin C, Triantaphylides C, FLibert M, Siadous R, Boisseau P (1992) Reduction of wound-induced respiration and ethylene production in carrot root tissues by gamma irradiation. *Post BioTech* 2(1):7-17
- Dishlers VY, Rashals ID (1977) *Arabidopsis*. *Inf Serv* 14:58-61
- Dixon RA and Paiva NL (1995) Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *Plant Cell* 7:1085-1097
- Dogbevi MK, Vachon C, Lacroix M (2000) Physico-chemical properties of dried kidney bean proteins and natural microflora affected by gamma irradiation. *J Food Sci* 64:540-542
- Douglas CJ (1996) Phenylpropanoid metabolism and lignin biosynthesis: from weeds to trees. *TIPS* 1:171-178
- Dubey AK, Yadav JR, Singh B (2007) Studies on induced mutations by γ - irradiation in okra (*Abelmoschus esculentus* (L.). *Moench Prog Agric* 7(1/2):46-48
- Duodu KG, Minnaar A, Taylor JRN (1999) Effect of cooking and irradiation on the liable vitamins and anti nutrient content of a traditional African sorghum porridge and spinach relish. *Food Chem* 66:21-27
- Durante C (2008) Heavy ion carcinogenesis and human space exploration. *Nat Rev Canc* 8:465-472
- Dwelle RB (1975) Abscission of Phaseolus and Impateins explants: Effects of ionizing radiations upon endogenous growth regulators and in de novo enzyme synthesis. *Plant Physiol* 56:529-534
- Ellyfa K, Ahmed OH, Shaharudin S, Abdul Rahman D (2007) Gamma radiosensitivity study on snap bean (*Phaseolus vulgaris*). *Intern J Agric Res*. 2:844-848
- Fan X, Gates RA (2001) Degradation of monoterpenes in orange juice by gamma radiation. *J Agric Food Chem* 49:2422-2426
- Filipas AS, Morgunova YA, Dikarev VG (1992) Effects of ionising radiation on agricultural crops. In: Alexakhin R.M. and N.A. Korney (Eds.), *Agric Radioeco Ecologia Publishers, Moscow*. 156-174
- Friedberg EC (1985) *DNA repair*. WH Freeman and C, New York.
- Gail H (1958) Present aspect of induced mutations in plant breeding. *Euphytica* 7:275-289
- Gautam RK, Sethi GS, Rana MK, Shama SK (1998) Induction inheritance pattern and agronomic performance of awned mutants in multiple disease resistant bread wheat cultivar. *Ind J Gen Plant Breed* 58:417-422
- Gunckel JE (1957) The effect of ionizing radiation on plants morphological effects. *Qua Rev Biol* 32:46-56
- Gyawali R, Seo H, Shim S, Ryu K, Kim W, You SG (2008) Effect

- of γ -irradiation on the volatile compounds of licorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fischer). Eur Food Res Tech 226:577-582
- Hagberg A, Persson G (1968) Induced mutations in barley breeding. Heredity 59:396-412
- Hase Y, Shimono K, Inoue M, Tanaka A, Watanabe H (1999) Biological effects of ion beams in *Nicotiana tabacum* L. Rad Environ Biophys 38:111-115
- Hase Y, Yamaguchi M, Inoue M, Tanaka A (2002) Reduction of survival and induction of chromosome aberrations in tobacco irradiated by carbon ions with different linear energy transfers. Intern J Rad Bio 78:799-806
- Hayashi T, Kawashima K (1982) Accumulation of sucrose in γ -irradiated sweet potato roots. J Food Sci 47:2011-2014
- Hegazi AZ, Hamideldin N (2010) The effect of gamma irradiation on enhancement of growth and seed yield of okra [*Abelmoschus esculentus* (L.) Monech] and associated molecular changes. J Horticult Sci 2(3):38-51
- Huang RQ, Gu RQ, Li Q (1997) Application of SSNTDs in radiobiological investigations aboard recoverable satellites. Rad Measure 28:451-454
- Inoue M, Hasegawa H, Hori S (1975) Physiological and biochemical changes in gamma irradiated rice. Rad Bot 15:387-395
- Irawati Z, Pilnik W (2001) Effects of gamma irradiation on uronic acid sugars as cell wall polysaccharide model systems. Atom Indonesia 27:37-57
- Johnson EL (1939) Growth of wheat plants from dry and soaked irradiated grains. Plant Physiol 14:493-504
- Jones HE, West HM, Chamberlain PM, Parekh NR, Beresford NA, Crout NM (2004) Effects of gamma irradiation on *Holcus lanatus* (Yorkshire fog grass) and associated soil microorganisms. J Environ Radio 74(1-3):57-71
- Katsaras J, Stinson RH, Kendall EJ, McKersie BD (1986) Structural simulation of free radical damage in a model membrane system: a small-angle X-ray diffraction study. Biochim Biophys Acta (BBA) – Biomemb 861:243-250
- Khan MR, Qureshi AS, Hussain SA (2000) Gamma irradiation sensitivity and its modulation with gibberellic acid for seedling physiology in chickpea (*Cicer arietinum* L). Proc Pak Acad Sci 37(2):195-202
- Khattak KF, Simpson TJ, Ihasnullah (2008) Effect of gamma irradiation on the extraction yield, total phenolic content and free radical-scavenging activity of *Nigella sativa* seed. Food Chem 110:967-972
- Kim JH, Baek MH, Chung BY, Wi SG, Kim JS (2004) Alterations in the photosynthesis pigments and antioxidant machineries of red pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings from γ -irradiated seeds. J Plant Biotech 47:314-321
- Kim JH, Lee MH, Moon YR, Kim JS, Wi SG, Kim TH, Chung BY (2009) Characterization of metabolic disturbances closely linked to the delayed senescence of *Arabidopsis* leaves after γ -irradiation. Environ Exper Bot 67:363-371
- Kim JS, Lee EK, Baek MH, Kim DH, Lee YB (2000) Influence of low dose gamma irradiation on the physiology of germinative seed of vegetable crops. Kor J Environ Agric 19:58-61
- Kiong ALP, Lai GA, Hussein S, Harun AR (2008) Physiological responses of *Orthosiphon stamineus* plantlets to gamma irradiation. Ame-Eur J Sus Agric 2(2):135-149
- Kon E, Ahmed OH, Saamin S, Majid NM (2007) Gamma radiosensitivity study on Long bean (*Vigna sesquipedalis*). Am J Appl Sci 4(12):1090-1093
- Korystov YN, Narimanov AA (1997) Low doses of ionizing radiation and hydrogen peroxidase stimulate plant growth. Biologia (Bratislava) 52:121-124
- Koseki PM, Villavicencio ALCH, Brito MS, Nahme LC, Sebastiao KI, Rela PR, Almeida-Muradian LB, Mancini-Filho J, Freitas PCD (2002) Effects of irradiation in medicinal and eatable herbs. Rad Phys Chem 63(3-6):681-684
- Kovacs E, Keresztes A (1989) The effect of irradiation on starch content in Golden Delicious apples. Food Micro 8:67-74
- Kovács E, Keresztes A (2002) Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells. Micr 33:199-210
- Kovalchuk O, Arkhipov A, Barylyak I, Karachov I, Titov V, Hohn B, Kovalchuk I (2000) Plants experiencing chronic internal exposure to ionizing radiation exhibit higher frequency of homologous recombination than acutely irradiated plants. Muta Res 449:47-56
- Kranz AR (1986) Genetic and physiological damage induced by cosmic radiation on dry plant seeds during space flight. Adv Spac Res 6:135-138
- Kumagai J, Katoh H, Kumada T, Tanaka A, Tano S, Miyazaki (2000) Strong resistance of *Arabidopsis thaliana* and *Raphanus sativus* seeds for ionizing radiation as studied by ESR, ENDOR, ESE spectroscopy and germination measurement: effect of long-lived and super-long-lived radicals. Rad Phys Chem 57:75-83
- Kumari R, Singh Y (1996) Effect of γ rays and EMS on seed germination and plant survival of *Pisum sativum* L. and *Lens culinaris* Medic Neo Botanica 4:25-29
- Kurtar ES (2009) Influence of gamma irradiation on pollen viability, germinability and fruit and seed-set of pumpkin and winter squash. Afr J Biotech 8 (24):6918-6926
- Kuzin AM, Vagabova ME, Prinak-Mirolyubov VN (1975) Molecular mechanisms of the stimulating effect of ionizing radiation on seed. Activation of RNA synthesis. Radiobio 15:747-750
- Kuzin AM, Vagabova ME, Revin AF (1976) Molecular mechanisms of the stimulating action of ionizing radiation on seeds. 2. Activation of protein and high molecular RNA synthesis. Radiobio 16:259-261
- Kwon SH, Im KH (1973) Studies on radiosensitivity of soybean varieties. Kor J Breed 5(1):5-10
- Lage CLS, Esquibel MA (1995) Role of non enzymatic synthesis of indole-3-acetic acid in the *Ipomoea batatas* L. Lam. (sweet potato) response to gamma radiation. Brazilian Journal of biology and technology 38(4):1173-1180
- Lapins T (1983) Mutation breeding: Methods in fruit breeding. Gamma Field Symposia 1(3):74-99
- Lee JH, Lee KT, Kim MR (2005) Effect of γ -irradiated red pepper powder on the chemical and volatile characteristics of *Kakdugi*, a Korean traditional fermented radish Kimchi. J Food Sci

- 70(7):441–447
- Lester GE, Whitaker BD (1996) Gamma ray induced changes in hypodermal mesocarp tissue plasma membrane of pre and post storage muskmelon. *Physio Plant* 98:265–270
- Li Y, Liu M, Cheng Z, Sun Y (2007) Space environment induced mutations prefer to occur at polymorphic sites of rice genomes. *Adv Spac Res* 40:523–527
- Liu H, Wang Y, Xu J, Su T, Liu G, Ren D (2008) Ethylene signaling is required for the acceleration of cell death induced by the activation of AtMEK5 in *Arabidopsis*. *Cell Res* 18(3):422–432
- Lokesha R, Vasudeva R, Shashidhar HE, Reddy ANY (1992) Radio-sensitivity of bambusa arundinacea to gamma rays. *J Trop For Sci* 6(4):444–450
- Luckey TD (1980) *Hormesis with ionizing radiation*. CRC Press Inc, Boca Raton
- Machaiah JP, Pednekar MD (2002) Carbohydrate composition of low dose radiation-processed legumes and reduction in flatulence factors. *Food Chem* 79:293–301
- Magnien E, Dalschaert X, Coppola M (1981) Dose-effect relationships, r.b.e. and split-dose effects after gamma-ray and fast neutron irradiation of protoplasts from wild *Nicotiana* species. *Inter J Radiation Bio Relat Stud Phys Chem Med* 40:463–474
- Maity JP, Chakraborty A, Saha A, Santra SC, Chanda S (2004) Radiation induced effects on some common storage edible seeds in India infested with surface microflora. *Rad Phys Chem* 71:1065–1072
- Maity JP, Kar S, Banerjee S, Chakraborty A, Santra SC (2009) Effects of gamma irradiation on long-storage seeds of *Oryzasativa* (cv.2233) and their surface infecting fungal diversity. *Rad Phys Chem* 78:1006–1010
- Maity JP, Mishra D, Chakraborty A, Saha A, Santra SC, Chanda S (2005) Modulation of some quantitative and qualitative characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) and mung (*Phaseolus mungo* L.) by ionizing radiation. *Rad Phys Chem* 74:391–394
- Majeed A, Khan A, Ahmad RH, Muhammad Z (2009) Gamma irradiation on some growth parameters of *Lepidium sativum* L. *J Agric Bio Sci* 5:39–42
- Marchenko MM, Blosko MM, Kostyshin SS (1996) The action of low doses of gamma irradiation on the function of the glutathione system in corn (*Zeamays*L.). *Ukr Biokhim Zh* 68:94–98
- Mau JL, Hwang SJ (1997) Effect of gamma-irradiation on flavor compounds of fresh mushrooms. *J Agric Food Chem* 45(5): 1849–1852
- Maxie EC, Sommer NF, Muller CJ, Rae HL (1966) Effect of gamma irradiation on the ripening of Bartlett Pears. *Plant Physio* 41:437–442
- Mei M, Deng H, Lu Y, Zhuang C, Liu Z, Qiu Q, Qiu Y, Yang TC (1994) Mutagenic effects of heavy ion radiation in plants. *Adv Spac Res* 14:363–372
- Melki M, Dahmani TH (2009) Gamma irradiation effects on durum wheat (*Triticum durum* Desf) under various conditions. *Pak J Bio Sci* 12:1531–1534
- Miller MW (1987) Radiation hormesis in plants. *Health Physics* 52:607–616
- Mishra MN, Qadri H, Mishra S (2007) Macro and micro mutations, in γ -rays induced M2 populations of Okra (*Abelmoschus esculentus* (L) Moench). *Intern J Plant Sci Muzaffarnagar* 2(1):44–47
- Mokobia CE, Anomohanran O (2005) The effect of gamma irradiation on the germination and growth of certain Nigerian agricultural crops. *J Rad Protec* 25:181–188
- Molas J (2002) Changes of chloroplast ultrastructure and total chlorophyll concentration in cabbage leaves caused by excess of organic Ni (II) complexes. *Environ Exper Bot* 47:115–126
- Momiyama M, Koshiba T, Furukawa K, Kamiya Y, Satô M (1999) Effects of γ -irradiation on elongation and indole-3-acetic acid level of maize (*Zea mays*) coleoptiles. *Environ Exper Botan* 41:131–143
- Moussa RH (2006) Gamma irradiation regulation of nitrate level in rocket (*Eruca vesicaria* subsp. sativa) plants. *J New Seeds* 8:91–101
- Muller HJ (1927) Artificial transmutation of the gene. *Sci.* 66:84
- Nasab SS, Sirchi GRS, Torabi-Sirchi MH (2010) Assessment of dissimilar γ -irradiations on barley (*Hordeum vulgare* spp.). *J Plant Breed Crop Sci* 2:59–63
- Nassar AH, Hashim MF, Hassan NS, Zaid AH (2004) Effect of gamma irradiation and phosphorus on growth and oil production of chamomile (*chamomilla recutita* l. rauschert). *Intern J Agric Bio* 6(5):776–780
- Niyas Z, Variyar PS, Gholap AS, Sharma A (2003) Effect of γ -irradiation on the lipid profile of nutmeg (*Myristica fragrans* Houtt.). *J Agric Food Chem* 22:6502–6504
- Norfadzrin F, Ahmed OH, Shaharudin S, Rahman DA (2007) A preliminary study on γ radiosensitivity of tomato (*Lycopersicon esculentum*) and okra (*Abelmoschus esculentus*). *Intern J Agric Res* 2(7):620–625
- Okamura M, Yasuno N, Ohtsuka M, Tanaka A, Shikazono N, Hase Y (2003) Wide variety of flower-color and shape mutants regenerated from leaf cultures irradiated with ion beams. *Nuc Ins Meth Phys Res* 206:574–578
- Osama MS (2002) Molecular genetic studies on irradiated wheat plants. Ph.D Thesis of genetic, Department of genetics, Faculty of Agriculture Ain Shams University
- Perez MB, Aveldaño MI, Croci CA (2007) Growth inhibition by γ rays affects lipids and fatty acids in garlic sprouts during storage. *Posthar Bio Tech* 44(2):122–130
- Polovaka M, Brezova V, Stasko A, Mazur M, Suhaj M, Simko P (2006) EPR investigations of γ -irradiated ground black pepper. *Rad Phys Chem* 75(2):309–321
- Preussa SB, Britta AB (2003) A DNA-damage-induced cell cycle checkpoint in Arabid. *Gene* 164:323–334
- Qin HL, Wang YG, Xue JM, Miao Q, Ma L, Mei T, Zhang WM, Guo W, Wang JY, Gu HY (2007) Biological effects of protons targeted to different ranges in *Arabidopsis* seeds. *Intern J Rad Bio* 83:301–308
- Quaggiotti S, Trentin AR, Ecchia FD, Ghisi R (2004) Response of maize (*Zeamays* L.) nitrate reductase to UV-B radiation. *Plant Sci* 167:107–116

- Qui X, Wang F, Wang X, Zhou G, Li Z (2000) Effect of combined treatment of ^{60}Co γ -ray and EMS on antioxidase activity and ODAP content in *Lathyrus sativus*. Ying Yong Sheng TaiXue Bao 11(6):957-958
- Radhadevi DS, Nayar NK (1996) Gamma rays induced fruit character variations in Nendran, a varieties of banana (*Musa paradasiaca* L.) Geobios 23:88-93
- Rascio A, Russo M, Mazzucco L, Plantani C, Nicastro G, Difonzo N (2001) Enhanced osmo-tolerance of a wheat mutant selected for potassium accumulation. Plant Sci 160:441-448
- Rashed MA, Fahmy EM, Sallam MA (1994) Embryo culture, protein and isozyme electrophoresis as selectable markers to predict salt tolerance in wheat. 5th Conf. Agricultural Development Research Faculty of Agriculture, Ain Shams Univ. Cairo, Egypt 1:469-49
- Real A, Sundell-Bergman S, Knowles JF, Woodhead DS, Zinger I (2004) Effects of ionising radiation exposure on plants, fish and mammals: relevant data for environmental radiation protection. J Radia Protec 24:123-137
- Rizdiyandi OS, Ahmed OH, Saamin S, Majid NA, Muhamad N (2008) Gamma radiosensitivity study onchili (*Capsicum annum*). Am J Appl Sci 5(2):67-70
- Rogozhin VV, Kuriliuk TT, Filippova NP (2000) Change in the reaction of the antioxidant system of wheat sprouts after UV-irradiation of seeds. Biofizika 45:730-736
- Sagan LA (1987) What is hormesis and why haven't we heard about it before. Heal Phys 5:521-525
- Sax K (1963) The stimulation of plant growth by ionizing radiation. Rad Botan 3(3):179-186
- Seo H, Kim J, Song H, Kim D, Byun M, Kwon J, Kim K (2007) Effects of γ irradiation on the yields of volatile extracts of *Angelica gigas* Nakai. Rad Phys Chem 76:1869-1874
- Shah TM, Mirza JI, Haq MA, Atta BM (2008) Induced genetic variability in chick pea (*Cicer arietinum* L.). II. Comparative mutagenic effectiveness and efficiency of physical and chemical mutagens. Pak J Botan 40(2):605-613
- Sharma BK, Mishra MN (2007) Micro-mutations for fruit number, fruit length and fruit yield characters in γ -irradiated generation of ANKUR-40 variety of okra [*Abelmoschus esculentus* (L.) Monech]. Intern J Plant Sci Muzaffarnagar 2(2):208-211
- Shikazono N, Tanaka A, Kitayama S, Watanabe H, Tano S (2002) LET dependence of lethality in *Arabidopsis thaliana* irradiated by heavy ions. Rad Environ Biophys 41:159-162
- Shin TS, Godber JS (1996) Changes of endogenous antioxidants and fatty acid composition in irradiated rice bran during storage. J Agric Food Chem 44:567-573
- Siddhuraju P, Makkar HPS, Becker K (2002) The effect of ionizing radiation on anti nutritional factors and the nutritional value of plant materials with reference to human and animal food. Food Chem 78:187-205
- Soehendi R, Chanprame S, Toojinda T, Ngampongsai S, Srinives P (2007) Genetics, agronomic, and molecular study of leaflet mutants in mungbean (*Vignaradiata* (L.) Wilczek). J Crop Sci Biotech 10(3):193-200
- Soriani RR, Satomi LC, de Jesus T, Pinto A (2005) Effects of ionizing radiation in ginkgo and guarana. Rad Phys Chem 73(6):239-42
- Sparrow AH (1966) Plant growth stimulation by ionizing radiations. In: Effects of low doses of ionizing radiations on crop plants. IAEA Tech Rep Ser. 64:12-15
- Stajner D, Milosevic M, Popovic BM (2007) Irradiation effects on phenolic content, lipid and protein oxidation and scavenger ability of soybean seeds. J Mol Sci 8(2):618-27
- Stajner D, Popovic BM, Taski K (2009) Effects of γ -irradiation on antioxidant activity in soybean seeds. Cent Eur J Bio 4:381-86
- Svetleva D, Petkova S (1992) Association between changes in the M1 and mutability in the M2 in the French bean variety 564 after combine treatment with radiation and N-allyl-N-nitrosourea. Genetika-i-Selektivna 25:254-60
- Takatsuji T, Takayanagi H, Morishita K, Nojima K, Furusawa Y, Nakazawa Y, Matsuse M, Akamatsu S, Hirano N, Hirashima N, Hotokezaka S, Ijichi T, Kakimoto C, Kanemaru T, Koshitake M, Moriuchi A, Yamamoto K, Yoshikawa I (2010) Induction of micronuclei in germinating onion seed root tip cells irradiated with high energy heavy ions. J Rad Res 51:315-23
- Thapa CB (1999) Effect of acute exposure of γ rays on seed germination and seedling of *Pinus kesiya* Gord and *P. wallichiana* A.B. Jacks. Botanica Orientalis J Plan Sci 120-121
- Thapa CB (2004) Effect of acute exposure of gamma rays on seed germination and seedling growth of *Pinus kesiya* gord and *P. Wallichiana* A.B. Jacks. Our Natur 2:13-7
- Thiede ME, Link SO, Fellows RJ, Beedlow PA (1995) Effects of γ radiation on stem diameter growth, carbon gain and biomass partitioning in *Helianthus annuus*. Environ Exper Botan 35:33-41
- Ussuf KK, Laxmi NH, Nair PM (1996) Possible role of calcium dependent protein phosphorylation in the modulation of wound induced HRGP gene activation in potatoes after gamma irradiation. Ind J Biochem Biophys 33:484-489
- Variyar PS, Bandyopadhyay C, Thomas P (1998) Effect of γ -irradiation on the volatile oil constituents of some Indian spices. Food Res Intern 31:105-109
- Vasilenko A, Sidorenko PG (1995) Induction of micronuclei in plant cells after exposure to accelerated ion irradiation. Rad Environ Bio Phys 34:107-112
- Villavicencio ALCH, Mancini-Filho J, Delincee H, Greiner R (2000) Effect of irradiation on anti-nutrients (total phenolics, tannins and phytate) in Brazilian beans. Rad Phys Chem 57:289-293
- Werry PA, Stoffelsen KM (1979) The effect of ionizing radiation on the survival of free plant cells cultivated in suspension cultures. Intern J Rad Bio Relat Study in Phys Chem Med 35:293-298
- Wi SG, Chung BY, Kim JH, Baek MH, Yang DH, Lee JW, Kim JW (2005) Ultra structural changes of cell organelles in *Arabidopsis* stem after γ irradiation. J Plant Bio 48:195-200
- Wi SG, Chung BY, Kim JS, Kim JH, Baek MH, Lee JW, Kim YS (2007) Effects of gamma irradiation on morphological

- changes and biological responses in plants. *Micr* 38:553-56
- Woodstock LW, Combs MF (1965) Effects of gamma-irradiation of corn seed on the respiration and growth of the seedling. *Am J Bot* 52:563-569
- Wu L, Yu Z (2001) Radiobiological effects of a low-energy ion beam on wheat. *Rad Environ Bio Phys* 40:53-57
- Yamaguchi H, Nagatomi S, Morishita T, Degi K, Tanaka A, Shikazono N, Hase Y (2003) Mutation induced with ion beam irradiation in rose. *Nucl Ins Meth Phys Res* 206:561-564
- Yoko K, Aya M, Hiromi I, Takashi Y, Kukio S (1996) Effect of γ irradiation on cereal DNA investigated by pulsed-field gel electrophoresis. *Shokuhin-Shosha* 31:8-15
- Yokota ZY, Hase Y, Shikazono N, Tanaka A, Inoue M (2003) LET dependence of lethality of carbon ion irradiation to single tobacco cells. *Intern J Rad Bio* 79:681-685
- Yokota Y, Yamada S, Hase Y, Shikazono N, Narumi I, Tanaka A, Inoue M (2007) Initial yields of DNA double-strand breaks and DNA Fragmentation patterns depend on linear energy transfer in tobacco BY-2 protoplasts irradiated with helium, carbon and neon ions. *Rad Res* 167:94-101
- Yu X, Wu H, Wei LJ, Cheng Z, Xin P, Huang C, Zhang KP, Sun YQ (2007) Characteristics of phenotype and genetic mutations in rice after space flight. *Adv Spac Res* 40:528-534
- Yu Z (2000) Ion beam application in genetic modification. *IEEE Trans Plasma Sci* 28:128-132
- Zaka R, Chena C, Misset MT (2002) Effect of low doses of ionizing radiation on antioxidant enzymes and G6PDH activities in *Stipa capillata* (Poaceae). *J Exper Botan* 53:1979-87
- Zeerak NA, Zargar GH, Ahanger HU (1994) Induced dwarf mutant in tomato (*Lycopersicon esculentum var cerasiforme*). *J Nucl Agric Bio* 23:209-213
- Zeid IM, Gharib FA, Abou El, Gate HM (2001) Response of fennel (*Foeniculum vulgare*) to gamma radiation and gibberlic acid treatments. *Pak J Bio Sci* 4(7):805-808
- Zhou L, Li W, Yu L, Li P, Li Q, Shuang MA, Dong X, Zhou G, Leloup C (2006) Linear energy transfer dependence of the effects of carbon ion beams on adventitious shoot regeneration from in vitro leaf explants of *Saintpaulia ionahta*. *Intern J Rad Bio* 82(7):473-481
- Zimmermann MW, Gartenbach KE, Kranz AR, Baican B, Schopper E, Heilmann C, Reitz G (1996) Recent results of comparative radiobiological experiments with short and long term expositions of Arabidopsis seedembryos. *Adv Spac Res* 18(12):205-213