Korean Journal of Life Science
Vol. 11. No. 6. 612~617, 2001

방사선처리가 고추의 생육과 항산화 효소의 활성에 미치는 영향

권순태* · 정은아 · 김재성[1]

안동대학교 생명자원과학부
[1]한국원자력연구소 동위원소 · 방사선응용연구팀

Effect of γ -Radiation on Growth and Antioxidant Enzyme Activities in Red Pepper

Soon-Tae Kwon*, Eun-Ah Jung and Jae-Sung Kim[1]

Department of Bioresource Sciences, Andong National University, Kyungpook, 760-749, Korea
[1]Isotope Radiation Application Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon, 305-353, Korea

Abstract

Seedlings of red pepper (*Capsicum annum* L.) were exposed to various doses of γ-radiation (^{60}Co) and cultivated in the 1/2,000a pot. Plant height, the number of leaves, flowers and fruits, chlorophyll contents, plant dry weight, activities of antioxidant enzymes, such as superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), were determined. Plant height of seedling treated with 1 Gy of γ-radiation was increased up to 16.6% as compared to untreated control at 80 days after treatment, while those treated with 20 Gy or 50 Gy was decreased 22.0% or 75.0%, respectively. The plants treated with 1 Gy or 5 Gy were increased the number of leaves up to 41.2 % and 24.9%, as well as dry weight of fruit up to 58.4% and 49.4%, respectively. However, treatment of radiation higher than 20 Gy significantly inhibited the growth, chlorophyll content and yield of pepper fruit. Activities of antioxidant enzymes, SOD and POD, were temporary increased within one or five days after treatment depending on the doses of treatment, and the activities were gradually decreased to control level or lower thereafter. The SOD and POD activities in the leaves of pepper plant treated with 50 Gy were 5.5 and 6.0 folds higher than that of control at five days after treatment, respectively.

Key words – γ-radation, superoxide dismutase, peroxidase, red pepper

서 론

고선량의 방사선은 생물의 생존에 심각한 피해를 주며, DNA 손상으로 돌연변이를 유발하는 등 심각한 유해성을 가지고 있으나, 오래 전부터 방사선은 의학분야에 다양하게 이용되었고 농업분야에서도 식품이나 기구의 멸균, 살충, 육종 및 생육억제 등에 유익하게 이용되어 왔다. 이미 19세기말에 저선량의 방사선이 생리활성을 촉진한다는 것이 증명되었으나[3], 생물에 대한 방사선의 연구는 대부분이 저선량보다 고선량의 유해성이나 이용성을 중심으로 수행되어 왔다[12].

*To whom all correspondence should be addressed
Tel: 054-820-5623, Fax: 054-820-5785
E-mail: skwon@andong.ac.kr

방사선은 그 존재량의 차이는 있지만 지구상의 어느 곳에나 있으며 모든 생물은 일상생활 중에 항상 자연방사능에 노출되어 있다. 따라서 저 수준의 방사선은 생물의 진화와 환경적응에 필수적이라는 가설도 제기되고 있다. 최근 많은 연구자들에 의해 유해수준 이하의 저선량 방사선이 식물의 다양한 생리활성을 촉진(hormeosis)한다는 보고가 되고 있다[9,16]. 특히 식물을 대상으로 종자발아 및 생리활성의 촉진[5,9,12], 물질함량의 증가[1,12,19], 숙기의 단축[17] 및 수량의 증가[4,14,17] 등과 같은 촉진효과가 입증되고 있다.

항산화효소는 생물의 세포에 축적된 활성산소종($\cdot O_2^-$, H_2O_2, $OH\cdot$)의 독성으로부터 자신을 보호하기 위해 생성하는 효소로 superoxide dismutase, peroxidase 및 catalase (CAT)등이 알려져 있다[2]. 활성산소종은 자연 방사선인 자외선스트레스에 의해서도 다량 발생되며 최근에는 항산화효소 유전자를 도입한 저항성 식물체의 개발이 시도되고 있다[11]. 한편 방사선은 생체에 활성산소를 과다하게 발생하여 치명적인 장해를 유발하는 것으로 알려져 있으며[10,15], 고선량의 감마선은 세포내에 존재하는 물분자 중 산소-수소 결합을 분해하여 $OH\cdot$ 기를 과다 생산하는 것으로 알려져 있다[8,10,15].

따라서 본 실험은 고추의 유묘에 방사선을 처리하여 고추의 생육 및 수량에 미치는 영향을 구명하고 방사선을 조사한 식물체에서 항산화 효소인 SOD와 POD의 활성을 측정하여 방사선에 대한 고추의 생리활성증진 효과와 식물의 반응기작을 연구하기 위한 기초 자료를 얻기 위해서 수행되었다.

재료 및 방법

식물재료 및 방사선 처리

실험에 사용된 고추(*Capsicum annum* L.)의 품종은 경상북도 영양지역의 재래품종인 수비초였다. 식물재료 확보를 위해 종자를 상토에 파종하여 25℃ 생장조절실에서 형광등 조명으로 재배하였다. 방사선처리는 13~15 엽기에 도달한 묘 중 크기가 균일한 것을 엄선하여 한국원자력연구소 방사선 조사시설에서 하였다. 방사선의 소스는 ^{60}Co인 감마선을 사용하였고 0, 1, 5, 10, 20 및 50 gamma ray (Gy)까지 선량별로 처리하였다.

재배 및 생육조사

방사선을 처리한 식물체는 즉시 1/2,000a 폿트에 이식하여 처리직후부터 일정 간격으로 초장 및 엽수를 조사하였고, 처리후 80일에는 화아수, 꽃수 및 과실수를 조사하였고 식물체 전체를 수확하여 엽면적과 건물중을 조사하였다.

엽록소함량 측정

방사선을 처리한 후 20일과 80일에 일정 엽면적($10cm^2$)의 시료를 채취하여 $CaCO_3$와 넣은 후 막자사발에 마쇄하고 acetone과 ether로 엽록소를 추출하였다. 총 엽록소함량은 추출액을 분광광도계로 660 nm와 642.5 nm에서 흡광도를 측정하여 $7.12A_{660nm} + 16.8A_{642.5nm}$ 식에 의해 계산하였다[6].

항산화효소 활성측정

방사선을 조사한 후 0, 1, 5, 20일 후에 항산화효소인 superoxidase dismutase (SOD)와 peroxidase (POD)의 활성을 측정하였다. 조효소는 1 g 생체시료를 액체질소에 마쇄 후 0.05 M potasium phosphate buffer로 추출하였다[13]. SOD의 활성은 xanthine/xanthine oxidase 반응에서 발생되는 $\cdot O_2^-$가 cytochrome c를 환원하는 정도를 550 nm에서 흡광도로 측정하였는데, 활성 1 unit는 25℃에 xanthine oxidase의 활성이 50%가 억제되는 시료의 량으로 환산하였다[13,15]. POD의 활성은 pyrogallol을 기질로 하여 100 $\mu\ell$ 조효소와 반응시켜 25℃에서 30초 후에 420 nm에서 흡광도를 측정하였다[2]. 효소활성은 식물체의 단백질함량을 측정(Bio-Rad사, Protein Assay Kit)하여 unit/mg protein으로 계산하였다.

결과 및 고찰

방사선처리에 대한 식물의 생장반응

고추 유묘에 방사선을 0, 1, 5, 10, 20 및 50 Gy를 처리한 후 0, 20, 50 및 80일 후에 초장과 엽수를 조사하였다(Fig. 1). 방사선을 처리한 선량별로 고추의 초장을 비교해 보면 저선량인 1 및 5 Gy을 처리한 식물체는 무처리에 비해 초장이 증가하였고, 10 Gy 이상의 고선량에서는 선량이 증가할수록 현저한 감소를 보였다. 방사선을 처리한 후 80일째에 무처리 식물체의 초장은 56.0 cm이었으나 방사선 1 Gy를

처리한 식물체는 65.3 cm로 무처리보다 16.6%의 초장증가 효과가 나타났다. 한편 고선량인 20 및 50 Gy를 처리한 식물체는 각각 43.7 및 14.5 cm의 초장을 보여 각각 22.0 및 75%의 초장 감소를 초래하였다. 특히 본 실험에서 처리한 방사선 중 가장 고선량인 50 Gy를 처리한 식물체는 처리 당시의 초장과 처리 80일 후의 초장이 거의 같아 고선량의 방사선은 식물의 길이 생장에 치명적인 해를 주는 것으로 나타났다. 한편 방사선을 처리한 식물체의 잎 수를 조사한 결과 1 및 5 Gy 처리에서는 무처리에 비해 잎의 수가 현저히 증가한 반면 고선량인 20 및 50 Gy에서는 현저한 감소를 보여 방사선의 잎 수에 미치는 영향도 초장에 미치는 영향과 비슷한 경향이었다(Fig. 1). 방사선 처리후 80일에 조사한 잎의 수는 무처리가 식물체 당 381.7개인데 비하여 방사선 1 및 5 Gy를 처리한 식물체는 각각 476.7 및 539.0개로 무처리보다 많았고, 고선량인 20 및 50 Gy를 처리한 식물체는 각각 281.7개 및 17개로 무처리에 비해 현저한 감소를 보였다(Fig. 1). 따라서 저선량인 1 및 5 Gy 처리는 고추식물체의 초장과 잎의 수를 증가시키는 효과가 있었으나, 10 Gy 이상의 고선량 처리는 방사선의 선량이 높을수록 억제정도가 심하게 나타났다.

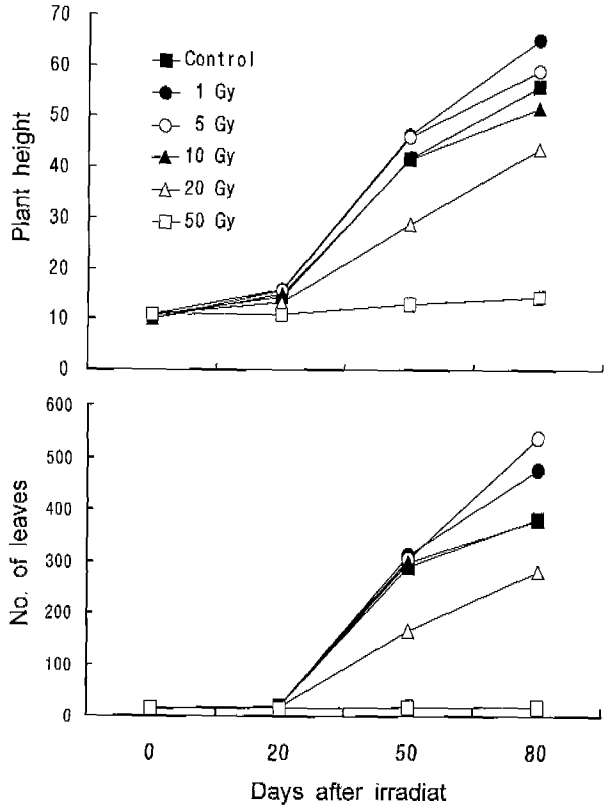

Fig. 1. Changes in plant height (cm) and number of leaves (no./plant) as affected by seedling (13~15 leaf stage) treatment of γ-radiation determined at 0, 20, 50 and 80 days after treatment.

방사선을 처리한 고추의 화기 발달과 과실형성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 처리 선량별로 화아수, 꽃의 수 및 과실의 수를 조사하였다(Table 1). 먼저 총 형성된 화기의 수, 즉 화아, 꽃 및 과실을 합한 수를 보면 1 Gy 처리가 117.4개로 무처리 70.8개에 비해 많았고, 5, 10, 20 Gy를 처리한 식물체도 90.7, 86, 86개로 무처리보다 많았다. 그러나 50 Gy를 처리한 식물체는 전혀 화기의 형성이 관찰되지 않았다. 실제 고추의 수량으로 간주 할 수 있는 과실의 수는 1 Gy처리에서는 무처리보다 유의하게 증가하였으나 5 Gy를 처리한 식물체는 무처리와 유의한 차이가 인정되지 않았다. 한편 10 Gy 이상을 처리한 식물체는 처리 선량이 증가함에 따라 과실수도 현저하게 줄었다. 재배적 측면에서 보면 식물체에서 형성된 화아가 정상적으로 개화하고 개화된 꽃으로부터 정상적인 수분과 수정이 이루어진 후 가능한 많은 수의 과실이 형성되는 것이 수량을 증가시키는 바람직한 방법일 것이다. 본 실험의 결과를 보면 1 Gy나 5 Gy를 처리하면 무처리에 비해 화아 및 꽃의 수가 증가되고 과실의 수도 증가되나 비교적 고선량인 10 Gy 처리는 꽃의 수는 가장 많았으나 과실로의 발달은 1 Gy 혹은 5 Gy처리에 비해 저조하며, 그보다 고선량인 20 Gy처리는 화아의 수는 70.0개로 무처리가 30.2개인데 비해 많으나 화아로부터 꽃과 과실로의 발달되는 것은 현저히 감소되었

Table 1. Effect of γ-radiation on the flowering and fruit setting of pepper plant[1)]

Doses (Gy)	Number/plant			
	Flower bud	Flower	Fruit	Total
Control	30.2 b	9.0 b	31.7 cd	70.8 b
1	55.2 c	15.0 bc	47.2 e	117.4 d
5	33.4 b	19.3 c	38.0 de	90.7 c
10	29.0 b	30.0 d	27.0 c	86.0 c
20	70.0 d	2.0 a	14.0 b	86.0 c
50	0.0 a	0.0 a	0.0 a	0.0 a

[1)]Pepper seedlings were treated with γ-radiation (^{60}Co) at 13-15 leaf stage and transplanted to 1/2,000a pot, and then counted at 80 days after treatment. In a column, means followed by a common letters are not significantly different at the 5% level by DMRT.

다. 본 실험에서 처리한 방사선은 화아가 형성되기 이전에 처리한 것으로 고선량의 방사선이 개화나 암수 생식기관의 발달에 이상을 초래하였을 가능성이 있는 것으로 추정된다.

Table 2는 방사선 처리 후 80일에 고추 식물체를 모두 수확하여 엽면적과 잎 및 과실을 포함한 지상부와 뿌리의 건물중을 조사한 것이다. 엽면적은 1 Gy 및 5 Gy 처리가 각각 2,800.3 및 2,345.7 cm^2/plant로 무처리가 1,694.7 cm^2/plant인데 비하여 현저하게 증가하였으나 이들 잎의 건물중은 무처리와의 차이가 인정되지 않았다. 한편 과실의 건물중은 무처리가 8.9 g/plant 비해 1 Gy 및 5 Gy처리가 14.1 및 13.1 g/plant로 이들 처리의 수량의 증가 효과가 인정되었다. 뿌리의 건물중은 고선량인 50 Gy를 제외하고는 무처리와 유의한 차가 없었으나 지상부의 생육은 1 Gy 및 5 Gy 처리에서 현저한 증가 효과가 나타났고, 20 Gy이상의 고선량 처리에서는 무처리에 비하여 억제되었다.

이상의 방사선처리에 의한 고추 식물체의 생육반응을 보면 저선량인 1 및 5 Gy 처리에서는 고추의 초장, 엽수 및 건물중과 수량의 증가가 뚜렷하게 관찰되었으나, 10 Gy 처리는 무처리와 비슷하거나 약간 증가하였고, 고선량인 20 Gy 이상 처리에서는 현저한 생육 억제가 나타나고, 50 Gy를 처리한 식물체는 거의 생육이 중지되는 것으로 나타났다.

방사선에 대한 생물활성촉진효과(hormetic effect)는 여러 가지 작물을 대상으로 증명되고 있는데, 주로 저선량의 방사선 처리에 의한 발아촉진, 광합성 증가, 숙기단축, 물질함량 및 수량 증가와 같은 효과가 증명되었다[1,5,7,9]. Pal[14]은 토마토 종자에 감마선 1 kR이하의 저선량을 처리하면 식물체에 탄수화물, 아미노산 및 carotene 색소가 증가하며, 수분, 질소 및 인산의 흡수가 증가하며 수량증가 효과가 나타난다고 보고하였다. 한편 Lee 등[12]은 고추 건조종자에 저선량의 방사선을 처리하면 종자의 발아율과 식물체의 무기성분 함량이 증가하는 효과가 있다고 하였다. 본 실험에서는 식물체인 유묘에 방사선을 직접 처리하였으나, 저선량인 1−5 Gy의 방사선 처리에서 초장, 엽수 및 수량 등에서 뚜렷한 증가를 보여 종자처리 뿐만 아니라 식물체에 처리한 경우에도 저선량 방사선의 생물활성촉진효과가 인정되었다. 그러나 20 Gy이상의 고선량 방사선은 오히려 고추의 생육 및 수량에 뚜렷한 억제작용을 나타내었다.

Fig. 2는 방사선에 노출된 식물체를 정상의 상태로 되돌린 후 20일과 80일에 측정한 잎의 엽록소 함량을 나타내었다. 처리 20일 후에는 처리간에 엽록소 함량에 유의한 차이가 보이지 않았으나, 처리 80일 후에는 10 Gy이상의 고선량을 처리한 식물체는 엽록소 함량이 현저히 감소하였다. 그러나 초장, 엽면적 및 수량 등에서 촉진효과를 보였던 저선량인 1 Gy 및 5 Gy 처리는 무처리 식물체와 엽록소 함량에 차이가 없었다. 따라서 방사선을 처리한 식물체의 엽록소 함량만으로는 저선량의 방사선의 생장촉진효과를 해석할 수 없었다. 한편 고선량을 처리한 식물체의 생육 및 수량억제 효과와 엽록소 함량의 감소가 유사한 경향이나, 고선량에 의한 엽록소 함량의 감소가 식물의 생육과 수량 감소에 일차적인 원인으로 작용했을 것으로 보기 힘들며, 본 실험에서 나타난 엽록소 함량의 감소는 고선량 방사선의 다양한 유해작용 중의 한 결과일 것으로만 추정된다.

항산화효소의 활성

방사선을 처리한 후 일정 시간별로 항산화 효소인 su-

Table 2. Effect of γ-radiation on the growth and dry weight of pepper plant[1)]

Doses	Leaf/plant		Fruit dry	Dry weight (g)/plant		
(Gy)	Area (cm^2)	Dry wt (g)	wt (g) /plant	Top	Root	Total
0	1,694.7 c	11.6 bc	8.9 c	32.4 c	7.4 b	39.8 c
1	2,800.3 e	15.2 c	14.1 d	47.5 e	8.7 b	56.2 e
5	2,345.7 de	13.3 c	13.3 d	40.1 de	7.8 b	47.9 de
10	2,056.0 cd	12.6 bc	10.9 cd	36.3 cd	7.8 b	44.1 cd
20	1,216.0 b	8.3 b	5.4 b	22.7 b	5.6 b	28.3 b
50	86.3 a	1.2 a	0.0 a	2.9 a	0.5 a	3.4 a

[1)]Pepper seedlings were treated with γ-radiation (^{60}Co) and transplanted to 1/2,000a pot, and then harvested 80 days after treatment. Dry weight of top is sum of leaf, stem and fruit weight. In a column, means followed by a common letters are not significantly different at the 5% level by DMRT.

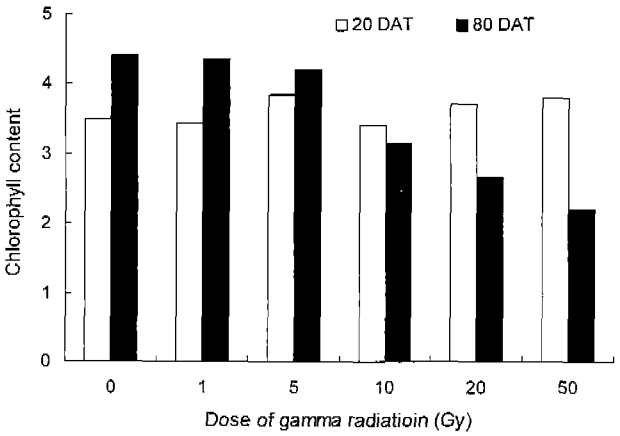

Fig. 2. Effect of various doses of γ-radiation on chlorophyll content ($\mu g/cm^2$) in pepper leaf determined at 20 and 80 days after treatment.

peroxide dismutase (SOD)와 peroxidase (POD)의 활성을 측정하였다(Table 3). 모든 선량에서 방사선을 처리한 후 정상 상태에 다시 1~5일이 경과하면 항산화 효소의 활성이 증가하나 증가된 활성이 계속 유지되는 것이 아니라 다시 활성이 감소하는 것으로 나타났다. SOD 효소의 활성을 보면 1 Gy를 처리한 식물체는 5일 후에 26.7 unit/mg protein으로 활성이 최고에 도달하나 10 및 50 Gy를 처리한 식물체는 처리 1일 후에 각각 36.7 및 68.8 unit/mg protein으로 최고 활성을 보여 노출된 선량이 높을수록 효소활성의 증가가 빨리 나타나며, 무처리에 대한 활성의 증가 정도도 높은 경향이었다. POD의 활성도 SOD의 활성과 같이 1, 10, 50 Gy처리에서 각각 1일 후에 18.8, 39.8 및 43.9×10^{-2} unit/mg protein를 보여 노출된 선량이 증가할수록 효소 활성도는 높았다. 한편 SOD 및 POD 공히 1 및 10 Gy를 처리한 식물체는 방사선 조사 후 20일에 측정한 효소의 활성이 무처리 식물체와 비슷하나 50 Gy를 처리한 식물체는 무처리보다 낮았다.

Table 3. Enzyme activities of superoxide dimutase (SOD) and peroxidase (POD) extracted from pepper leaves treated with various doses of γ-radiation measured at 0, 1, 5 and 20 days after treatment (DAT)

Doses (Gy)	SOD (unit/mg protein)				POD ($\times 10^{-2}$unit/mg protein)			
	0	1	5	20 DAT	0	1	5	20 DAT
0	11.7	12.5	10.9	16.7	8.6	7.3	8.9	9.4
1	10.6	15.4	26.7	10.6	8.2	18.8	18.7	8.7
10	15.7	36.7	24.7	14.8	11.7	39.8	19.1	12.4
50	28.8	68.8	15.3	8.7	13.2	43.9	16.1	4.7

식물은 자신의 생활사에서 다양한 종류의 생물적 혹은 비생물적 스트레스에 직면하게 되는데, 이러한 스트레스의 많은 부분이 활성산소종의 증가에 의한 산화적 스트레스를 유발하는 것으로 알려져 있다. 식물에 주로 작용하는 산화적 스트레스원으로는 자외선, 오존, 화학물질 및 환경오염에 의한 산성비 등이 알려져 있으며, 이들 스트레스는 식물세포의 항산화 기구에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2,15]. 고선량 방사선의 인체 유해작용은 활성산소종의 증가에 의한 세포의 치명적인 독성발휘가 그 원인이며[10], 특히 감마선의 고 에너지는 세포내의 물분자를 분해하여 hydroxyl 기를 발생하여 강한 산화력을 가지게 되는 것으로 알려져 있다[2,8,10]. 본 실험에서 방사선 처리에 의해 항산화효소인 SOD와 POD의 활성이 급격히 증가하는 것은 방사선 에너지에 의한 식물의 산화적 스트레스가 증가함에 따른 장해를 극복하기 위한 자체 방어기작으로 추정된다. 그러나 고선량의 방사선에 의한 과다한 산화스트레스는 항산화효소의 활성증가에도 불구하고 식물세포에 심각한 독성으로 작용하여 계속적인 식물의 생장이 억제되고 더 나아가 개화와 과실의 형성에도 장해가 초래되었을 것으로 추정된다. 본 실험에서 나타난 1~5 Gy의 저선량 방사선 조사가 고추의 생육과 수량을 증진하는 효과가 방사선의 어떠한 기작에 의해서 유발되는지는 아직 알 수 없으나 방사선의 이용측면에서 계속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

요 약

고추의 유묘에 감마 방사선(^{60}Co)을 조사하여 식물의 생육, 수량, 엽록소함량 및 항산화 효소, superoxide dismutase (SOD) 및 peroxidase (POD)의 활성에 미치는 영향을 조사하였다. 고추의 초장은 1 Gy 처리에 의해 무처리보다 16.6%가 증가하였으나 고선량인 20 Gy 및 50 Gy 처리에 의해서는 각각 22.0 및 75.0%가 감소하였다. 잎의 수는 1 Gy 및 5 Gy 처리에서 각각 41.2 및 24.9%가 증가하였으나 20 Gy 이상의 고선량에서는 감소하였고, 과실은 1 및 5 Gy 처리에 의해 착과수가 증가하였고, 건물중 기준으로 각각 58.4

및 49.4%가 증가하였다. 저선량의 방사선의 처리는 고추의 엽록소함량에 영향을 미치지 않았으나, 10 Gy 이상의 고선량 처리에서는 감소되었다. 항산화 효소의 활성은 방사선 처리 후 5일까지는 증가하며 선량에 높을수록 증가 활성이 높으나, 증가된 활성은 다시 감소하여 처리 후 20일에는 무처리와 비슷하거나 낮았다. 50 Gy를 처리한 후 5일째에 측정한 SOD 및 POD의 효소 활성은 무처리에 비하여 각각 5.5 및 6.0배가 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소의 원자력연구개발사업의 연구비(M2-0104000024- 01A040000611)지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Abdullaev, M. A. and N. M. Berezina. 1968. Radiostimulating effect in γ irradiated tomato seedlings. *Dokl. Akad. Nauk Az. SSR.* **24,** 38-40.
2. Alscher, R. G. and J. L. Hess. 1993. *Antioxidants in Higher Plants.* pp 1-174, CRC Press, Boca Raton.
3. Atkisnson, G. F. 1989. Report upon some preliminary experiment with the Röntgen rays on plant. *Science* **7,** 7-9.
4. Breslavets, I. P., N. M. Berezina, G. L. Shchibria, M. L. Romanchikovam, V. A. Lazykova and Z. F. Mileshko. 1960. Increased yield of radishes and carrots by X or γ irradiation of seeds before sowing. *Biophsics (USSR)* **5,** 86-89.
5. Campos, F. F. and E. G. Velasco. 1962. Comparative effect of cobalt^{60} on plant character of two recommended Philippine lowland rice varieties. *Philipp. Agric.* **46,** 93-95.
6. Cuniff, P. 1995. *Official Methods of Analysis of AOAC International.* pp 27-28 16th eds. Vol (I), AOAC International.
7. Denger, W. and W. Schacht. 1975. Examination of the specific effect of low doses of ionizing radiation on the seed of cultivated plants ; 5 year production experiments with silo maize seed orradiated with ^{60}Co gamma radiation. *Radiobiol. Radiother.* **16,** 37-40.
8. Dubner, D., P. Giscone, I. Jaitovich, M. Perez. 1995. Free radicals production and estimation of oxidative stress related to gamma irradiation. *Biol. Trace Elem. Res.* **47,** 265-270.
9. Kaiwdl, K. and M. Rosner. 1965. The accelerating effect of small radiation doses on plant. *Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch* **42,** 11-29.
10. Kergonou, J., P. Bernard, M. Braquet, G. Rocquet. 1987. Effect of whole body gamma irradiation on lipid peroxidation in rat tissue. *Biochimie* **63,** 555-559.
11. Kwon, S. Y., H. S. Lee, S. S. Kwak. 2001. Development of environmental stress-tolerant plants by gene manipulation of antioxidant enzymes. *Plant Pathol. J.* **17,** 88-93.
12. Lee, E. K., J. S. Kim, Y. K. Lee and Y. B. Lee. 1998. Effects of low dose γ-ray irradiation on the germination and growth in red pepper. *J. Korean Soc. Horticultural Sci.* **39,** 670-675.
13. McCord, J. M. and I. Fridovich. 1969. Superoxide dismutase an enzymatic function for Erythrocupretein. *J. Biol. Chem.* **244,** 6049-6055.
14. Pal, I. 1975. Investigation on the effects of seed irradiation of plants in a phytotron. I. Tomato. *Stim. Newsl.* **8,** 23-36.
15. Scandalios, J. G. 1993. Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiol.* **101,** 7-12.
16. Sheppard, S. C. and W. G. Evenden. 1986. Factors controlling the hormeosis response of field crops to very low does of gamma irradiation of seed. *Ca. J. Plant Sci.* **66,** 431-435.
17. Stan, S. and A. Croitoru. 1970. Effect of low, moderate and high levels of gamma radiations (^{60}Co) on soybean plants. I. Analysis of growth and yield. *Stim. Newsl.* **1,** 23-25.
19. Vlasyuk, P.A. 1964. Effect of ionizing radiation on the physiological biochemical properties and metabolism of agricultural plants. *Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR.* 24-31.

(Received September 24, 2001; Accepted November 22, 2001)