

Effects of low dose gamma irradiation on the germination and physiological activity of old red pepper (*Capsicum annuum* L.) seed

Jae-Sung Kim, Myung-Hwa Back, Hae-Youn Lee,
Young-Keun Lee

Korea Atomic Energy Research Institute,

묵은 고추종자의 발아와 생리활성에 미치는 저선량 방사선조사 효과

김재성 · 백명화 · 이해연 · 이영근

한국원자력연구소, 동위원소 · 방사선 응용연구팀

(2001년 7월 26일 접수, 2001년 8월 29일 채택)

Abstract - To observe the stimulating effects of low dose gamma radiation on the germination and physiological activity of germinating seeds of old red pepper (*Capsicum annuum* L. cv. Jokwang and cv. Hongkwang), seeds were irradiated at the dose of 2~50 Gy. The germination rate of irradiation group was higher than that of the control. Especially it was highest at the early stage of induction. The germination rate at 7 days after sowing in Jokwang and Hongkwang cultivar was high as 74% and 11% at 4 Gy and 8 Gy irradiation group, respectively. The seedling height of Jokwang cultivar was noticeably high at 4 Gy irradiation group and that of Hongkwang cultivar at 8 Gy irradiation group. The protein contents of seedlings from seeds irradiated with low dose gamma radiation of Jokwang cultivar increased at the late stage of induction and that of Hongkwang cultivar at the early stage of induction. Catalase and peroxidase activities of seedlings from seeds irradiated with low dose gamma radiation of Jokwang cultivar increased at 4 Gy irradiation group and that of Hongkwang cultivar at 8 Gy irradiation group.

Key words : catalase, germination rate, low dose gamma radiation, peroxidase, protein contents, red pepper, stimulating effect

요약 - 저선량 방사선 조사가 묵은 고추종자의 발아율과 발아종자의 생리활성에 미치는 효과 등을 알아보고자 4년 저장한 조광고추와 3년 저장한 홍광고추 종자에 저선량 γ 선을 2~50 Gy 까지 조사하여 관찰한 결과는 다음과 같다. 저선량 조사한 고추종자의 발아율은 대조구보다 증가하는 경향을 보였다. 특히 발아초기에 그 효과가 뚜렷하게 나타나 파종 7일 후에 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서 74%, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 11% 증가하였다. 고추의 유효초장에서 거의 모든 저선량 조사구에서 증가하였는데 특히 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 유의성있는 증가효과를 보였다. 저선량 조사한 종자의 단백질 함량은 조광고추 품종은 발아후기에, 홍광고추 품종은 발아초기에 증가하였고, catalase와 peroxidase 활성은 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 높은 값을 보였다. 이에 저선량 γ 선 조사에 의해 묵은 종자의 발아와 생리활성이 촉진됨을 확인할 수 있었다.

중심어 : 고추, 단백질 함량, 발아율, 저선량 감마선, 촉진효과, catalase, peroxidase 활성

서 론

고갈되어 가는 유전자원과 현재의 농경법으

로 인구증가에 따른 식량 수요를 충족시키기 위해서는 한계가 있다. 그러므로 이를 해결하기 위한 획기적인 식량 생산 방법이 필요하며 또한 농

업 생산성 향상 및 종자의 발아력 향상을 위한 기술이 매우 필요하다.

최근 종자 발아력을 향상시키기 위해 여러가지 물리적 또는 화학적 방법들이 이용되고 있으나 경제성과 안전성 문제 등으로 보다 효과적인 처리방법이 필요한 실정이다[1].

저선량 이온화 방사선에 의한 피폭효과는 hormesis의 일반적인 개념, 즉 유해작용을 가진 작용물질이 유해량 이하의 투여에서는 생물체를 자극한다는 법칙과 일치하는데, 이온화 방사선의 종류에 상관없이 비슷한 생물학적 효과 즉 발아, 생장과 발육촉진 및 수량구성요소 증가 등이 나타난다. 실험과 환경 및 방사선조사 조건에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 사용하는 선량은 환경선량의 100 (10~1000)배 또는 확실한 유해선량의 100 (10~1000)분의 1 정도이나 식물의 반치사선량 (LD_{50})은 고등동물에 비해서 최소 수백배 정도 높게 나타난다[2, 3, 4, 5].

저선량 방사선조사에 의해 자극된 채소작물에는 품종과 종자 저장기간에 따라 그 적정선량은 다르지만 배추의 경우에는 초기생육과 수량을 증가시키며[4, 5], 고추[6], 박[7] 등의 생육촉진과 수량증가 등 농업적 가치가 있는 것이 많이 보고되어 있다. 특히 저선량 γ 선 조사에 의한 채소류 종자의 발아와 초기생육 촉진효과는 신규종자보다도 묵은 저장종자에서 그 효과가 뚜렷하였다. 이외에도 여러가지 채소류에서 저선량 방사선 조사에 의한 효과가 많이 보고되어 있는데, 과와 시금치 종자의 발아와 초기생육 촉진 및 발아종자에서의 전분분해와 glutamic acid decarboxylase activity 활성 증가[8], 겨자의 호흡, catalase 활성, vitamin C와 질소 함량 증가[9], 당근의 광합성과 핵산 합성 증가[10], 홍화의 catalase와 lipase 활성 증가[11] 등이 있다.

이에 본 실험에서는 저선량 γ 선 조사가 묵은 고추종자의 발아와 유묘생육 및 발아종자의 생리활성 변화에 미치는 영향을 관찰하여 저선량 방사선조사에 의한 식물 자극효과를 확인하므로써 방사선 hormesis를 규명하고 그 작용기구를 해석하기 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

재료 및 방법

공시품종과 방사선 조사

시험용 재료로는 시판중인 고추종자를 구입하여 실온에서 4년간 저장한 홍농종묘의 조광고추 (*Capsicum annum* L.)와 3년간 저장한 농진종묘

의 홍광고추 품종을 각각 선정하였다. 저선량 방사선 조사는 한국원자력연구소에서 보유중인 저준위조사시설 (^{60}Co)을 이용하여 0, 2, 4, 6, 8, 10, 50 Gy의 γ 선을 실온에서 건조종자에 직접 조사하였다. 조사선량율은 Fricke dosimeter를 사용하여 확인하였다[12].

발아실험

방사선 조사직 후 직경 9 cm petridish에 여과지 (Whatman No. 2) 2장을 깔고 50립씩 5반복으로 치상하여 멸균수 5 mL을 공급한 후 20°C · 광상태의 incubator에서 12일 동안 발아양상과 유묘생육을 조사하였다.

단백질 정량과 효소활성 측정

저선량의 γ 선을 조사하여 발아중인 종자의 단백질 함량과 효소활성 측정을 위하여 고추종자의 발아초기 (9 DAS-days after sowing)와 후기 (12 DAS)에 발아종자 0.2 g씩을 액체질소를 사용하여 얼린 다음 막자사발에서 마쇄한 후 0.05 M 인산완충액 (pH 7.0) 0.4 mL를 첨가한 다음 4°C에서 10,000 g으로 10분간, 11,000 g에서 15분간 원심분리하여 얻은 상등액을 조효소액으로 사용하였다. 단백질 정량은 bovine serum albumin을 표준단백질로 사용한 Bradford[13]의 방법에 따라 측정하였다. Catalase (CAT) 활성은 기질인 H_2O_2 의 감소량을 측정하는 방법을 사용하였다[14]. 효소측정을 위한 반응용액은 0.053 M H_2O_2 1 mL, 효소액 0.1 mL, 0.05 M 인산완충액 (pH 7.0) 1.9 mL의 혼합액으로 하여, 효소활성 (unit)은 cuvette내에서 효소에 의한 H_2O_2 의 분해를 240 nm의 흡광도 감소를 1분간 측정하여 다음의 식으로 계산하였다. CAT 활성 (unit/g 건물중) = $(\Delta A_{240}/\text{min} \times \text{희석배율}) / (2 \times 43.6^*)$. 여기서 43.6*은 240 nm에서 H_2O_2 의 흡광계수이다. Peroxidase (POD) 활성은 pyrogallol을 기질로 사용하여 측정하였다[15]. 조효소액 100 μL 를 3 mL cuvette에 넣고 0.1 M 인산완충액 (pH 6.0) 0.32 mL, 0.147 M H_2O_2 0.16 mL, 5% pyrogallol 용액 0.32 mL과 증류수 2.1 mL을 함께 섞은 후, 420 nm에서 20초간 상온에서 흡광도 변화를 측정하여 구하였다. UV 측정 시 반응액의 흡광도가 0.4~0.7이 되도록 조효소액을 희석하여 효소활성을 측정하였다. POD 활성은 다음의 식으로 구하였다. POD 활성 (unit/g 건물중) = $[(\Delta A_{420}/20\text{sec}) \times (\text{희석배율})] / (12^* \times \text{g시료/mL 반응액})$. 여기서 12*는 420 nm에서의 흡광계수이다.

통계분석

통계적 유의성은 student *t* test로 각 실험구의 값을 비교하였으며, *p*값이 0.05, 0.01, 0.001보다 적은 경우로 나누어 각각의 유의성을 평가하였다.

결과 및 고찰

저선량 방사선조사에 의한 발아율과 초기생육

저선량 방사선이 묵은 고추종자의 발아에 미치는 영향을 알아보기 위해 종묘회사와 생산년도가 다른 두 품종을 선정하여 저선량 γ 선을 조사한 종자를 incubator에서 발아시켜 발아개시일로부터 6일 동안 발아율을 관찰한 결과는 그림 1과 같다.

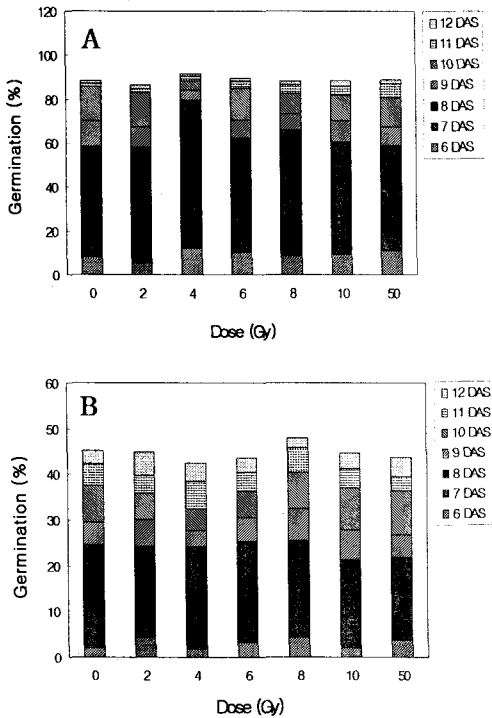


Fig. 1. Germination rate of red pepper seeds irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. DAS ; days after sowing.

발아개시일 (파종 6일 후)에 조사한 조광고추 품종의 발아율은 2 Gy 조사구를 제외한 모든 선량에서 대조구가 8.0%인데 비하여 6~49% 증가하였는데, 특히 4 Gy 조사구에서 12.0%로 가장 높았다. 홍광고추 품종의 경우는 4 Gy 조사구를 제외한 모든 선량에서 증가하였고 특히, 2 Gy와 8

Gy 조사구에서 대조구 1.9%에 비해 4.2%로 118% 증가하였다. 파종 7일 후에는 홍광고추 품종에 비해 조광고추 품종이 뚜렷한 발아촉진 효과를 보였는데, 조광고추 품종의 경우는 4 Gy 조사구에서 대조구 37.8%에 비해 65.7%로 74% 증가하였으며, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 대조구 10.3%에 비해 11.4%로 11% 증가하였다. 파종 8일 후의 발아율은 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서 대조구 58.4%에 비해 36% 증가한 79.6%를 나타냈으며, 홍광고추 품종의 경우는 대조구 24.5%에 비해 8 Gy 조사구에서 3% 증가하여 25.3%를 나타냈다. 또한 파종 9일 후 발아율에서는 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서 대조구 70.0%에 비해 84.1%로 20% 증가하였으며, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 대조구 32.3%에 비해 10% 증가하였다. 저선량 방사선에 의한 고추의 발아율 관찰 시 파종 9일 후부터는 대조구에 비해 저선량 조사구에서 뚜렷한 증가효과가 없었으며, 최종 발아율 조사일인 파종 후 12일에는 조광고추 품종은 4 Gy 조사구에서, 홍광고추 품종은 8 Gy 조사구에서 각각 대조구 88.5%와 45.1%에 비해 3%와 6% 증가한 91.5%와 47.9%를 나타내어 발아후기보다 발아초기에 저선량 방사선에 의한 발아 촉진 효과가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

최종 발아 관찰 시 고추의 유효초장을 측정한 결과는 그림 2와 같다. 조광고추 품종의 경우는 대조구 2.31 cm에 비해 4% 정도 증가한 50 Gy 조사구를 제외한 모든 저선량 조사구에서 고도의 유의성있는 증가효과를 보였다. 특히, 초기발아율에서 뚜렷한 증가효과를 보인 4 Gy 조사구에서 3.50 cm ($p < 0.001$)로 52% 증가하였으며, 다음으로 8 Gy, 10 Gy, 6 Gy, 2 Gy 조사구 순으로 각각 33.2 cm ($p < 0.001$), 3.30 cm ($p < 0.001$), 3.14 cm ($p < 0.001$), 3.10 cm ($p < 0.001$)로 34~43% 증가하였다. 홍광고추 품종의 경우에도 50 Gy 조사구를 제외한 거의 모든 선량에서 증가효과를 보였다. 초기발아율이 높았던 8 Gy 조사구에서 대조구 2.06 cm에 비해 2.80 cm ($p < 0.001$)로 36% 증가하였고, 다음으로 10 Gy, 2 Gy, 4 Gy 조사구 순으로 각각 2.61 cm ($p < 0.01$), 2.50 cm ($p < 0.01$), 2.44 cm ($p < 0.01$)로 18~27% 증가하였다.

이상의 결과로 묵은 고추종자에 저선량 γ 선 조사시 발아율과 유효초장이 증가됨을 알 수 있었는데 그 효과는 품종과 생산년도에 따라 다르게 나타났다.

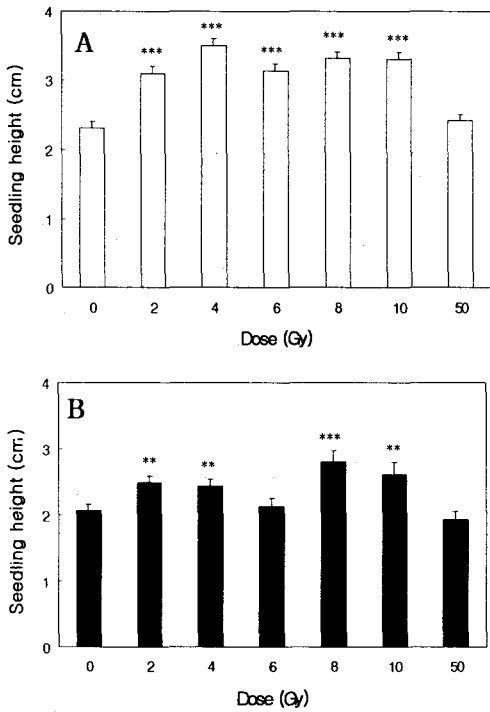


Fig. 2. Seedling height of red pepper at 12 days after sowing. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation.

A ; produced in 1996, cv. Jokwang.

B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean \pm SE (20 seedlings).

** , *** ; $p < 0.01$, $p < 0.001$

김 등[4, 5]은 배추 시판종자에 저선량 γ 선을 조사한 결과 발아율이 10% 정도 증가하였으나 품종과 저장기간에 따라 적정선량이 다르다고 보고한 바 있다. 또한 김 과 이[16] 및 Luckey[17]는 저선량 방사선에 의해 채소종자의 발아율과 초기생육 촉진 및 성장증대 효과에 대해 종합적으로 고찰하였고, 이 등[1, 18]은 고추와 파 종자에 저선량 γ 선을 조사하여 발아율과 초기생육을 조사한 보고서에서 신규 종자보다 묵은 종자에서 그 효과가 뚜렷하다고 하였는데, 본 실험에서도 3년 저장한 종자보다 4년 저장한 종자에서 저선량 γ 선에 의한 효과가 뚜렷함을 확인할 수 있었다. 또한 이 등[1]은 저선량 방사선 조사한 고추의 발아 실험 시 비교적 낮은 선량에서 초기발아가 향상되었다고 보고하였다. 이에 본 실험에서도 저선량 γ 선 조사에 의해 묵은 고추종자 발아율 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 발아율 향상을 위한 적정선량은 4 Gy와 8 Gy인 것으로 나타났다.

저선량 방사선 조사한 발아 종자의 효소활성

저선량 방사선 조사에 의한 묵은 고추종자의 발아율 향상에 관한 자극효과를 효소반응에 의한 생리적 측면에서 해석하고자 종자 발아에 관여하는 효소인 CAT와 POD의 활성을 발아초기인 파종 후 9일과 발아율 조사 최종일인 파종 후 12일로 나누어 단백질 함량과 함께 측정된 결과는 다음과 같다. 발아종자 유묘의 단백질 함량 측정 시 조광고추 품종의 경우 파종 9일 후에는 별다른 증가효과가 없었으나 파종 12일 후에는 모든 저선량 조사구에서 대조구 4.29 mg에 비해 13~35% 증가하였다. 특히 4 Gy 조사구에서 5.78 mg으로 가장 높게 나타났고, 홍광고추 품종은 파종 9일 후에는 모든 저선량 조사구에서 10~24% 증가하였으나 파종 12일 후엔 별다른 증가효과를 보이지 않았다(그림 3).

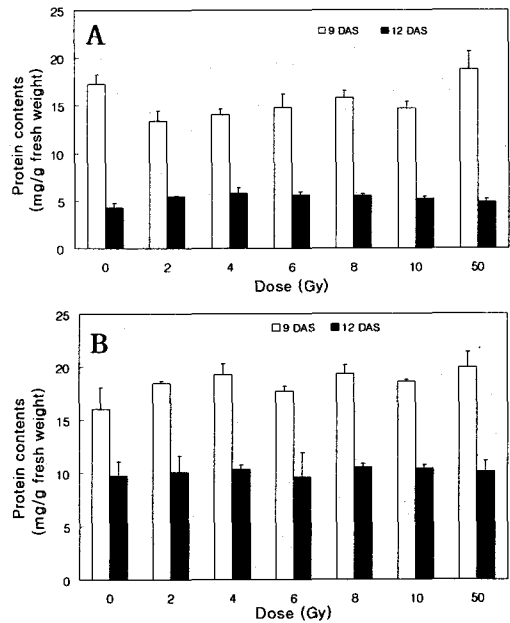


Fig. 3. Protein contents in germinating seeds of red pepper. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation.

A ; produced in 1996, cv. Jokwang.

B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean \pm SE (3 repetitions).

DAS ; days after sowing.

CAT 활성 측정 시 조광고추 품종은 파종 9일 후엔 별 효과가 없었으나 파종 12일 후에는 4 Gy 조사구에서 0.63 unit로 대조구 0.60 unit에 비해 5% 정도 증가하였으며, 홍광고추 품종의 경우는 파종 9일 후에는 8 Gy 조사구에서 0.54 unit로 대

조구 0.48 unit에 비해 13% 정도 증가하였고 파종 12일 후에는 6 Gy 조사구를 제외한 모든 저선량 조사구에서 대조구 0.53 unit에 비해 증가하였는데 특히 유묘초장에서 촉진효과를 보인 4 Gy, 8 Gy 및 10 Gy 조사구에서 각각 0.65 unit, 0.69 unit 및 0.71 unit로 30~34% 증가하였다.(그림 4).

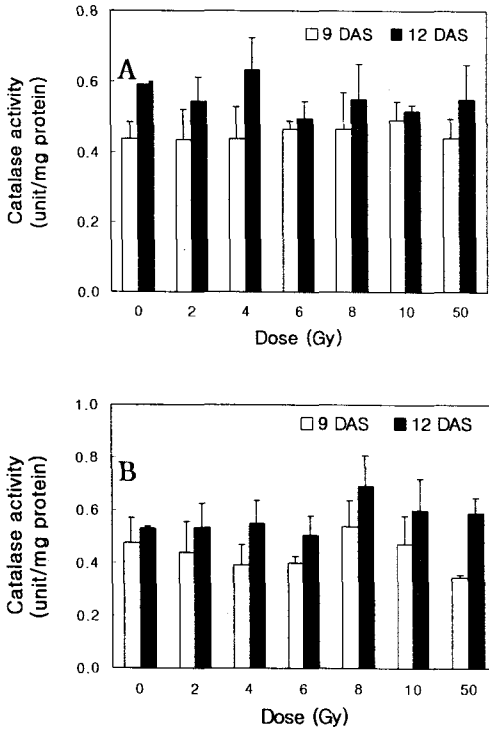


Fig. 4. Catalase activity in germinating seeds of red pepper. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean±SE (3 repetitions). DAS ; days after sowing.

POD 활성은 조광고추 품종의 경우 파종 9일 후에 대조구 2.53 unit에 비해 2 Gy, 4 Gy, 6 Gy 조사구에서 각각 3.16 unit, 3.70 unit, 3.89 unit로 25~54% 정도 증가하였으며 파종 12일 후에는 4 Gy 조사구에서 대조구 3.06 unit에 비해 3.66 unit로 20% 정도 증가효과를 보였고, 홍광고추 품종은 파종 9일 후엔 모든 저선량 조사구에서 대조구 2.27 unit에 비해 8~59% 정도 증가하였는데 특히 8 Gy 조사구에서 3.59 unit로 가장 높은 값을 보였으며 파종 12일 후에는 증가효과가 없었

다(그림 5).

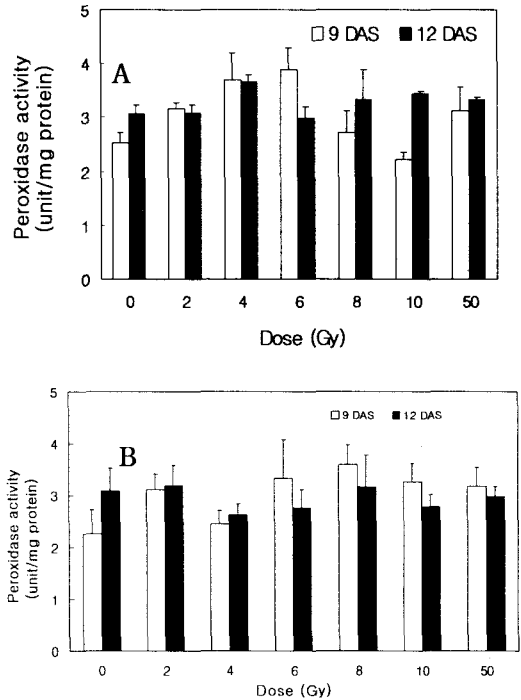


Fig. 5. Peroxidase activity in germinating seeds of red pepper. Seeds were irradiated with different doses of gamma radiation. A ; produced in 1996, cv. Jokwang. B ; produced in 1997, cv. Hongkwang. Data represent mean±SE (3 repetitions). DAS ; days after sowing.

이상의 결과로 볼 때 저선량 조사와 초기생육 촉진 및 생리활성이 반응간에 어떤 뚜렷한 경향을 보이지는 않았지만, 조광고추 품종의 경우는 파종 12일 후에 조사한 단백질 함량과 CAT, POD 활성이 비교적 발아가 촉진되고 유묘초장에서 높은 값을 보인 4 Gy 조사구에서 높게 나타나 초기생육 촉진과 반응사이에 상호 관련성이 있음을 보여 좀 더 관찰할 필요가 있겠다. 또한 홍광고추 품종의 경우도 발아와 유묘초장이 촉진된 8 Gy 조사구에서 생리활성이 높은 유사한 결과를 보여, 종자생리학자들이 구분한 종자발아 4단계 과정 중 2단계인 효소형성 또는 대사활성 증가과정[19]을 확인할 수 있었다. 저선량 조사한 참박[7] 및 과와 시금치[8] 종자에서도 저선량 조사에 의해 발아와 초기생육 촉진효과와 함께 효소활성이 증가한 보고가 있으며 저선량 조사한 종자에서 생육한 배추 식물체의 초기생육 과정에서도

생육촉진과 함께 POD와 CAT 활성이 증가하였다는 보고도 있다[20]. 또한 Garg 등[9]은 겨자종자에 방사선 조사 시 저선량에서는 발아와 생장이 촉진되고 CAT 활성도 증가하였으나 고선량에서는 감소하였다고 보고하였다. 본 실험에서도 저선량 방사선이 묵은 고추종자의 발아와 초기생육을 촉진하며 동시에 효소활성도 증가시킴을 확인할 수 있었으나 적정선량은 다르게 나타나 작물의 종자상태와 발아단계별로 좀 더 세밀한 관찰이 필요하다고 사료된다.

결 론

저선량 방사선 조사에 의한 식물활성 촉진효과를 규명하기 위하여 시판 고추 두 품종을 실온에서 3~4년간 저장한 종자에 저선량 γ 선을 0~50 Gy 수준으로 조사하여 발아율과 유묘초장 및 초기생육에 나타나는 생리적 반응을 조사한 결과는 다음과 같다.

저선량 방사선을 조사한 묵은 고추종자의 발아율은 발아초기에 뚜렷한 증가효과를 보였으나 그 적정선량은 품종별로 달랐다. 저선량 조사선량간에 뚜렷한 발아율 차이를 보인 과광 7일 후, 조광 고추 품종의 발아율은 4 Gy 조사구에서 대조구 37.8%에 비해 65.7%로 74% 증가하였으며, 홍광 고추 품종은 8 Gy 조사구에서 대조구 10.3%에 비해 11.4%로 11% 증가효과를 나타내었다. 고추의 유묘생육은 모든 저선량 조사구에서 유의성있는 증가효과를 보였는데 특히 조광고추는 4 Gy 조사구에서, 홍광고추는 8 Gy 조사구에서 각각 52%와 36% 증가하여 가장 높은 값을 보였다. 저선량 방사선 조사한 묵은 고추종자 유묘중의 단백질 함량 및 종자 발아에 관여하는 효소인 catalase와 peroxidase의 활성을 측정한 결과, 조광고추 품종의 경우는 비교적 발아가 촉진되고 유묘초장에서 높은 값을 보인 4 Gy 조사구에서 활성이 높게 나타났고 홍광고추 품종의 경우도 발아와 유묘초장이 촉진된 8 Gy 조사구에서 단백질 함량과 효소활성이 높게 나타났다. 이에 저선량 방사선이 묵은 고추종자의 발아와 초기생육을 촉진하며 동시에 효소활성도 증가시키나 그 적정선량은 다르게 나타남을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이은경, 김재성, 이영근, 이영복, "저선량 감마선 조사에 의한 고추의 발아와 생육", 한국원예학회지, 39(6), 670-675(1998).
2. A. Maldiney and J.R. Thourenin, "On the influence of X-rays and germination", *Rev. Gen. Bot.*, 10, 81-86(1898).
3. J. Simon, M. Digleria and Z. Lang, "Comparative studies on the effects of low doses X-ray and gamma irradiation on the amylase activity of maize seedling", *Proc. European Soc. for Nuclear Methods in Agriculture*, Aberdean, U. K.(1981).
4. 김재성, 김진규, 이영근, 백명화, 김정규, "저선량 γ 선 조사가 배추종자의 발아와 수량에 미치는 효과" 한국환경농학회지, 17(3), 274-278(1998).
5. 김재성, 이영근, 백명화, 이영복, 박영선, "묵은 배추종자의 발아와 생육에 미치는 저선량 γ 선 효과" 한국환경생물학회지, 17(1), 11-15(1999).
6. N. Izvorska, "The gamma ray effect on the growth, productivity and some biochemical changes of pepper", *Inst. Fiziol. Rast. Bulg. Akad. Nauk.*, 18, 79-83(1973).
7. 김재성, 이영근, 박홍숙, 백명화, 정규희, "저선량 방사선이 참박의 초기생육과 생리활성에 미치는 효과", 한국환경농학회지, 19(2), 142-146(2000).
8. 김재성, 이은경, 백명화, 김동희, 이영복, "저선량 감마선이 채소 발아종자의 생리활성에 미치는 영향", 한국환경농학회지, 19(1), 58-61(2000).
9. C.K. Garg, B. Tirwari and O. Singh, "Effect of presowing gamma irradiated seeds in relation to the germination behavior of Indian colza (*Brassica campestris* L. var. Sarson Prain)", *Indian J. Agric. Sci.*, 42, 53(1972).
10. P.A. Vlasyuk, "Effect of ionizing radiation on the physiological biochemical properties and metabolism of agricultural plants", *Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR.*, 24-31(1964).
11. A.M. Kuzin, M.E. Vagobova and A. F. Revin, "Molecular mechanism of stimulating

- action of an ionizing radiation on seeds. II. Activation of protein and high molecular weight RNA synthesis”, *Radiobiology(Moscow)*, 16, 259(1976).
12. W.H. Niels and J.B. Roger, *Manual on Radiation Dosimetry*, Mard Dekker Inc. New York(1970).
 13. M.M. Bradford, “A rapid sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding”, *Anal Biochem.*, 72, 248-254(1976).
 14. H. Aebi, “Catalase in vitro”, *Methods Enzyme*, 105, 121-126(1984).
 15. B.W. Yun, H.G. Hue, S.Y. Kwon, H.S. Lee, J.K. Jo and S.S. Kwak, “Antioxidant enzyme in *Nicotiana* cells containing an *Ipomoea* peroxidase gene”, *Phytochemistry*, 48, 1287-1290(1998).
 16. 김재성, 이영복, “저선량 전리방사선에 의한 작물의 활성증진”, *한국환경농학회지*, 17(1), 76-85(1998).
 17. T.D. Luckey, *Hormesis with ionizing radiation*, CRC press. Inc. Boca. Raton. Fla(1980).
 18. 이은경, 김재성, 이영근, 이영복, “저선량 감마선 조사가 파종자의 발아에 미치는 영향”, *한국환경농학회지*, 17(4), 215-219(1998).
 19. F.B. Salisbury and C.W. Ross, *Plant Physiology*, Fourth ed., pp. 493-495, Wadsworth P Press, California(1991).
 20. 김재성, 이영근, 백명화, 김동희, 이영복, “배추 유식물의 생장과 항산화효소의 활성에 미치는 저선량 방사선의 효과”, *한국환경생물학회지*, 18(2), 247-253(2000).