

Research Report

전자빔 조사에 따른 잣빛곰팡이병원균 방제효과와 절화 장미의 수확 후 품질

권 송¹, 최경자², 김기선¹, 권혜진^{3*}¹서울대학교 식물생산과학부²한국화학연구원 바이오화학연구센터³천안연암대학 화훼디자인계열Control of *Botrytis cinerea* and Postharvest Quality of Cut Roses by Electron Beam IrradiationSong Kwon¹, Gyung Ja Choi², Ki Sun Kim¹, and Hye Jin Kwon^{3*}¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea²Research Center for Biobased Chemistry, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea³Department of Floral and Plant Design, Cheonan Yonam College, Cheonan 331-709, Korea

Abstract: The present study was conducted to determine the effect of electron beam irradiation on control of *Botrytis cinerea* and postharvest quality of cut roses. Electron beam doses of 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 10, and 20 kGy were applied with a 10-MeV linear electron beam accelerator (EB Tech, Korea). Electron beams inhibited spore germination and mycelial growth of *B. cinerea* with increasing irradiation doses. Conidia of *B. cinerea* were more tolerant to irradiation than were mycelia: the effective irradiation doses for 50% inhibition (ED₅₀) of spore germination and mycelial growth were 2.02 kGy and 0.89 kGy, respectively. In addition, electron beam irradiation was more effective in reducing mycelial growth of *B. cinerea* at 10°C than at 20°C. Analysis of in vivo antifungal activity revealed that elevated irradiation doses exhibited increased control efficacy for tomato gray mold. Flower longevity and fresh weight of cut roses decreased when the irradiation dose was increased. In addition, flower bud opening tended to be inhibited in a dose-dependent manner. Although 'Decoration', 'Il se Bronze', 'Queen Bee', and 'Revue' roses tolerated and maintained overall postharvest quality up to 0.4 kGy, 'Vivian' did not, demonstrating that the irradiation sensitivity of cut roses varies according to cultivar.

Additional key words: flower export, ionizing radiation, phytosanitary, quarantine, temperature

서 언

국내 화훼 수출은 화훼 산업의 성장과 더불어 1990년대부터 급격하게 증가하여 왔다. 화훼 수출은 1990년에는 140만 달러에 불과했으나, 2000년 2,890만 달러, 2005년 5,210만 달러, 2010년 10,307만 달러로 매년 크게 증가하였다. 특히, 3대 절화인 장미, 백합, 국화의 수출 비중이 73%를 차지할 정도로 높은 가운데, 화훼 수출을 주도하고 있는 장미의 비

중은 전체 화훼 수출액의 33%에 이르고 있다(KATI, 2010).

장미에서 발생하는 주요 병해로는 검은무늬병(Reddy et al., 1992), 흰가루병(Pasini et al., 1997) 등이 보고되고 있으나, 그 중에서도 *Botrytis cinerea*에 의해 유발되는 잣빛곰팡이병은 온도가 낮고 습도가 높은 환경에서 활동이 왕성하므로 장미와 다른 절화류의 저장 및 수출과정 중에 많이 발생하여 경제적으로 큰 피해를 주고 있다(Hammer, 1988). 잣빛곰팡이병은 열매를 비롯하여 잎, 줄기, 꽃, 봉오리 등 생육

*Corresponding author: sencia70@gmail.com

※ Received 8 February 2014; Revised 11 March 2014; Accepted 2 April 2014. 본 연구는 농림수산물부 수출전략기술개발사업(과제번호: IPET109061-3)에 의해 이루어진 것임.

© 2014 Korean Society for Horticultural Science

전반에 걸쳐 발생하며, 감염시 연한 갈색 병반이 생기고 심하면 전체가 갈변하여 죽는다(Hammer et al., 1990). 특히, 절화 장미의 꽃잎에 형성된 소형 병반은 수확 전 및 수확 후 선별 과정에서 쉽게 찾아내기 어렵기 때문에 발병된 꽃잎이 저장 중일 때 병징이 심해지고, 습식상자에 담겨 저온으로 수출되는 3-4일간의 유통과정에서 크게 발병하여 절화 장미 수출 시 클레임의 주요 원인이 되고 있다(Elad, 1988). 절화 장미에서 잣빛곰팡이병의 방제는 주로 수확 전 경엽 살포와 수확 후 살균제 처리에 의존하고 있는데, 이러한 약제 처리는 장미의 잎과 꽃잎에 약흔을 유발하며(Hammer et al., 1990), benzimidazole계와 dicarboximide계 살균제 등을 반복적으로 살포하였을 경우 약제 저항성 균의 발생 등과 같은 문제로 인해 친환경적인 종합적 방제 방법이 요구되고 있다(Choi et al., 2009).

화훼작물을 수출하고자 할 때에는 수입국에서 반입을 규제하는 질병이나 해충을 대상으로 식물검역을 받아야 하는데, 장미의 경우 점박이응애(*Tetranychus urticae*), 담배가루이(*Bemisia tabaci*), 꽃노랑총채벌레(*Frankliniella occidentalis*) 등의 해충이 문제가 되고 있다(Kang et al., 2007). 검역에 통과하지 못한 화훼는 훈증소독 후 유통 또는 폐기 등의 검역 조치를 받게 되는데, 2005년부터 2010년까지 일본의 식물검역 과정에서 소독 처리를 받은 우리나라 수출 장미의 비중은 9%에 달하며(PPS, 2010), 이때 수출농가는 훈증 처리에 따른 비용, 훈증처리 후 품질 하락에 따른 손실액 발생으로 인해 경제적으로 막대한 손실을 입게 된다. 검역 병해충이 발견된 화훼의 소독에 사용되는 메틸브로마이드(methyl bromide)는 무색, 투명한 휘발성 액체로서 가스 상태로 화물에 침투가 잘되고 화재에 안전하지만(Van Den Oever et al., 1982), 식물에 따라 탈색, 표피 함몰, 냄새 변화, 부패 및 스트레스에 대한 감수성 증가 등의 약해를 유발할 수 있고, 인체에 여러 독성을 일으킬 수 있다(Hatton and Cubbedge, 1979; Lee and Shin, 2008). 무엇보다 오존층 파괴 물질로서 몬트리올의정서(조약 제1273호)에 따라 선진국의 경우 2005년부터 사용이 전면 금지되었고, 개도국에서도 2015년부터 전폐될 예정이다(UNEP, 2012). 검역과 선적 전 처리 등의 필수 용도는 제외된다는 예외 단서가 있지만, FAO/IPPC 사무국이 2008년 4월 “식물검역용 메틸브로마이드의 대체 및 감축을 위한 권고문”을 채택하면서 선진국은 물론 개발도상국에 이르기까지 대체 소독기술 개발을 적극적으로 추진 중에 있다(IPPC, 2008).

최근 메틸브로마이드를 대체할 수 있는 물리적 소독방법

으로 방사선처리 등이 주목 받고 있는데(FAO, 2003), 이 중 전자빔을 통한 소독처리는 유해성분의 생성이나 잔류성분이 남지 않는 기술로 공정제어가 용이하고 처리시간은 수 초에 불과하며, 열 또는 압력을 받지 않아 제품의 변형이 적을 뿐 아니라 복잡하거나 보이지 않는 부분까지 효과적으로 처리할 수 있다. 또한, 별도의 후처리 과정이 필요 없이 판매용 포장상태로도 처리가 가능하며, 대규모 물량을 연속적으로 처리할 수 있을 뿐 아니라 처리공정에서 부산물이 전혀 발생하지 않는 것도 큰 특징이다(Gomes et al., 2008). 전자빔 조사는 담배가루이(*B. tabaci*), 복숭아혹진딧물(*Myzus persicae*), 아메리카잎굴파리(*Liriomyza trifolii*), 점박이응애(*T. urticae*) 등의 해충에서 발육단계에 따라 살충 또는 불임 효과를 나타내었으며(Koo et al., 2012; Moon et al., 2010), *Phytophthora cinnamomi*, *Phytophthora citricola*, *Pythium ultimum*, *Fusarium oxysporum* 등의 병원균 방제에도 효과적이었다(Gryczka et al., 2010; Migdal et al., 2012; Orlikowski et al., 2011). 전자빔 조사를 포함한 모든 검역처리기법은 반드시 농산물에 해를 가하지 않으면서 규제대상 병해충을 방제해야 하기 때문에(Follett, 2008), 절화와 같은 신선 농산물 검역에 전자빔을 이용하기 위해서는 조사선량별 절화의 품질 평가를 통한 감수성 파악이 무엇보다 중요하다.

이에 본 연구에서는 전자빔 조사에 따른 잣빛곰팡이병 방제효과 및 절화 장미의 수확 후 품질을 평가하였으며, 이를 통해 국제 무역규정에 맞는 비화학적 소독기술인 전자빔 검역 기술을 개발하고자 하였다.

재료 및 방법

전자빔 조사

전자빔 조사는 대전에 위치한 EB-Tech(주)의 high energy linear accelerator(UEL V10-10S, 10MeV, 1mA, 10Kw)를 사용하였다. 조사선량은 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 10, 20kGy였고, Radiochromic film dosimeter(GEXGAF3002DS, USA)(ISO/ASTM51275:2004(E))를 이용하여 측정하였다.

포자 발아에 미치는 전자빔 영향

전자빔 처리에 따른 잣빛곰팡이병 병원균의 감수성 평가를 위해 대상 병원균인 *B. cinerea* 전자빔 조사선량별 포자 발아율을 조사하였다. *B. cinerea* 균주는 한국화학연구원서 분양 받아 실험에 사용하였다. *B. cinerea* 포자현탁액(1 ×

$10^5 \text{ spores} \cdot \text{mL}^{-1}$)을 10MeV 전자가속기를 이용하여 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 10, 20kGy 선량으로 조사한 후, 멸균한 hole slide glass에 각각 80 μ L씩 분주하고 습도가 유지되는 상자에 넣어 20°C 배양기에서 암조건으로 12시간 배양하였다. 실험은 3반복으로 실시하였고, 포자 발아 조사는 광학현미경($\times 300$) 하에서 발아관의 길이가 포자의 폭보다 긴 것을 발아한 것으로 간주하였다. 전자빔 조사선량과 포자 발아 억제율과의 관계를 설명하기 위해 비선형 회귀분석(nonlinear regression method)를 실시하였고(SigmaPlot 10.0, Germany), Sigmoidal 함수 형태의 회귀 모형 $y = a/(1+e^{-(x-x_0)/b})$ (Sigmoidal, Sigmoid, 3 Parameter)를 이용하였다.

균사 생장에 미치는 전자빔 영향

전자빔 처리에 따른 잣빛곰팡이병균의 감수성 평가를 위해 *B. cinerea* 균사 생장을 조사하였다. 감자한천배지(PDA; Becton, Dickinson and Co.)에 *B. cinerea* 균사 절편(직경 8mm)을 치상한 후 10MeV 전자가속기를 이용하여 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 10, 20kGy 선량으로 조사하고, 20°C 배양기에서 암조건으로 4일간 배양한 후 균사 생장을 측정하였다. 실험은 5반복으로 실시하였고, 균사 생장 억제율은 다음과 같은 식에 따라 계산하였다.

$$\text{균사 생장 억제율(\%)} = (1 - \text{처리구의 균사 생장량/무처리구의 균사 생장량}) \times 100$$

전자빔 조사선량과 균사 생장 억제율과의 관계를 설명하기 위해 비선형 회귀분석(nonlinear regression method)를 실시하였고(SigmaPlot 10.0, Germany), 지수함수 형태의 회귀 모형 $y = a(1-e^{-bx})$ (Exponential Rise to Maximum, Single, 2 Parameter)를 이용하였다.

배양온도에 따른 전자빔 조사의 효과

온도에 따른 전자빔의 효과를 비교하기 위해 *B. cinerea* 균사 생장을 조사하였다. PDA 배지에 *B. cinerea* 균사 절편(직경 8mm)을 치상한 후, 10MeV 전자가속기를 이용하여 0.4kGy와 0.8kGy 선량으로 조사하고, 5, 10, 15, 20°C 배양기에서 암조건으로 6일간 배양하면서 매일 균사 생장을 측정하였다. 실험은 5반복으로 실시하였고, 각각의 배양온도에서 전자빔 조사에 의한 균사 생장 억제율은 다음과 같은 식에 따라 계산하였다.

$$\text{균사 생장 억제율(\%)} = (1 - \text{처리구의 균사 생장량/무처리구의 균사 생장량}) \times 100$$

전자빔 조사후 배양온도에 따른 균사 생장 억제율을 비교하기 위해 비선형 회귀분석(nonlinear regression method)를 실시하였고(SigmaPlot 10.0, Germany), Sigmoidal 함수 형태의 회귀 모형 $y = a/(1+e^{-(x-x_0)/b})$ (Sigmoidal, Sigmoid, 3 Parameter)를 이용하였다.

전자빔의 in Vivo 살균활성 검정

전자빔을 조사한 잣빛곰팡이병균을 토마토 유묘에 접종하여 전자빔의 in vivo 살균활성을 검정하였다. 실험에 사용한 토마토 유묘는 4.5cm 직경 플라스틱 포트에 파종하여 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 온실에서 3주동안 재배하였다. In vivo 검정은 $5 \times 10^5 \text{ spores} \cdot \text{mL}^{-1}$ 농도로 조정된 *B. cinerea* 포자현탁액을 10MeV 전자가속기를 이용하여 0.2, 0.4, 1, 2, 10kGy 선량으로 조사한 후, spray gun($1\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)을 이용하여 4엽기 토마토 유묘 전체에 분무 접종하여 실험하였다. 접종한 토마토 유묘는 20°C 습실상(상대습도 95% 이상)에 넣어 3일 동안 발병을 유도시킨 후 잎에 형성된 병반면적율(%)을 조사하였다. 실험은 5반복으로 실시하였고, 방제효과는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$\text{방제율(\%)} = (1 - \text{처리구의 병반면적율/무처리구의 병반면적율}) \times 100$$

전자빔에 대한 절화 장미의 감수성 평가

전자빔에 대한 절화 장미의 감수성 평가를 위해 ‘Decoration’, ‘Il se Bronze’, ‘Queen Bee’, ‘Revue’, ‘Vivian’ 5개 품종을 대상으로 실험하였다. 10MeV 전자가속기를 이용하여 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2kGy 선량으로 조사한 절화 장미의 수확 후 품질을 평가하였다. 전자빔을 조사한 절화 장미는 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $70 \pm 10\%$, 하루에 9시간 광조건이 유지되는 실험실로 옮긴 후, 길이 30cm로 재절단하여 증류수에 꽂았다. 이후 절화수명, 개화단계, 그리고 생체중을 측정하였다. 실험은 5반복으로 실시하였다.

자료의 분석

유의성 분석은 SAS ver. 9.2(SAS Institute, Cary, NC, USA)를 이용하여 Duncan의 다중검정법으로 통계처리 하였으며 유의수준은 5%로 하였다.

결과 및 고찰

포자 발아에 미치는 전자빔 영향

젓빛곰팡이병의 비화학적, 물리적 소독기술 개발을 위해 전자빔 조사선량에 따른 *B. cinerea*의 감수성을 포자 발아 억제율을 통해 비교하였다. 전자빔 조사선량이 높아짐에 따라 포자 발아가 억제되었고, 포자 발아는 1kGy와 2kGy 선량에서 각각 18.4%와 47.9% 억제되었다(Fig. 1). 회귀분석 결과 *B. cinerea* 포자 발아를 50% 억제하는 선량(ED₅₀)은 2.02kGy로 나타났으며, 10kGy 이상에서 포자 발아가 완전히 억제되었다. Chang et al.(1997) 역시 10MeV 전자가속기로 *B. cinerea* 포자현탁액을 조사하고 발아 억제율을 측정했을 때, 1kGy 이하의 전자빔 선량에서는 포자 발아 억제율이 12%로 낮았던 반면, 2kGy에서 69%, 4kGy에서 98%로 전자빔 조사선량이 증가할수록 효과적으로 억제되었으며, 분생 포자의 경우 1-2kGy 선량에서 전자빔에 대해 감수성을 가진다고 보고하였다. Gryczka et al.(2010)의 연구에 따르면 9MeV 전자빔 조사에 의해 *F. oxysporum* f. sp. *dianthi*은 1.5kGy에서 포자 발아가 40% 억제되었고, 3kGy 이상에서는 100% 억제되었다고 하여 미생물 종류에 따라 전자빔에 대한 감수성에 차이가 있음을 알 수 있다. 전자빔 처리는 DNA를 포함한 몇몇 분자의 화학적 결합을 깨며, 그로 인하여 미생물의 증식을 억제하는 효과가 있는데(Fiester et al., 2012), 전자빔에 대한 감수성은 미생물 분류군에 따라 또는 같은 종일 경우라도 미생물의 성장상태에 따라 다르게 나타

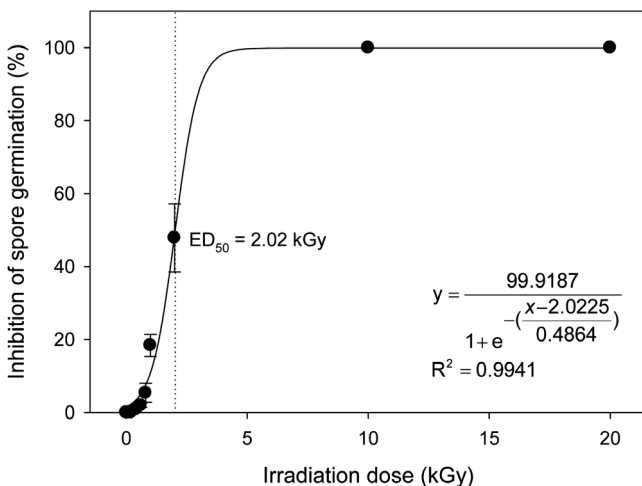


Fig. 1. Effect of electron beam irradiation on spore germination of *Botrytis cinerea*. Data are the means of three replications \pm SD.

나며, 일반적으로 포자가 영양세포(균사)에 비해 저항성이 크다고 알려져 있다(Kim, 2006).

균사 생장에 미치는 전자빔 영향

*B. cinerea*의 균사 생장에 전자빔 조사가 미치는 영향은 Fig. 2와 같다. 전자빔 조사 4일 후에 균사 생장을 조사한 결과, 전자빔 조사선량이 높아질수록 균사 생장이 효과적으로 억제되었고, 특히 2kGy 선량에서 균사 생장이 70.1% 억제되었다. 회귀분석 결과, *B. cinerea* 균사 생장을 50% 억제하는 선량(ED₅₀)은 0.89kGy로 나타났으며, 10kGy 이상에서는 균사 생장이 100% 억제되었다. 이러한 결과는 Orilikowski et al.(2011)이 9MeV 전자가속기를 이용하여 *B. cinerea* 균사절편체를 조사한 뒤 4일 동안 배양했을 때 균사 생장이 3kGy에서 62.8%, 6kGy에서는 93.1% 억제되었다는 보고와 일치한다. Migdal et al.(2012)의 연구결과에 의하면 *P. cinnamomi* 균사 생장은 1.5kGy에서 50%, 3kGy 이상에서 100% 억제되었는데, 특히 3kGy 전자빔 조사선량에서 균사 붕괴와 후막포자 생성이 저해되었으며, *Phytophthora* 종들에 비해 *B. cinerea* 전자빔 저항성이 높다고 보고하였다.

균사 생장 실험 결과 포자 발아에 영향을 주는 선량보다 낮은 선량에서 균사의 생장이 억제되었으므로, *B. cinerea*의 전자빔 저항성은 포자가 균사에 비해 높다고 판단하였다. 감마선을 이용한 연구결과와 비교해보면, Sommer et al.(1972)

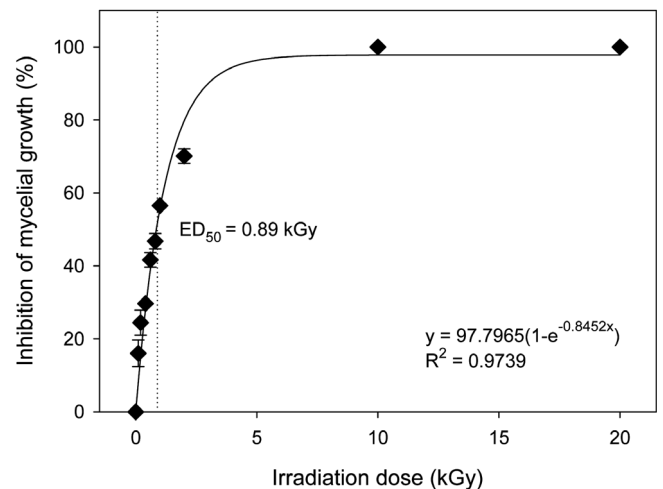


Fig. 2. Effect of electron beam irradiation on mycelial growth of *Botrytis cinerea*. Inhibition of mycelial growth (%) was determined using the following equation: Inhibition of mycelial growth (%) = (1 - mycelial diameter of treatment/mycelial diameter of control) \times 100. Data are the means of five replications \pm SD.

은 감마선에 대한 *B. cinerea* 성장단계별 반응은 어린 균사와 균핵의 저항성이 강하고, 분생포자에 비해 성숙 균사의 감수성이 높다고 하였다.

배양온도에 따른 전자빔의 잿빛곰팡이병원균 억제효과

온도에 따른 *B. cinerea* 균사 성장을 비교하였다. 5°C 배양온도에서는 모든 처리구에서 6일째까지 균사 생장이 일어나지 않았다(Fig. 3). 10, 15, 20°C 배양온도에서 전자빔 무처리구의 균사 생장이 50% 될 때까지 걸린 시간은 각각 4.1일, 2.9일, 2.0일로 20°C에서 균사 생장이 빠르게 증가하였다. 잿빛곰팡이병원균의 최적 균사 성장, 포자 형성, 포자 발아 및 발병 온도는 18-23°C라고 알려져 있다(Bulger et al., 1987; Lahlali et al., 2007).

전자빔 조사 후 배양온도에 따른 *B. cinerea* 균사 성장을 비교하였다(Fig. 4). 잿빛곰팡이병원균의 균사 성장에 대한 전자빔 효과는 배양온도가 낮아짐에 따라 증가하였으며, 특히 10°C에서 가장 명확한 균사 성장 억제효과를 나타내었다. 10°C 배양온도에서 전자빔 선량이 0.4kGy에서 0.8kGy로 증가함에 따라 균사 성장 억제율은 증가하였으며, 특히 0.8kGy 전자빔 조사후 2일까지 균사 생장이 100% 억제되었다. 회귀 분석 결과, 50% 균사 성장 억제율을 보이는 시간은 0.4kGy와 0.8kGy에서 각각 4.6일, 6.2일이었다(Fig. 4A). 배양온도가 10°C에서 15°C로 높아짐에 따라 전자빔의 균사 성장 억제 효과는 초기엔 높게 유지되다가 시간이 지남에 따라 급격하게 감소하였다. 10°C 배양온도에서와 마찬가지로 전자

빔 선량이 0.4kGy에서 0.8kGy로 증가함에 따라 균사 성장 억제율도 증가하였으나, 5일 이후부터는 무처리구와 차이가 없었다. 회귀분석 결과, 15°C에서 50% 균사 성장 억제율을

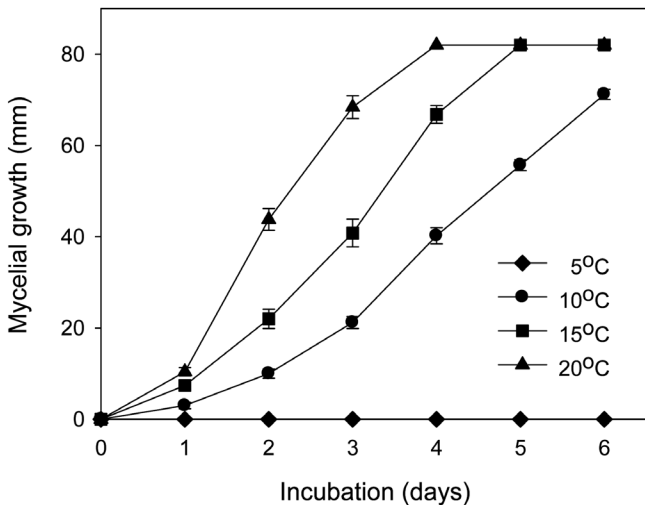


Fig. 3. Effect of incubation temperature on mycelial growth of *Botrytis cinerea*. Data are the means of five replications ± SD.

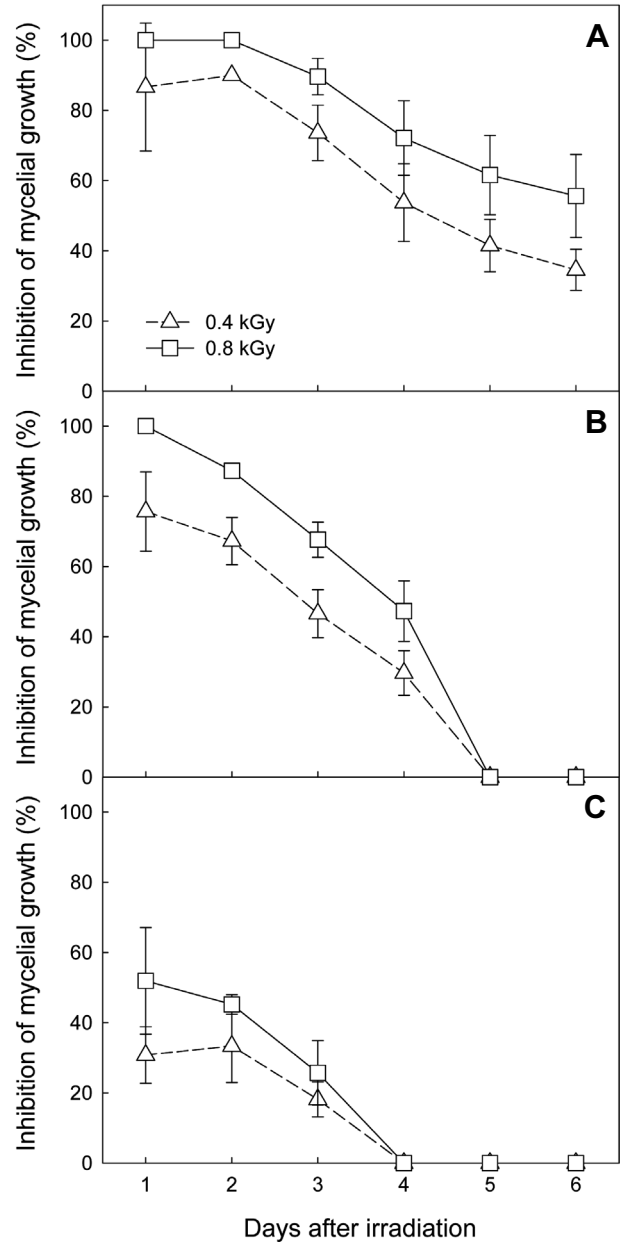


Fig. 4. Effect of electron beam irradiation on mycelial growth of *Botrytis cinerea* at different incubation temperature. Mycelial growth of *B. cinerea* was observed at 10°C (A), 15°C (B), and 20°C (C). Electron beam was irradiated at dose of 0.4 kGy (△) and 0.8 kGy (□). Inhibition of mycelial growth (%) was determined using the following equation: Inhibition of mycelial growth (%) = (1 - mycelial diameter of treatment / mycelial diameter of control) × 100. Data are the means of five replications ± SD.

보이는 시간은 0.4kGy와 0.8kGy에서 각각 3.0일, 3.7일이었 다(Fig. 4B). 20°C 배양온도에서 전자빔의 균사 생장 억제 효과는 시간이 지남에 따라 크게 감소하였으며, 전자빔 조사 후 4일부터는 잿빛곰팡이병에 대한 균사 생장 억제 효과를 볼 수 없었다. 회귀분석 결과, 50% 균사 생장억제율을 보이는 시간은 0.8kGy에서 1.2일이었으며, 0.4kGy에서는 전자빔 조사 후 1일부터 30.77%의 낮은 균사 생장 억제율을 보였다(Fig. 4C).

*B. cinerea*와 같이 저장 중에 주로 발생하는 병원균에 대한 수확 후 관리기술로서 이온화 방사선과 열, MAP(modified atmosphere packaging), 저온 등의 병용처리에 대한 연구가 많이 시도되어 왔다(Barkai-Golan et al., 1993; Fan and Sokorai, 2011; Wani et al., 2008). 미생물의 방사선 감수성은 온도, 기체환경, 수분활성도 등과 같은 외부환경에 의해서 크게 좌우되기 때문에 이를 방사선 조사와 병용하면 보다 저선량의 방사선 조사로 유효한 결과를 기대할 수 있다(Kim, 2006). Tiryaki(1990)는 *B. cinerea*에 감마선을 조사한 뒤 3-4°C 저온에서 배양했을 때 1, 2, 3kGy 감마선 처리구의 균사 생장이 7일 후에 각각 94.6%, 95.9%, 100% 억제되었고, 17일 후에도 3.0%, 40.2%, 99.1% 억제되어 감마선과 저온 병용 처리를 통해 병원균의 생장을 효과적으로 지연시킬 수 있다고 보고한 바 있으며, 본 연구에서도 전자빔 조사 후 저온을 처리할 경우 *B. cinerea* 균사 생장이 지연되어 전자빔을 통

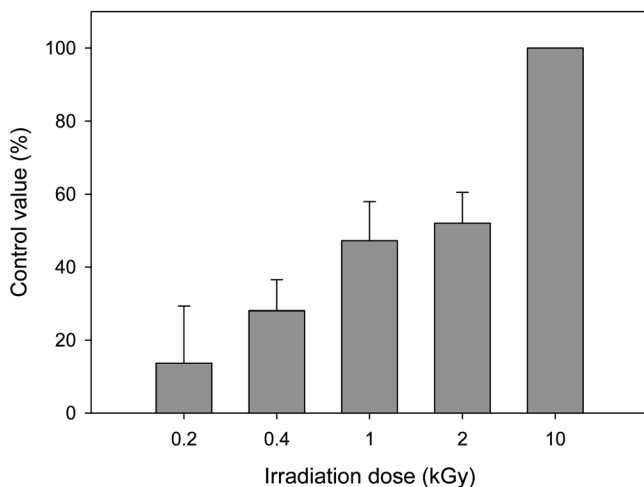


Fig. 5. Control efficacy of electron beam irradiation on tomato gray mold. The percentage of disease control was determined using the following equation: Control value (%) = $100(1 - B/A)$, where A = the area of infection (%) on untreated leaves and B = the area of infection (%) on treated leaves. Data are the means of five replications \pm SD.

한 잿빛곰팡이병 억제에 매우 효과적인 것으로 나타났다.

전자빔의 in Vivo 살균활성 검증

토마토 유묘를 이용하여 전자빔의 in vivo 살균활성을 검증한 결과는 Fig. 5와 같다. 전자빔 선량이 증가함에 따라 토마토 유묘의 병반면적율(%)은 감소하였으며, 전자빔 선량이 0.2, 0.4, 1, 2kGy로 증가함에 따라 방제효과도 14%, 28%, 47%, 52%로 증가하였다. 특히, 10kGy 선량의 전자빔 조사시에는 잿빛곰팡이병에 대하여 100% 방제 효과를 보였다. 이러한 결과는 1.5, 3, 4.5, 6kGy 전자빔 조사한 *B. cinerea* 병원균을 국화 엽병에 접종하고 5일 후 병반을 비교했을 때, 각각 32%, 41%, 68%, 100% 방제효과를 보였다는 Orlikowski et al.(2011)의 보고와 비슷하였다.

전자빔에 대한 절화 장미의 감수성 평가

전자빔 조사선량에 따른 장미의 품질을 평가하기 위해 절화수명과 개화단계를 조사하였다(Table 1 and Fig. 6). ‘Decoration’의 절화수명은 0.6kGy 이하에서 전자빔 무처리구와 비슷하였고, 0.8kGy 이상에서는 화색 변화, 화기 위조, 꽃목굽음 등의 노화 현상이 급격하게 진행되어 감소하였으나, 0.1kGy 전자빔 선량에서는 약간 연장되는 효과를 보였다. ‘Il se Bronze’는 0.8kGy, ‘Queen Bee’와 ‘Revue’는 0.6kGy, ‘Vivian’은 0.2kGy 이하에서 무처리구와 비슷한 절화수명을 보였으며, 0.1-0.2kGy에서 절화수명이 약간 연장되는 효과를 보였다. 화훼류는 식물 종에 따라, 또는 품종에 따라 전자빔에 대한 감수성이 다르게 나타나는데(Sangwanankul et al., 2008), Chang et al.(1997)은 10MeV 전자빔 조사 시 ‘Royalty’ 장미의 절화수명이 0.5kGy까지 무처리구와 비슷했으나 0.75kGy 이상에서는 화기 위조나 꽃목굽음 등이 증가하였고, Hayashi et al.(1998) 역시 5MeV 0.4kGy 전자빔 조사에 의해 절화 품질이 감소하였으므로 장미의 전자빔 감수성이 높다고 보고하였다.

전자빔 조사 후 장미의 개화단계를 조사한 결과, 무처리구가 가장 높은 점수를 보여 봉오리가 정상적으로 개화했음을 알 수 있었고, 조사선량이 높아질수록 개화가 지연되면서 화경 감소를 보이긴 했으나, 5개 품종 모두 0.4kGy 이하에서 무처리구와 비슷하였고, 1kGy 이상에서는 개화가 지속되지 못하고 봉오리 상태로 시드는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 전자빔 감수성을 평가하는 지표로 사용할 수 있으며, Chang et al.(1997)이 ‘Royalty’ 장미를 대상으로 한 연구 및 Kikuchi(2003)의 *Lilium speciosum*을 대상으로 한

Table 1. Effect of electron beam irradiation on flower longevity and flower bud opening in five rose cultivars.

Dose (kGy)	Cultivar				
	Decoration	Il se Bronze	Queen Bee	Revue	Vivian
Flower longevity (day)					
0	7.40 ab ^z	7.25 a	6.50 ab	9.8 a	8.0 a
0.1	7.60 a	7.33 a	6.50 ab	9.3 ab	8.3 a
0.2	7.20 abc	7.50 a	7.00 a	10.0 a	8.2 a
0.4	6.60 bcd	7.00 a	5.75 bc	9.8 a	6.8 b
0.6	6.60 bcd	6.67 ab	5.75 bc	9.2 ab	6.4 bc
0.8	6.40 cd	6.50 ab	5.00 c	6.8 b	5.5 cd
1.0	6.40 cd	5.33 b	5.00 c	6.8 b	5.5 cd
2.0	6.00 d	5.25 b	5.00 c	6.8 b	4.5 d
F-test	***	*	**	*	****
Flower bud opening ^y					
0	4.20 a	4.20 a	4.40 a	4.20 a	4.40 a
0.1	4.00 a	4.40 a	4.20 ab	4.00 ab	4.20 a
0.2	3.80 ab	4.40 a	4.20 ab	4.20 a	4.00 a
0.4	3.60 abc	3.80 ab	4.00 ab	3.60 abc	3.80 ab
0.6	3.20 bcd	3.40 bc	3.60 bc	3.20 bcd	3.20 bc
0.8	3.00 cd	2.80 cd	3.20 cd	2.80 cd	2.60 cd
1.0	2.60 d	2.80 cd	2.80 d	2.60 d	2.40 d
2.0	2.60 d	2.60 d	2.60 d	2.60 d	2.40 d
F-test	**	****	****	**	****

^zDuncan's multiple range test within columns for each experiment, $p = 0.05$.

^yBased on a scale of 1 to 5. 1 = very tight bud, only the outer petals are clearly visible; 2 = bud starts to open, the tips of most inner petals are visible; 3 = bud is open, the outer petals are starting to stand out; 4 = bud is open, the outer petals are fully expanded, the flower has not yet reached its maximum size; 5 = bud is fully open, all petals are fully expanded, the flower has reached its maximum size.

****,***,**, Significant at $p = 0.05, 0.01, 0.001$ or 0.0001 level, respectively.

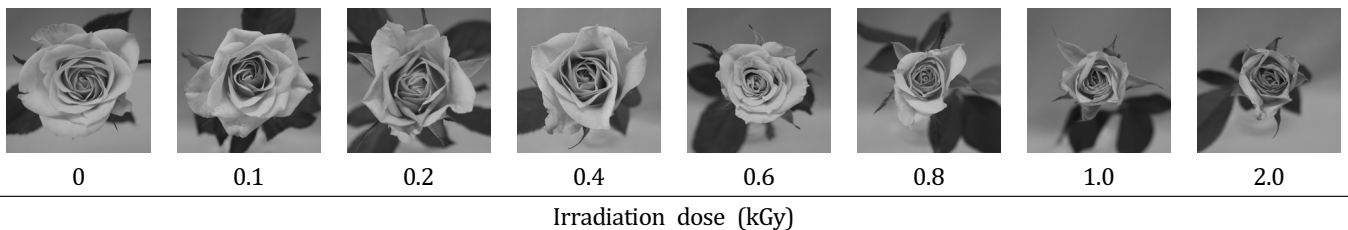


Fig. 6. Visual appearance of 'Decoration' rose flowers at 6 days after electron beam irradiation.

연구에서도 이와 유사한 결과를 보고한 바 있다. Yang et al.(2002)은 1kGy 이상의 감마선 조사에 의해 *Hemerocallis fulva* 개화가 억제되었으며, 주사전자현미경 관찰 결과 꽃잎 및 꽃받침 표피세포의 피해 때문이라고 보고하였다.

절화 장미에 전자빔을 조사했을 때 생체중은 0.2kGy까지

무처리구와 비슷한 양상을 보였으며, 조사선량이 증가할수록 급격하게 감소하였다(Fig. 7). Chang et al.(1997) 역시 0.25kGy 전자빔 처리구와 무처리구의 생체중을 비교했을 때 차이가 없었으며, 0.5kGy 이상에서 급격한 감소를 보였다고 보고하였다. Hasbullah et al.(2012)은 감마선 조사에 의

해 거베라 캘러스의 생체중 역시 감소하였는데, 이는 캘러스 세포로의 수분 유입이 저해된 것으로 보인다 하하였다.

이상의 결과로부터 장미는 0.4kGy를 기준으로 전자빔에 대한 감수성을 구분할 수 있었는데, 'Decoration', 'Il se Bronze', 'Queen Bee', 'Revue'는 0.4kGy 이하에서 전반적인 절화품질이 유지되었으나, 'Vivian'은 0.2kGy 이하에서만 절화품질이 유지되었기 때문에 전자빔에 대한 감수성이 높다고 판

단된다. 방사선을 이용하여 해충을 방제할 때 알의 부화 억제 및 성충의 불임 유발 등과 같은 해충 검역에 요구되는 선량이 0.4kGy 이상인 점을 감안하면(APHIS, 2002, 2006), 장미 품종에 따른 차이는 있지만 절화품질의 손상 없이 검역에 사용 가능할 것으로 기대된다. 잣빛곰팡이병을 방제하는 선량으로 전자빔을 조사할 경우 절화 장미의 품질이 급격하게 저하될 수 있으나, 절화 장미에 0.4kGy 전자빔을 조

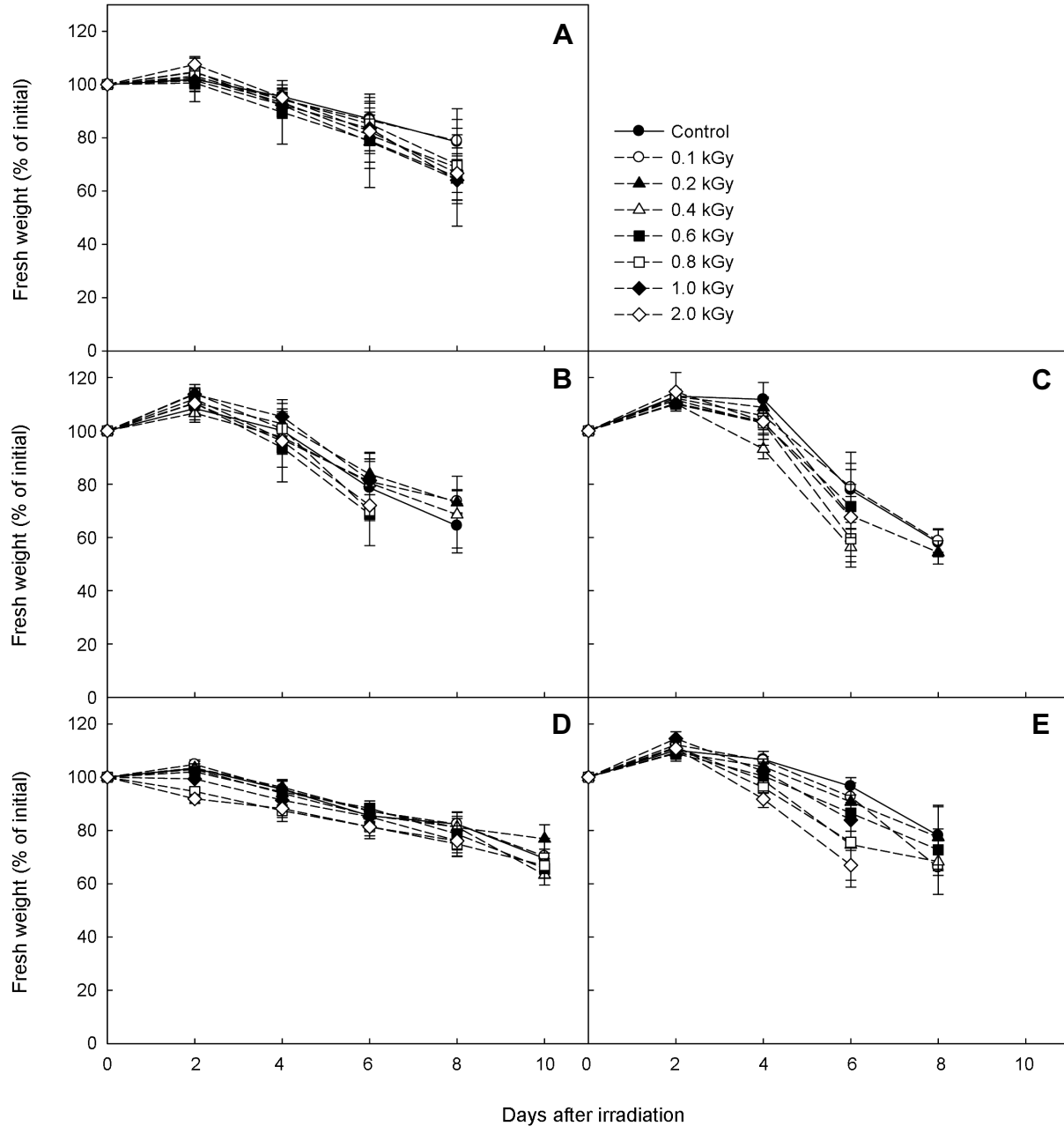


Fig. 7. Effect of electron beam irradiation on fresh weight of 'Decoration' (A), 'Il se Bronze' (B), 'Queen Bee' (C), 'Revue' (D), and 'Vivian' (E) roses. Data are the means of five replications \pm SD.

사한 후 저온으로 유통하여 *B. cinerea* 생장을 지연시킨다면 수출과정중 잿빛곰팡이병의 효과적인 제어가 가능하리라 생각한다. 추후 전자빔에 대한 감수성이 높은 품종에 대해 피해를 경감시킬 수 있는 수확 후 처리법에 대한 연구가 필요하다.

초 록

본 연구는 전자빔 조사에 따른 잿빛곰팡이병 방제효과와 절화 장미의 수확 후 품질을 알아보고자 수행하였다. 10MeV 전자가속기를 이용하여 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 10, 20kGy로 조사했을 때 전자빔 선량이 높아짐에 따라 *Botrytis cinerea* 포자 발아와 균사 생장은 억제되었다. 전자빔 조사가 *B. cinerea* 포자 발아와 균사 생장에 미치는 영향을 비교했을 때, 포자 발아를 50% 억제하는 선량은 2.02kGy, 균사 생장을 50% 억제하는 선량은 0.89kGy였으므로 포자가 균사에 비해 전자빔에 대한 저항성이 더 높았다. 전자빔 조사 후 배양온도에 따른 *B. cinerea* 균사 생장을 비교한 결과 잿빛곰팡이병균에 대한 전자빔 효과는 배양온도가 낮아질수록 증가하였으며, 특히 10°C에서 가장 높은 균사 생장 억제 효과를 보였다. 토마토 유묘를 이용하여 전자빔의 in vivo 살균활성을 검정한 결과 전자빔 선량이 높아짐에 따라 방제 효과도 증가하였다. 절화 장미는 전자빔 선량이 높아짐에 따라 절화수명 및 생체중의 감소, 개화 지연 등을 보였으며, ‘Decoration’, ‘Il se Bronze’, ‘Queen Bee’, ‘Revue’는 0.4kGy 이하에서 전반적인 절화품질이 유지되었지만 ‘Vivian’은 0.2kGy 이하에서만 절화품질이 유지되어 장미 품종에 따라 전자빔에 대한 감수성이 다르게 나타났다.

추가 주요어 : 화훼수출, 이온화 방사선, 식물위생, 검역, 온도

인용문헌

- Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS). 2002. Irradiation phytosanitary treatment of imported fruit and vegetables. Federal Register 67:65016-65029.
- Animal and Plant Health Inspection Service (APHIS). 2006. Treatments for fruits and vegetables. Federal Register 71: 4451-4464.
- Barkai-Golan, R., R. Padova, I. Ross, M. Lapidot, H. Davidson, and A. Copel. 1993. Combined hot water and radiation treatments to control decay of tomato fruits. *Sci. Hortic.* 56:101-105.
- Bulger, M.A., M.A. Ellis, and L.V. Madden. 1987. Influence of temperature and wetness duration on infection of strawberry flowers by *Botrytis cinerea* and disease incidence of fruit originating from infected flowers. *Phytopathology* 77:1225-1230.
- Chang, A.Y., R.J. Gladon, M.L. Gleason, S.K. Parker, N.H. Agnew, and D.G. Olson. 1997. Postharvest quality of cut roses following electron-beam irradiation. *HortScience* 32:698-701.
- Choi, G.J., K.S. Jang, Y.H. Choi, and J.C. Kim. 2009. Control efficacy of a new fungicide fludioxonil on lettuce gray mold according to several conditions. *Res. Plant Dis.* 15:217-221.
- Elad, Y. 1988. Latent infection of *Botrytis cinerea* in rose flowers and combined chemical and physiological control of the disease. *Crop Protec.* 7:361-366.
- Fan, X. and K.J.B. Sokorai. 2011. Effects of gamma irradiation, modified atmosphere packaging, and delay of irradiation on quality of fresh-cut iceberg lettuce. *HortScience* 46:273-277.
- Fiester, S.E., S.L. Helfinstine, J.C. Redfearn, R.M. Uribe, and C.J. Woolverton. 2012. Electron beam irradiation dose dependently damages the *Bacillus* spore coat and spore membrane. *Int. J. Microbiol.* 2012:1-9.
- Follett, P.A. 2008. Effect of irradiation on Mexican leafroller (Lepidoptera: Tortricidae) development and reproduction. *J. Econ. Entomol.* 101:710-715.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2003. Guidelines for the use of irradiation as a phytosanitary measure. International plant protection convention, international standards for phytosanitary measures (ISPM) No. 18. FAO, Rome.
- Gomes, C., P. Da Silva, E. Chimbombi, J. Kim, E. Castell-Perez, and R.G. Moreira. 2008. Electron-beam irradiation of fresh broccoli heads (*Brassica oleracea* L. *italica*). *LWT-Food Sci. Technol.* 41:1828-1833.
- Gryczka, U., M. Ptaszek, W. Migdal, and L.B. Orlikowski. 2010. Application of electron beam irradiation for inhibition of *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* activity. *Nukleonika* 55:359-362.
- Hammer, P.E. 1988. Postharvest control of *Botrytis cinerea* on cut roses with micro-cupric-ammonium formate. *Plant Dis.* 72: 347-350.
- Hammer, P.E., S.F. Yang, M.S. Reid, and J.J. Marois. 1990. Postharvest control of *Botrytis cinerea* infections on cut roses using fungistatic storage atmospheres. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 115:102-107.
- Hasbullah, N.A., R.M. Taha, A. Saleh, and N. Mahmud. 2012. Irradiation effect on in vitro organogenesis, callus growth and

- plantlet development of *Gerbera jamesonii*. Hort. Bras. 30:252-257.
- Hatton, T.T. and R.H. Cubbedge. 1979. Phytotoxicity of methyl bromide as a fumigant for Florida citrus fruit. Proc. Fla. State Hort. Soc. 92:167-169.
- Hayashi, T., O.K. Kikuchi, and T. Dohino. 1998. Electron beam disinfection of cut flowers and their radiation tolerance. Radiat. Phys. Chem. 51:175-179.
- International Plant Protection Convention (IPPC). 2008. Replacement or reduction of the use of methyl bromide as a phytosanitary measure. IPPC Recommendation, CPM-3. Rome.
- Kang, T.J., H.Y. Jeon, C.Y. Yang, H.H. Kim, and M.R. Cho. 2007. Development of labor-saving pest management system for cut flower rose cultivation. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 25:418-424.
- Korea Agricultural Trade Information, Korea Agro-Fisheries and Food Trade Corporation (KATI). 2010. Korea agricultural trade information. <http://kati.net/kati.do>
- Kikuchi, O.K. 2003. Gamma and electron-beam irradiation of cut flowers. Radiat. Phys. Chem. 66:77-79.
- Kim, D.H. 2006. Principles of radiation sterilization of food materials. Food Ind. Nutr. 11:21-29.
- Koo, H.N., S.H. Yun, C. Yoon, and G.H. Kim. 2012. Electron beam irradiation induces abnormal development and the stabilization of p53 protein of American serpentine leafminer, *Liriomyza trifolii* (Burgess). Radiat. Phys. Chem. 81:86-92.
- Lahlali, R., M.N. Serrhini, D. Friel, M.H. Jijakli. 2007. Predictive modelling of temperature and water activity (solutes) on the in vitro radial growth of *Botrytis cinerea* Pers. Intl. J. Food Microbiol. 114:1-9.
- Lee, H.S. and Y.C. Shin. 2008. Workers' exposure to airborne methyl bromide in the exporting/importing plants and products quarantine company. J. Kor. Soc. Occup. Environ. Hyg. 18:32-40.
- Migdal, W., L.B. Orlikowski, M. Ptaszek, and U. Gryczka. 2012. Influence of electron beam irradiation on growth of *Phytophthora cinnamomi* and its control in substrates. Radiat. Phys. Chem. 81:1012-1016.
- Moon, S.R., B.K. Son, J.O. Yang, J.S. Woo, C. Yoon, and G.H. Kim. 2010. Effect of electron-beam irradiation on development and reproduction of *Bemisia tabaci*, *Myzus persicae*, *Plutella xylostella* and *Tetranychus urticae*. Kor. J. Appl. Entomol. 49:129-137.
- Orlikowski, L.B., W. Migdal, M. Ptaszek, and U. Gryczka. 2011. Effectiveness of electron beam irradiation in the control of some soilborne pathogens. Nukleonika 56:357-362.
- Pasini, C., F. D'Aquila, P. Curir, and M.L. Gullino. 1997. Effectiveness of antifungal compounds against rose powdery mildew (*Sphaerotheca pannosa* var. *rosae*) in glasshouses. Crop Protec. 16:251-256.
- Plant Protection Station, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (PPS). 2010. Plant quarantine statistics. <http://www.maff.go.jp/pps/>
- Reddy, S., J.A. Spencer, and S.E. Newman. 1992. Leaflet surfaces of blackspot-resistant and susceptible roses and their reactions to fungal invasion. HortScience 27:133-135.
- Sangwanankul, P., P. Saradhulhat, and R.E. Paull. 2008. Survey of tropical cut flower and foliage responses to irradiation. Postharvest Biol. Technol. 48:264-271.
- Sommer, N.F., R.J. Fortlage, P. M. Buckley, and E.C. Maxie. 1972. Comparative sensitivity to gamma radiation of conidia, mycelia, and sclerotia of *Botrytis cinerea*. Radiat. Bot. 12:99-103.
- Tiryaki, O. 1990. Inhibition of *Penicillium expansum*, *Botrytis cinerea*, *Rhizopus stolonifer*, and *Alternaria tenuissima*, which were isolated from Ankara pears by gamma irradiation. J. Turkish Phytopathol. 19:133-140.
- United National Environment Programme (UNEP). 2012. Handbook for the Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. 9th ed. UNEP, Nairobi. p. 40.
- Van Den Oever, R., D. Roosels, and D. Lahaye. 1982. Actual hazard of methyl bromide fumigation in soil disinfection. Brit. J. Ind. Med. 39:140-144.
- Wani, A.M., P.R. Hussain, R.S. Meena, and M.A. Dar. 2008. Effect of gamma-irradiation and refrigerated storage on the improvement of quality and shelf life of pear (*Pyrus communis* L., Cv. Bartlett/William). Radiat. Phys. Chem. 77:983-989.
- Yang, M.S., C.C. Chyau, D.T. Horng, and J.S. Yang. 2002. Effects of irradiation on epidermis ultrastructure of fresh day-lily flowers. Radiat. Phys. Chem. 63:249-251.