JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical article

17(2) : 199-207 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.2.199

발아증진 및 소독을 위한 물리적 방법을 이용한 종자처리 기술

강시용[1,2,*]

[1]공주대학교 산업과학대학 원예학과, [2]공주대학교 작물오믹스지능육종연구센터

Physical Seed Treatment Techniques for Germination Enrichment and Seed Sterilization

Si-Yong Kang[1,2,*]

[1]Department of Horticulture, College of Industrial Science, Kongju National University, 54 Daehak-ro, Yesan-eup, Yesan-gun, Chungnam 32439, Republic of Korea
[2]Research Center of Crop Breeding for Omics and Artificial Intelligence, Kongju National University, 54 Daehak-ro, Yesan-eup, Yesan-gun, Chungnam 32439, Republic of Korea

Abstract Since seeds can be directly used as food resources as well as for crop cultivation or preservation of genetic resources, it is essential to develop high-quality seed processing technology to increase agricultural productivity. Seed treatment means processing technologies of seeds through physical or chemical treatment processes from after harvesting seeds to before sowing of seeds to improve germination and growth rate, durability, and immunity, etc. Since chemical seed treatment technology using pesticides or plant growth regulators has problems of environmental pollution and human toxicity, it is desired to develop an alternative technology. As a physical seed treatment method, various technologies such as ionizing radiation, plasma, microwave, and magnetic field are being developed, and some of them are being used practically. In this paper, I will summarize the mechanism of seed priming and disinfection, and the advantages and disadvantages of application, focusing on these physical seed treatment methods. Low dose or moderate intensity ionizing radiation, microwave, low-temperature plasma, and magnetic field treatments often promoted seed germination and seedling growth. However, effective removal of direct seed pathogens at these treatment intensities appears to be difficult. And it has been shown that relatively high-dose electron beam treatment using low-energy electron beams kills microorganisms on the seed surface and hull layer while not damaging the inner tissue of the seed, and is also effectively used for seed treatment on a commercial scale. In order to put the physical seed treatment technology to practical use in Korea, it is necessary to develop an economical scale treatment device along with the development of individual treatment technology to each crop.

Key words: Seed treatment, Priming, Sterilization, Low-energy electron beam, Microwave, Plasma, Magnetic field

1. 서 론

종자는 농업의 반도체라고 할 정도로 농업에서 중요한 구성 요소이다. 종자는 그 자체가 식량자원으로 활용될 수도 있고, 재배를 위한 종묘나 번식체로서 뿐만 아니라 육종 소재나 유전자원의 보존체로서도 중요하다. 그러기 때문

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author.** Si-Yong Kang
Tel. +82-41-330-1226 E-mail. sykang@kongju.ac.kr
Received 17 May 2023 **Revised** 1 June 2023 **Accepted** 15 June 2023

에 농업의 생산성 증대를 위해서는 새로운 품종개발과 함께 고품질의 종자 생산 및 보존 기술개발은 필수적이다[1]. 종자처리는 종자의 생산성, 발아율, 내구성, 면역성 등을 향상시키기 위해 종자 수확 후부터 파종 전까지 종자에 물리적, 화학적 또는 기계적 처리 과정을 거쳐 가공하는 기술을 말한다[1,2]. 종자처리 기술의 목적은 주로 종자전염 병해충의 방제와 종자의 발아 및 유묘 생장을 촉진하는 데에 있으며, 최근에는 종자를 코팅이나 펠레팅(pelleting) 처리하여 파종작업을 용이하게 하거나 식물생장에 유익한 물질을 부가하는 경우도 있다[1-3].

오래전부터 대부분의 작물 종자의 경우 전염병을 방제하기 위해 물리적 처리 또는 화학 약제를 이용한 종자소독이 이루어지고 있으며, 협의의 종자처리는 이것을 지칭한다. 종자 프라이밍(priming)은 작물의 발아력, 생장속도, 내성 및 생존력 등을 향상시키는 위해서 실시하는 종자처리 기술의 하나이다[1,4]. 프라이밍 처리 방법에는 종자에 물, 염수 또는 화학물질을 단독 또는 복합 처리하여 종자가 발아하기에는 부족하나 생리적으로는 발아 상태가 되도록 생리적인 단계를 진전시켰다가 다시 건조하여 파종하면 발아 속도를 빠르고 균일하게 하는 기술이다. 또한, 휴면이 깊은 식물의 종자의 경우, 다양한 휴면타파법을 파종 전에 적용해오고 있다[1-4].

화학적 종자처리에는 병해충 방제와 유묘 생장 촉진을 위해 유독성 농약이나 식물생장조절물질을 이용하는 경우가 많다. 이러한 화학물질 사용은 환경오염이나 인축에 해를 끼칠 우려가 있고, 같은 계열의 화학물질을 연속적으로 사용하는 경우 내성 병해충의 출현을 조장할 수 있다. 따라서, 유해한 화학적 종자처리 기술을 대체할 물리적 방법의 개발과 활용이 필요하며, 저탄소 농업기술의 활용 차원에서도 중요하다. 특히, 화학 비료 및 농약을 사용하지 않는 유기농업 및 친환경 재배 시에는 사용하는 종자 및 종묘에도 농약 등 화학물질을 사용하지 않고 생산하는 것이 권고되고 있다[5]. 물리적 종자처리 방법에는 전통적으로 이용되고 있는 고온의 증기 및 물 처리 방법 이외에도 방사선, 플라즈마, 마이크로파, 자기장 등 다양한 기술이 검토되고 있고, 일부는 실용적으로 이용되고 있다[5,6].

본고에서는 물리적 종자처리 방법 중에서 이온화 방사선을 이용한 종자처리 기술을 중심으로 살펴보고, 플라즈마, 마이크로파, 자기장에 의한 종자처리 관련 최근의 연구동향에 대해서 간단히 정리하고, 국내에서의 적용 가능성에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 방사선에 의한 종자처리 기술

이온화 방사선의 종자에 대한 조사는 농작물 생산물의 저장성 증진, 유통과 수출입 검역 시에 문제가 되는 병해충 방제와 작물 육종을 위한 돌연변이 유기 목적으로 주로 실시되고 있다[7-9]. 종자는 그 자체가 식량자원으로도 활용되기 때문에 유통 및 보관 시에 문제가 되는 종자 내외부의 병해충을 사멸시키고, 저장성을 증진시키기 위해서는 식품조사와 마찬가지로 1,000~30,000 Gy 정도의 고선량의 이온화 방사선을 조사하게 되는데, 이런 선량에서는 종자는 생명력을 잃거나 상당한 발아 능력의 손상을 입게 된다[5,8]. 돌연변이 유기 시에도 각 작물 및 시료별로 적정 조사선량을 정할 때 반치사 선량(LD50)이나 30~50% 정도의 초기 생장 감소율 등을 이용하는데, 작물 종자에는 대략 100~500 Gy 정도의 선량을 조사하게 된다[7,11]. 이 정도의 조사선량에서는 일반적인 작물의 경우 모든 종자의 정상적인 발아나 유묘 생장을 기대하기 어렵고 유전물질에도 손상을 입을 가능성이 높다[11]. 따라서, 이온화 방사선을 종자에 조사하여 안정적이고 실용적인 종자처리 기술로 이용하기 위해서는 종자의 생명이나 발아 및 유묘 생장에 지장이 없고, 오히려 이러한 특성을 증진시킬 수 있으면서 유전물질에도 손상을 주지 않아야 한다. 또한, 방사선의 식물 종자의 발아나 생장에 대한 영향은 다양한 방사선원을 이용하여 연구가 되고 있지만[4,10,11], 본고에서는 앞으로 실용화를 생각할 때 1회 조사 가능한 시료 양의 규모가 적고 조사 시설의 구축 및 이용 편이성 면에서 불리한 양성자빔 및 중이온빔에 대한 것은 제외하고, X-선, 감마선 및 전자빔을 위주로 살펴보고자 한다.

2.1. 이온화 방사선의 발아 및 유묘 생장 증진 효과

X-선, 감마선 및 전자빔 등의 이온화 방사선에 의한 종자처리 연구에서는 상대적으로 저선량의 방사선 조사가 종자의 발아와 생육에 유익한 영향을 미치는 경우가 많이 보고되고 있다[4,11,12]. X-선이 종자의 발아를 촉진한다는 것이 1898년에 최초에 보고된 이후 간헐적으로 관련 연구가 이루어졌다[4,5]. 저선량의 감마선 조사도 종자 발아 및 식물 생장을 촉진한다는 것이 국내외에서 많이 보고되었다. 예를 들어, 처리 방사선 및 식물종에 따라 다르지만 대개 100 Gy 이하의 저선량의 방사선 처리를 받은 벼, 콩, 고추, 완두, 옥수수, 커피 등의 종자는 발아율 및 초기 생장이 촉진되고 식물체의 엽록소 함량 등의 증가와 최종 수확량

도 늘어난다는 보고들이 있다[4,11-13]. 물론 이 저선량이라는 개념은 상대적인 것이기 때문에 동물이나 생육 중인 식물체에서는 이것보다 더 낮은 선량의 조사에서도 치사에 이르거나 크게 생장장해를 나타낼 수 있다. 이러한 저선량 이온화 방사선의 종자처리에 의한 발아 및 초기 유묘 생장의 촉진 효과는 종자 프라이밍 기술의 하나로 간주할 수 있다.

저선량 방사선에 의한 종자나 식물체의 발아 및 생장 촉진 작용은 방사선의 호르메시스(hormesis) 효과로도 설명할 수 있다[4,5,11]. 호르메시스란 적은 양의 유해물질이 적용되면 생체 내에서 오히려 유익한 효과를 나타내는 현상을 말한다. 이는 생물체가 낮은 스트레스 요소에 노출될 때 생물체가 자신을 보호하기 위해 생물학적 적응력을 발휘하게 되며, 이로 인해 생존 가능성과 생식 능력이 증가하게 된다.

저선량의 이온화 방사선에 노출된 종자의 프라이밍 또는 호르메시스 효과에는 여러 가지 메커니즘이 작용하는 것으로 알려져 있다[4,11-13]. 첫째로 이온화 방사선은 처리 종자의 세포 내에서 핵산이나 단백질 대사뿐만 아니라 효소 활성화를 일으킨다. 이로 인해 종자 배의 휴면 타파 유도와 세포 분열 활동이 활성화되어 생장 속도가 증가하게 된다. 둘째로 이온화 방사선은 종자 내부의 무기질 조절에도 영향을 미쳐 무기질 농도가 적절하게 유지되며, 식물체의 발아 및 생장 증가에 도움을 준다. 셋째로 이온화 방사선은 종자 내부의 전분 분해 효소가 활성화되어 전분이 적극적으로 분해되어 식물체가 영양소를 빠르게 흡수할 수 있게 한다는 것이다. 이러한 메커니즘에 의해 저선량 조사는 종자 내부의 환경을 개선하여 작물 발아 및 생장에 기여하지만 방사선의 노출량과 처리 방법에 따라 오히려 작물에 해를 입힐 수 있다.

2.2. 저에너지 전자빔을 이용한 종자소독 기술

투과력이 높은 이온화 방사선을 이용한 종자소독 등 처리시에는 딜레마가 있다. 즉, 종자 내부까지 분포하는 병원균까지 완전히 제거하기 위해서는 투과력이 높은 이온화 방사선을 높은 선량으로 조사하는 것이 유리하지만 종자의 배, 배유 및 자엽에 있는 유전물질의 변화를 유도하여 종자의 가치를 떨어뜨릴 수 있다는 점이다[4.5]. 이온화 방사선 중에 전자빔은 방사선을 생성하기 위하여 구입이 까다롭고 재사용이 불가능한 방사성동위원소를 이용하지 않아도 되는 장점이 있다. 그러나, 고에너지의 전자빔도 감마선과 같이 투과력이 높아 농산물 및 식품 등의 멸균에 이용되고 있으나 종자 내부에 영향을 안주면서 처리하는 데는 제한이 있다[14,15]. 이러한 우려들을 불식시키고, 최근에 독일의 Fraunhoffer FEP (Fraunhofer Institute for Organic Electrons, Electron Beam and Plasma Technology FEP)을 중심으로 개발된 저에너지 전자빔을 이용한 종자처리 기술이 상업적으로도 활용되고 있다[16-18]. 저에너지 전자빔을 이용한 종자처리의 특징은 주로 종자 표면이나 껍질(종피) 층에만 방사선이 작용하며, 종자 내부에 있는 배 등의 유전물질에는 손상을 안 준다는 것이다. 즉, 90~150 keV 정도의 저에너지 전자빔을 이용하여 상대적으로 높은 선량(5~50 kGy)의 전자선을 종자 표면에서 20~200 μm 깊이만 주로 작용시켜 종자의 껍질(종피)층에 있는 병원균을 사멸시키면서 종자 내부 조직에는 영향을 거의 없게 한다는 것이다[17]. 저에너지 전자빔을 얻기 위해서는 고진공 조건에서 전자를 발생시켜 가속해야 가능하다. Fraunhoffer FEP에서는 band emitters의 개발을 통하여 대기 중에서 연속적으로 종자를 저에너지 전자빔을 조사할 수 있는 신기술을 적용한 콤팩트한 저에너지 전자선 가속장치를 개발하였다. 이 종자처리기의 경우 2개의 전자발생기가 서로 반대편에 위치하여 각각 저에너지 전자빔을 생성한다. 종자가 2개의 전자발생기 사이를 통과할 때 각각의 종자 표면이 전자에 노출되게 되어 있다. 이때 각 종자의 모든 면이 설정한 선량만 노출되고 종자의 외피층까지만 전자가 침투하여 효과를 나타나게 된다. 전자빔의 종자처리 시에 중요한 파라미터로는 종자에의 조사(흡수)선량과 투과 깊이가 중요하다. 따라서, 종자 종류 및 종피의 특성에 따라 조사선량과 투과 깊이 등을 조정하여 종자 배의 유전물질에는 가급적 영향이 없이 효율적으로 종피의 병원균을 제거할 수 있다[16-18]. 물론, 병원균에 따라서는 종자 내부까지 침투하여 존재하는 경우가 있는데, 이런 병원균의 방제 효과는 떨어진다고 볼 수 있다.

Vishwanath *et al.*의 연구에 의하면, 저에너지 전자빔을 15~30 kGy 처리한 밀 종자를 파종 재배한 결과, 무처리나 유기합성 농약을 처리한 경우와 비교하여 발아율은 높아지고 병발생률이 감소하였으며, 최종 작물 수확량도 유의적으로 증가하는 경향을 나타냈다[17]. 또한, 처리 비용도 합성농약 처리보다 낮게 나타났다. 일반적으로 채소 종자가 식량작물 종자보다 저에너지 전자빔의 조사가 효과적

Table 1. Pathogen control effect in major crops by low-energy electron beam treatment. Modified from the data of Fraunhofer PEF (2016)

Crops	Pathogen	Effect
Winter wheat	*Tilletia canes* (common burnt of wheat)	Very good
	Septoria nodorum (Brown speit of grain)	Good
	Fusarim spp. (moulds)	Good
	Microdochum nivale (snow mould)	Moderate to good
	Septoia spp. (leaf blotch)	Moderate to good
Winter barley, Summer barley	*Drechslera graminea* (stripe disease)	Good
Winter rye	*Urocystis occulata* (smut fungus)	Very good
	Fusarium spp. (moulds)	Good
Triticale	*Fusarium* spp. (moulds)	Good
	Microdochium nivale (snow mould)	Moderate to good
Caraway, Fennel, Coriander, Aniseed	*Alternaria* spp.	Very good
Parsley	*Alternaria* spp.	Very good
	Septoria spp.	Very good
Carrots	*Xanthomonas* spp.	Very good
	Alternaria spp.	Very good
	Phoma spp.	Very good
Cabbage	*Xanthomonas* spp.	Good
Lamb's lettuce	*Phoma* spp.	Very good
Beans	*Pseudomonas* spp.	Very good
Celery	*Septoria* spp.	Very good
Onions	*Xanthomonas* spp.	Very good
	Alternaria spp.	Very good

인데, 토마토 종자의 경우 15 kGy 정도의 고선량에서도 발아율이나 초기 생장에 지장이 없이 효과적으로 종자 표면의 병원균을 제어할 수 있는 것으로 나타났다[16-18]. 나물용으로 쓰는 콩 종자에 저에너지 전자빔을 조사한 실험에서는 8~60 kGy 선량 범위에서 종자 발아율은 무처리에 비교하여 증가하거나 큰 영향이 없었지만 초기의 뿌리 발육에는 약간의 저해 경향을 나타낸다고 하였다[19].

지금까지 Fraunhofer FEP의 연구 결과[16-18], 저에너지 전자빔을 이용한 종자처리가 적용가능한 작물 종류로는 50여 종이 넘는데, 곡물 및 식량작물류로는 밀, 옥수수, 보리, 트리티케일, 호밀, 귀리, 두류 등을 포함하고, 채소류에는 상치, 양배추, 당근, 파프리카, 토마토, 양파 등과 기타 허브류, 목초류 및 감자 종서 등을 포함한다. 적용 가능한 종자의 크기는 0.1~2.0 cm 범위이다. 방제 효과가 뛰어난 적용 병원균으로 5종의 곡류에서는 *Tilletia canes*, *Septoria nodorum*, *Fusarim* spp., *Microdochum nivale*, *Septoia* spp., *Drechslera graminea*, *Urocystis occulata* 등 7종이었고, 허브류와 채소류에는 *Aternaria* spp., *Septonia* spp., *Xanthomnas* spp., *Phoma* spp., *Pseudomonas* spp. 등 5종류였다(Table 1). 이러한 병원균의 대부분은 우리나라에서도 여러 작물에서 중요 병원균으로 간주된다.

Fraunhofer FEP에서 개발된 저에너지 전자빔에 의한 종자처리 기술은 BayWa AG 및 Nordkorn Saaten GmbH 회사에 이전되었고, E-PURA® 및 E-VITA®라는 브랜드명으로 2002년부터 상업적으로 판매되고 있다. 실적량은 2002~2014년 사이에는 매년 2,000~7,000톤이었고, 2012

년 이후에는 매년 1만 톤 이상의 처리 및 판매 실적을 나타내고 있다. Fraunhofer FEP의 연구용 전자빔 처리 시설은 시간당 1,000개 정도의 종자처리가 가능하였지만 상업용 종자의 전자빔은 시간당 최대 30톤의 처리가 가능하여 처리 비용을 크게 낮출 수가 있다[16].

3. 기타 물리적 종자처리

3.1. 플라즈마에 의한 종자처리

플라즈마는 제4의 물질 상태라고도 하며, 강력한 전기장 또는 열원으로 가열되어 기체 상태를 뛰어넘어 전자, 중성입자, 이온 등을 형성하는 고에너지 상태를 말한다. 이 고에너지 상태에서 다양한 물질과 상호작용하며, 이에 따라 종자처리 효과가 나타난다. 플라즈마를 이용한 종자처리 기술은 발생기로부터 생성된 가스나 액체 상태의 플라즈마를 이용하여 작물의 종자를 처리하여 종자 발아 및 생육을 촉진하는 것이다. 플라즈마에는 전자나 기체의 온도나 압력에 따라 다양하게 분류되는데, 종자처리 등 농업분야에서는 저온 플라즈마(low temperature plasma)가 주로 이용되는데, 이것은 비열 플라즈마(non-thermal plasma) 또는 냉기체 플라즈마(cold atmospheric plasma) 등으로도 불린다[19-21]. 그리고, 플라즈마에 의한 종자처리에는 직접 플라즈마에 노출시키는 직접적 처리와 플라즈마에 처리된 물 속에 종자를 넣는 간접적 처리로 나눌 수 있다[22]. 처리하는 가스 종류 및 유입량과 처리 시간에 따라 종자처리의 효과가 달라진다.

저온 플라즈마가 종자의 발아와 유묘의 생육을 촉진하는 것에는 다음과 같은 원인이 알려져 있다. 첫째, 플라즈마가 처리 종자의 표면을 극성 또는 무극성으로 변경시킴으로써 종자 발아 및 생육 촉진과 병해충 방제 효과를 유발한다는 것이다. 플라즈마 처리기에서 생성된 플라즈마에 종자를 노출시키면, 화학 반응에 의해 종자 표면이 극성 또는 무극성으로 변화된다. 그러면, 작물의 생육에 영향을 주는 여러 가지 효과를 얻을 수 있다. 극성이 높은 종자는 물과 상호 작용하여 작물이 물을 더 쉽게 흡수할 수 있도록 하고, 무극성이 높은 종자는 공기 중의 물이 적게 달라붙게 되어 병해충 및 질병에 대한 저항성이 증가하게 된다. 종자 수분 함량이 적절하지 않으면 저온 플라즈마 처리 효과가 떨어지기 때문에 종자의 수분 함량을 적절하게 유지하는 것이 중요한데, 종자 수분 함량이 8~12% 정도가 적당한 것으로 알려져 있다. 둘째로는 저온 플라즈마로 처리된 종자는 생리활성조절물질을 생성하며, 이러한 물질은 작물의 종자 내부에 존재하는 각종 효소, 아미노산, 당분 등의 생리 작용의 활성화로 종자의 발아를 촉진한다. 셋째는, 저온 플라즈마 처리 과정에서 생성된 활성산소는 종자 표면에 존재하는 유기물질을 산화시키는 역할을 한다. 이를 통해 종자의 내부 구조를 바꾸고 산화 작용을 촉진하여 작물의 생장과 발아를 촉진한다. 또한, 이렇게 생성된 활성산소는 종자 내부의 면역성을 증진시키고 미생물을 죽여 작물이 병해충으로부터의 피해를 줄일 수 있다. 마지막으로, 플라즈마 처리는 종자 표면에 존재하는 미생물을 직접적으로 제거하는 효과가 있다. 이를 통해 종자 발아에 방해가 되는 미생물을 제거하고, 작물의 생장과 발아를 촉진한다[20-22].

저온 플라즈마 처리는 광선이 닿은 부분만 효과를 나타내는 UV-C를 이용한 종자소독 방법에 비해 더욱 균등한 처리 효과를 낼 수 있다. 저온 플라즈마에 의한 종자처리 기술은 이미 일부 작물에서 소규모이지만 실용적으로 적용이 시도되고 있다. 예를 들면 벼, 콩, 감자, 토마토, 고추, 양파, 감자 등 다양한 작물의 종자(묘)에서 저온 플라즈마 처리를 통해 종자소독 및 미생물 제거 효과를 내고 있다. 저온 플라즈마를 이용한 종자처리 기술이 상업적으로 확대되려면, 시간당 수십에서 수백 킬로그램(kg)의 처리 능력을 갖는 장치의 개발이 필요하다. 플라즈마 종자처리는 마른 종자에 처리하는 건식법과 수중의 종자에 처리하는 습식 방법으로 나눌 수도 있다. 최근에는 농산물의 보존, 수경재배, 식품가공 및 축산 분뇨 등의 처리에 플라즈마 처리 기술을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[20-22].

3.2. 마이크로파에 의한 종자처리 기술

마이크로파는 높은 주파수 전자파를 사용하여 물질을 가열하고 처리하는 기술이며, 식품의 가열 및 조리 등 가정에서도 많이 이용되고 있다. 이 기술은 종자처리에서도 적용되어, 식물의 생장을 촉진하거나 병해충을 제거하는 등의 효과를 나타내고 있다[5]. 즉, 마이크로파는 높은 열을 발생시켜, 종자 내외부의 병원균 등 미생물을 제거할 수 있다. 그리고, 마이크로파는 물질 내부의 분자 운동을 촉진하여, 종자 내의 생리 및 영양 물질의 대사를 활성화시키고

발아율을 향상시키거나 유묘의 생장을 촉진시킨다. 물론 마이크로파가 내는 열이나 진동의 정도가 종자의 생명에는 지장을 주어서는 안되는 범위여야 한다. 이러한 마이크로파를 이용한 종자처리 기술은 몇몇 농작물에 적용되어 효과가 인정되었다. 벼, 옥수수, 대파 등의 종자를 마이크로파로 처리하여 발아율을 향상시키고, 엽채류 채소의 종자에 대해서는 균주 제거와 생장 촉진의 효과가 확인되었다. 예를 들어, Szopinska and Dorna (2021)에 의하면, 발아율이 50% 정도이고 *Aternaria*균에 38% 정도 감염된 당근 종자에 전원출력 500~750 W와 15~60초 처리 조건 범위에서 발아력의 증진과 병원균의 방제 효과가 인정되었는데, 60초 이상 처리에서는 종자 발아가 저해되었다[23].

마이크로파가 식물 종자의 발아 및 생장을 촉진하는 메커니즘은 여러 가지가 거론되고 있다[5,23-26]. ① 열작용: 마이크로파는 전자기파의 형태로 식물 종자에 전달되는데, 이때 마이크로파는 종자 내부의 물 분자를 직접적으로 가열시키며, 이를 통해 열작용이 발생한다. 이 열작용은 종자 내부의 온도를 높여 발아 및 생장에 필요한 활성화 에너지를 공급하며, 이를 통해 발아 및 생장을 촉진시킬 수 있다. ② 자극작용: 마이크로파는 종자 내부의 물 분자를 진동시켜 진동에너지를 유발하고, 생리 작용을 자극하여 발아 및 생장을 촉진할 수 있다. ③ 생리활성물질 변화: 마이크로파 처리는 종자 내부의 생리활성물질을 변화시킬 수 있다. 이를 통해 발아 및 생장에 필요한 식물생장조절물질, 단백질, 효소 등의 생리활성물질이 증가하거나 활성화되어 발아 및 생장을 촉진할 수 있다. ④ 미생물 제거: 마이크로파 처리는 종자 내외부의 세균, 곰팡이 등을 제거하여 발아 및 생장을 촉진할 수 있다. 마이크로파 종자처리 기술은 대상 작물 종자의 종류, 처리 시간 및 강도(출력) 등에 따라 발아 및 생장을 촉진하는 메커니즘이나 정도가 달라질 수 있다. 따라서 실제 적용 시에는 각 종자에 적합한 마이크로파 처리 방법을 선정하고, 적절한 실험 및 검증을 거쳐야 한다.

3.3. 자기장에 의한 종자처리

자기장(magnetic field)은 자기력을 나타내는 물리적인 현상으로, 전기적으로 충전된 입자의 운동이나 전기장에 의해서도 발생한다. 지구 자기장과 같이 자연적인 현상으로 나타나기도 하며, 모든 물질은 일정한 정도의 자기장을 가지고 있다고 할 수 있다. 또한, 자기적인 힘을 가진 자석이나 전류가 흐르는 선 등에서 발생할 수 있고, 우리 주변에서는 전자기장, 지자기장, 전류에 의한 자기장 등이 일반적으로 관찰된다[5].

자기장에 의한 종자처리는 자기장에 특정 농작물의 종자를 노출시켜 생리학적, 화학적, 생화학적인 변화를 유도함으로써, 종자의 발아율, 생장력, 내성 등을 개선시키는 것이다. 자기장에 의한 종자처리 기술은 대개 저-중간 정도의 자기장 속에서 종자를 연속적으로 처리하는 것으로, 종자를 일정한 강도와 주파수의 자기장에 노출시켜서 종자 내부의 분자 구조나 생리 작용을 변화시킨다. 이를 통해 발아 시기가 단축되거나, 발아율이 높아지고 병해충에 대한 내성을 강화하는 등 유묘의 생장을 개선시킬 수 있다. 지금까지 종자 발아율 및 초기 생장이 증진이 보고된 식물 종자를 보면, 대두, 팥, 옥수수, 밀, 벼, 오이, 고추, 상치, 토마토 등 주요 식량 및 채소류로 다양하며, 이때 적용된 자기장의 강도는 5~300 mT (millitesla) 범위이다. 지구에서 생장하는 식물은 보통 50~60 μT의 자연자기장을 항상 받는다고 하는데, 이것에 비교하여 약 100 이상의 자기장 강도라고 할 수 있다[5,27,28].

자기장이 종자 발아율을 증진시키는 메커니즘은 아직 정확하게 밝혀진 것은 아니지만, 다음과 같은 몇 가지 원인이 거론된다. 첫째, 자기장이 종자 내부에 있는 물 분자의 이동성을 증가시켜, 종자 내부의 전분과 단백질 등이 더 잘 용해되어 종자 발아 시의 영양소 이용의 효율이 증가하고, 따라서, 발아율이 높아진다는 것이다. 둘째, 자기장이 종자에 가해지면, 종자 내부의 생화학적 반응에 영향을 주어 식물의 생장과 발아를 촉진하는데, 자기장이 종자 내부의 ATP와 ADP의 비율을 변화시킴으로써 에너지 대사를 촉진시킬 수 있다는 것이다. 셋째, 자기장이 종자 내부의 DNA에 영향을 주어 특정 유전자의 발현을 조절함으로써 종자의 발아와 생장을 촉진한다는 것이다. 하지만, 이러한 이론들은 아직 실험적으로 많이 검증되지 않았으며, 자기장이 종자에 미치는 정확한 영향이나 메커니즘에 관해서는 앞으로도 연구 대상이라 할 수 있다. 자기장에 의한 종자처리는 일부 종자병 억제에도 효과적인 것이 알려졌는데, 이것은 직접적인 살균 효과보다는 종자 내부의 생리적인 활성화에 의해 면역체계가 강화되어 병저항성이 향상되는 것으로 보여진다. 따라서, 자기장 처리가 종자 병원균의 소독 대체까지 포함하는 종자처리 기술로 사용될 수 있는지에 대해서는 추가적인 연구와 검증이 필요하다[27,28].

자기장을 이용한 종자처리 장치는 일반적으로 종자에

일정한 강도와 주파수의 자기장을 발생시키는 자기장 발생기와 자기장이 처리하는 종자를 보관하거나 취급하는 처리기로 구성된다. 일반적으로는 자기장 처리 조건은 자기장 강도는 0~800 mT (millitesla), 주파수는 20 Hz~1 MHz, 처리시간은 0.5~24시간 이내이나, 종자의 종류와 사용 목적에 따라 적절한 처리 조건을 설정하는 것이 중요하다[5,27,28]. 자기장은 식물분야 적용은 종자 발아 촉진 이외에도 자기장 처리수를 재배에 이용하여 식물 생육이나 스트레스 저항성 등의 증진 효과를 유도하기도 하며, 녹조류 배양 시에 자기장 처리를 하여 생육을 촉진하는 것 등이 알려져 있다.

4. 결론 및 제언

방사선 등 물리적인 에너지원을 이용한 처리 방법은 화학적인 처리 방법이 갖고 있는 환경 및 인축 독성이 없이 이용할 수 있기 때문에 앞으로 확대 이용이 기대된다. 종자처리의 목적은 식물 종자에 따라 달라질 수 있는데, 일반적으로 종자소독에 의한 종자 전염병의 예방이 가장 크고, 휴면 타파나 종자 발아 능력을 촉진하는 데에 주안점을 두고 실시된다. 본고에서 살펴본 이온화 방사선과 저온 플라즈마, 마이크로파 및 자기장 등의 물리적 종자처리에 관한 연구 결과를 살펴보면, 종자의 발아율이나 초기 생장을 촉진하는 결과가 많이 얻어졌다(Table 2). 그런데, 종자 발아나 초기 신장을 유도하는 물리적 처리원의 에너지 강도에서는 종자 병의 방제를 위한 소독 효과를 기대하기 어려운 경우가 많다. 종자 내외부의 병원균을 사멸시키기 위해서는 상대적으로 강한 방사선량이나 에너지를 처리해야 하는데, 이런 경우 종자 자체가 사멸하거나 유전물질이 심각한 손상을 받을 수 있다. 특히, 이온화 방사선의 경우, 투과력이 뛰어나기 때문에 종자 내부의 배 조직 등의 유전물질에 손상을 주지 않기 위해서는 발아 및 초기 생장을 촉진하는 100 Gy보다 낮은 정도의 저선량의 방사선을 조사해야만 한다. 그런데, 저에너지 전자빔은 미생물도 사멸시킬 수 있는 고선량의 전자선을 종자의 표면 및 껍질 부분에 집중적으로 작용시킬 수 있고, 종자 내부에 도달하는 방사선의 양은 상대적으로 낮다. 그렇기 때문에 종자 내부에 존재하는 병원균의 사멸에는 부족하지만 종자 표면 및 외피층에 주로 분포하는 종자 병원균의 방제에는 효과적이라 할 수 있다.

저에너지 전자빔 이외에도 저온 플라즈마 및 자기장에 의한 종자처리는 에너지가 주로 종자 표면에만 작용하는 것으로 보여진다. 마이크로파 처리는 종자 내부까지도 작용하는 것으로 보여지나 종자의 발아 및 생장에 지장이 없거나 촉진하는 프라이밍 목적으로 처리하는 정도의 강도에서는 종자 내외부의 병원균을 효과적으로 제거하기에는 부족한 것으로 보여진다. 주요 식량작물이나 채소류 등의 종자는 기본적으로 발아율이 95% 이상되는 종자의 생산이 요망된다. 그러기 때문에 자연 발아율이 떨어지거나 깊은 휴면을 가지는 몇몇 식물의 종자를 제외하고는 종자처리는 종자소독을 통한 종자 전염병의 예방이 주목적이고, 발아율을 높이는 것은 부차적인 것이라 할 수 있다. 따라서, 검토된 여러 가지 물리적인 종자처리 기술 중에 종자소독 효과가 높고 1회 처리 용량이 높은 저에너지 전자빔 기술이 다른 기술보다 빨리 상업화에 적용될 수 있었다고 볼

Table 2. Applied energy intensity and main effects on seeds by each physical seed treatment methods

Physical methods	Applied energy intensity	Main effects on seeds	References
X-ray, Gamma-ray	20~150 Gy	Improved germination and seedling vigor	4, 10, 11, 12, 13, 14
Low energy electron	5~50 kGY	Sterilization of seed coat, Improved germination	4, 14, 15, 16, 17, 18, 19
Low-plasma	Depend on treated gas type and volume and treated time	Improved germination	19, 20, 21, 22
Microwave	2~5 GHz	Improved germination, Reduction of seed bone diseases	5, 23, 24, 25, 26
Magnetic field	5~300 mT	Improved germination and seedling vigor	5, 27, 28

수 있다.

이러한 결과를 종합해 볼 때 물리적 종자처리 방법이 종자의 발아 촉진에 효과가 있다고 해서 바로 상업적인 종자처리에 적용하기에는 한계가 있을 수 있다. 즉, 기존의 다른 기술을 대체할 만한 종자소독이나 프라이밍 효과가 있어야 하고, 경제성을 담보하기 위한 종자처리 용량도 확보가 되어야 한다. 따라서, 물리적인 종자처리 기술이 확대되기 위해서는 각각의 물리적 처리원과 작물 특성에 맞는 안정적이고 안전한 처리 기준의 설정과 효율적인 처리 장비의 구축이 필요하다. 작물 종류에 따라서 매년 처리해야 할 종자의 특성, 수량 및 처리 목적이 다양하고, 물리적 처리원의 효과와 처리 장치의 특성 및 처리 용량 등이 다양하기 때문에 이러한 특성을 종합적으로 고려한 종자처리 기술 및 장치의 개발과 적용이 요망된다.

마지막으로 우리나라에서 물리적인 종자처리 기술을 적용한다면 우선적으로 벼를 대상으로 하면 좋을 것 같다. 우리나라 주곡 작물인 벼의 재배 시에는 키다리병, 도열병, 알마름병 및 벼잎선충 등 종자 전염 병해충을 방제하기 위하여 유기합성 농약을 이용한 종자소독을 거치고 있다. 매년 종자 소요량은 1 ha 기준 50 kg으로 총량은 4만여 톤에 달하며, 소독 후 버려지는 폐액 처리에 의한 환경오염 및 인축 독성의 우려도 크다[1]. 따라서, 종자소독 효과가 뛰어나고 처리 용량도 많은 저에너지 전자빔을 이용한 벼 종자소독 기술의 개발과 이용이 요망된다. 그리고, 이 기술은 콩나물 및 새싹 채소용 종자소독에의 적용에도 유용할 것으로 보인다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 지원의 탄소저감 환경보전 유기농업과 유기자원 재순환 기술개발 사업 공동연구과제(No. PJ017043042022)와 국제원자력기구(IAEA)의 CRP 협력과제의 지원으로 작성되었으며, 지원에 감사를 표한다.

참고문헌

1. Choi KJ. 2021. Golden seed of future. Yeolrinkihoik Co. Seoul, Korea, 498pp.
2. Chauhan A. 2011. Seed Treatment, Plant Health and Agro-Technology. Discovery Publishing House Pvt Ltd.
3. Afzal I, Javed T, Amirkhani M and Taylor AG. 2020. Modern Seed Technology: Seed Coating Delivery Systems for Enhancing Seed and Crop Performance. *Agriculture* **10**(11):526. https://doi.org/10.3390/agriculture10110526
4. Wang J, Zhang Y, Zhou L, Yang F, Li J, Du Y, Liu R, Li W and Yu L. 2022. Ionizing radiation: Effective physical agents for economic crop seed priming and the underlying physiological mechanisms. *Int. J. Mol. Sci.* **2**(23):15212. https://doi.org/679 10.3390/ijms 232315212
5. Araujo SS, Pararella S, Dondi D, Bentivoglio A, Carbonera D and Balestrazzi A. 2016. Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. *Front. Plant Sci.* **7**:646. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646
6. El-Naimi M, Toubia-Rahme H and Mamluk O. 2000. Organic seed-treatments as a substitute for chemical seed-treatment to control common bunt of wheat. *Eur. J. Plant Pathol.* **106**:433-437.
7. Farkas J and Mohacsi-Farkas C. 2011. History and future of food irradiation. *Trends Food Sci. Technol.* **22**:121-126.
8. Kharkwal MC. 2012. A brief history of plant mutagenesis. *In*: Shu QY *et al.* (eds.), Plant Mutation Breeding and Biotechnology. CABI, UK and FAO, Rome, pp. 21-30.
9. Sivasankar S, Heng LK and Kang SY. 2020. Agriculture: Improving crop production. Encyclopedia of Nuclear Energy. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12323-1
10. Kim SH, Kim SY, Ryu J, Jo YD, Choi HI, Kim JB and Kang SY. 2021. Suggested doses of proton ions and gamma-rays for mutation induction in 20 plant species. *Int. J. Radiat. Biol.* **97**(11):1624-1629. https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1969053
11. Lee EK, Kim JS, Lee YK and Lee YB. 1998. Effect of low dose γ-ray irradiation on the germination and growth in red pepper (*Capcicum annuum* L.). *Hort. Env. Biotech.* **39**(6):670-675.
12. Dada KE, Animasaun DA, Mustapha OT, Bado S and Forster BP. 2022. Radiosensitivity and biological effects of gamma and X-rays on germination and seedling vigour of three *Coffea arabica* varieties. *J. Plant Growth Regul.* **42**(2). https://doi.org/10.1007/s00344-022-10643-z
13. Abdel-Hady MS, Okasha EM, Soliman SSA and Talaat M. 2008. Effect of gamma radiation and gibberellic acid on germination and alkaloid production in *Atropa belladonna* L. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* **2**:401-405.
14. Fan X, Sokari K, Weidauer A, Gotzmann G, Rogner FH and Koch E. 2017. Comparison of gamma and electron beam irradiation in reducing populations of *E. coli* artificially inoculated on mung bean, clover and fenugreek seeds, and affecting germination and growth of seeds. *Radiat. Phys. Chem.* **130**:306-315.
15. Aisala H, Nygren H, Seppanen-Laakso T, Heinio RL, Kießling M, Aganovic K, Waser A, Kotilainen H and Ritala A. 2021. Comparison of low energy and high energy electron beam treatments on sensory and chemical properties of seeds. *Food Res. Int.* **148**:110575. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110575
16. Fraunhofer FEP. 2016. Electron treatment of seeds; Environmentally friendly, Efficient, Sustainable. www.fep.fraunhofer.de. Fraun-

hofer FEP. 2.5. E04
17. Vishwanath K, Weidauer A, Pallavi HM, Roegner FH and Ramegowda. 2016. Low energy electron treatment - An eco-friendly tool against seed borne disease. *Seed Res*. **44**(1):23-31.
18. Weidauer A. 2017. Electron treatment of seed. *In*: International Conference on Applications of Radiation Science and Technology. PPT Presentation files.
19. Waskow A, Butscher D, Oberbossel G, Kloti D, Rudolf von Rohr P, Buttner-Mainik A, Drissner D and Schuppler M. 2021. Low-energy electron beam has severe impact on seedling development compared to cold atmospheric pressure plasma. *Sci. Rep*. **11**: 16373. https://doi.org/10.1038/s41598-021-95767-0
20. Yan D, Lin D, Zvansky M, Kohanzadeh L, Taban S, Chriqui S and Keidar M. 2022. Improving seed germination by cold atmospheric plasma. *Plasma* **5**:98-100.
21. Song JS, Kim SB, Ryu S, Oh J and Kim DS. 2020. Emerging plasma technology that alleviates crop stress during the early growth stage of plants: A review. *Front. Plant Sci.* **11**:988. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00988
22. Priatama R, Pervitasari AN, Park S, Park SJ and Lee YK. 2022. Current advancements in the molecular mechanism of plasma treatment for seed germination and plant growth. *Int. J. Mol. Sci.* **23**:4609. https://doi.org/10.3390/ijms23094609
23. Szopińska D and Dorna H. 2021. The effect of microwave radiation on germination and health of carrot (*Daucus carota* L.) seeds. *Agronomy* **11**:2571. https://doi.org/10.3390/agronomy11122571
24. Friesen AP, Conner RL, Robinson DE, Barton WR and Gillard CL. 2014. Effect of microwave radiation on dry bean seed infected with *Colletotrichum lindemuthianum* with and without the use of chemical seed treatment. *Can. J. Plant Sci*. **94**:1373-1384.
25. Mohsenkhah M, Mahzoon M and Talei D. 2018. Microwave radiation, seed germination and seedling growth responses in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Hortic. Int. J*. **2**(6):332-336. https://doi.org/10.15406/hij.2018.02.00072
26. Fisayomi OO, Adeyinka AA, Oluwatosin AJ, Oyindamola OF and Adeniyi AS. 2021. Effects of low and medium microwave radiation on germination of bean and maize seedlings. *Int. J. Acad. Multidiscip. Res.* **5**(9):197-206.
27. Sarraf M, Kataria S, Taimourya H, Santos LO, Menegatti RD, Jain M, Ihtisham M and Liu S. 2020. Magnetic field (MF) applications in plants: An overview. *Plants* **9**:1139. https://doi.org/10.3390/plants9091139
28. Kataria S, Baghel L and Guruprasad KN. 2017. Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* **10**: 83-90.