

저선량 전리방사선에 의한 작물의 활성증진

김재성, 이영복¹⁾
한국원자력연구소, ¹⁾충남대학교

Ionizing Radiation Hormesis in Crops

Jae Sung Kim and Young Bok Lee¹⁾ (Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon, 303-353, Korea
¹⁾Chungnam National University, Taejon, 305-764, Korea)

SUMMARY : The most remarkable aspect in the hormesis law is that dose of harmful agents can produce effect that are diametrically opposite to the effect found with high doses of the same agent. Minute quantities of a harmful agent bring about very small change in the organism and control mechanisms appear to subjugate normal processes to place the organism in a state of alert and repair. The stimulated organism is more responsive to changes in environmental factors than it did before being alerted. Routine functions, including repair and defense, have priority for available energy and material. The alerted organism utilizes nutrients more efficiently, grows faster, shows improved defense, and lives longer.

Accelerated germination, sprouting, growth, development, blooming and ripening, and increased crop yield and resistance to disease are found in plants. Another concept supported by the data is that low doses of ionizing radiation provide increased resistance to subsequent high doses of radiation. The hormesis varies with subject plant, variety, state of seed, environmental and cultural conditions, physiologic function measured, dose rate and total exposure. The results of hormesis are less consistently found, probably due to the great number of uncontrolled variables in the experiments. The general dosage for radiation hormesis is about 100 (10 to 1,000) times ambient or 100 (10 to 1,000) times less than a definitely harmful dose, but these must be modified to the occasion. Although little is known about most mechanisms of hormesis reaction, overcompensation of repair mechanism is offered as one mechanism.

서론

인류를 포함한 지구상의 모든 생명은 강한 방사선, 특히 높은 γ 선 존재하에서 진화하여 왔으며 일상생활중 음식물, 물, 대지, 집, 의류 및 신체는 저수준의 방사선을 계속 방출하고 있어 사람을 포함한 모든 생체는 전리방사선을 피할 수 없다. 전리방사선의 외부 선원에는 원자로와 핵폭발 이외에 석탄, 가스 및 석유연소 시설등이 포함되는데 이들 에너지원의 해결과 합리적 관리가 인류 기술사회의 발전을 결정한다고 할 수 있다. 대부분 사람들에 대한 최대의 방사선 피폭선원은 X선과 γ 선에 의한 진단, 치료등 핵의학 이용과 자연방사선이며 이들 전체선원에서 사람의 전신 방사선 피폭량은 지역과 생활문화에 따라 다소 차이는 있으나 평균적으로 연간 약 500 mR 정도다.

전리방사선은 다른 오염물질 보다 광범위하게 연구되어 그 유해한 영향은 잘 알려져 있는데 세포의 원형질 유동성이 감소하고, 세포의 점성 및 막의 투과성이 상승하며, 돌연변이가 유기된다. 돌연변이는 약 1,000개중 1개가 농업관련 분야에서 유익할 가능성이 있고 돌연변이의 대부분은 미래의 자손에 유전자 및 표현형에 이상을 가져온다. 고선량의 전리방사선은 세포의 액화 및 사멸을 가져오며 중식종의 세포, 특히 유사분열시의 DNA 손상은 회복할 시간이 없기 때문에 감수성이 가장 높다.

방사선 장해에 관한 우리들의 지식은 저선량률과 저·중선량 피폭에 대한 정보가 부족하여 고선량 급성 피폭에 관

한 정보에 근거하기 때문에 저수준의 방사선 작용을 잘못 해석하기가 쉽다. 생물체가 급성조사에서는 치사선량에 해당하는 총선량을 장기간에 걸친 피폭 실험을 수행해보면 중대한 장해를 나타내지 않음을 볼 수 있다. 급성 방사선조사에 의해 잘 알려진 신체적 장해는 전리방사선을 유해하다는 단순화된 견해를 조장시켜 방사선의 급성 또는 만성 피폭 어느 쪽에서도, 저선량과 극미량 방사선에 의한 장해의 예측과 혼동하게 하는 원인이 되고 있다. 이러한 무서운 단점은 각각의 광자나 입자의 흡수가 치명적으로 작용하지 않을 수도 있다는 것과 모든 생명체는 최적 상태 유지를 위하여 필연적으로 환경방사선에 항상 피폭되고 있다는 사실과 이 예측이 방사선 hormesis의 증거에 의해 타당치 않다는 것을 보여주는 것도 무시하고 있다.

본론

1. Hormesis 용어 및 배경

1) Hormesis란?

일반적인 이론의 하나로서 방사선자극 (radiation hormesis)이 인식되기 위해서는 이에 상응하는 개념을 먼저 설명할 필요가 있겠다.

Hormology라는 말의 어원중 hormo는 그리스어의 흥분하다 (to excite)와 -ology는 ~에 관한 연구 또는 지식 (study of, or knowledge of)에서 유래한 말로서 hormology는 흥분

의 연구이다. 대상, 작용물질, 수량, 반응과 반응의 방향등은 특정되어 있지 않다. 이 말은 일반적으로 자극 또는 촉진 (stimulation)을 의미하며 대상이나 작용물질은 물리적, 화학적, 생물학적인 어느 것도 될 수 있다. 자극은 작용의 시작을 나타내며 긍정적인 반응을 의미한다. Hormone도 같은 어원을 가지며 hormesis로 나타내는 hormology의 구성요소로서 동일 범주에 속한다.

Hormesis는 어떤 계(system)에 대한 어떤 물질의 유해량 이하에 의한 긍정적인 자극을 말한다. Southam과 Ehrlich¹⁾에 의해 처음 사용되었는데 생리학적인 첨가량에서는 곰팡이의 생육을 억제하는 참나무 껍질 추출물이 저농도에서는 곰팡이의 생육을 촉진하는 것을 나타내기 위해 사용하였다. Hormesis는 Arndt-Schulz 법칙 "소량의 독은 자극작용이 있다 (small doses of poison are stimulatory)"를 다시 설명한 것인데 이는 다시말하면 유해량 이하의 유해한 작용물질이 생물체에 자극적인 반응을 일으킬 수 있다는 것이다²⁾. 그 효과는 일반적으로 최적이하의 조건에서 더욱 커지며 작용물질은 물리적, 화학적, 생물학적인 어느쪽도 좋으나 "유해 이하 (subharmful)"와 "소량 (small)"을 정의하는 것이 매우 어렵다.

Hormetin은 유해량 이하에서 자극을 나타내는 작용물질을 의미한다. Hormetic은 그 현상이고, hormetize는 그 동사이다. Hormoligosis는 작용물질의 극소량 (oligo-)에서 얻어진 자극작용을 나타낼 때 유용하게 쓰인다.

2) Hormesis 이론

많은 약리학적 작용물질의 다양한 효과중 식물의 생육, 증식 및 저항성을 촉진하는 여러 종류의 화학물질중에는 항생물질, 호르몬, 비살균성 화합물, 비소와 비소유도체, 색소, 표면활성제, 농약 및 금속등이 포함되어 있다. 물리적 작용물질은 소량으로도 매우 효과적인데, 열, 저온처리, 광, 초음파, 자장 및 전기 등이 이에 포함되며 번식, 생존율, 성장, 호흡, 섭식효율 및 수명등에 관해 많이 연구되었다³⁾.

전리방사선은 이것이 발견된 후 짧은 시간내에 자극작용이 있는 것으로 알려 졌는데, Malkiney와 Thourenin⁴⁾은 X선이 종자의 발아를 촉진하는 것을 발견하였고, Richet⁵⁾는 소량의 Ra이 발아를 증가시키며, Erler⁶⁾는 방사선조사가 식물의 성장을 가속시킨다고 보고하였다.

독극물, 항생물질, 약물 및 개개의 물리적 작용물질과 관련된 가설들이 하나의 주요 원리를 형성하기 위한 상호관계가 있을 것이다. 즉 "유해물질의 유해량 이하의 적당한 용량은 생물체에 대해서 자극작용을 가질수 있다."는 논리가 형성되는데 이것은 특히 최적조건 이하의 상태에 있는 생물체에 적절하며 많은 문헌조사에 의해 형성된 것이다²⁾.

이 논리에 의해 방사선 자극작용을 이해할 수 있었으며 좀더 정확한 실험을 설계하도록 하여 농업에서의 중산, 질병에 보다 효율적인 치료법, 보다 확실한 건강증진 방법 개발 및 산업현장에서의 개개인에 대한 합리적인 방사선 피폭제한의 수단등에 이 자연의 힘을 이용하는 계기를 마련하였다. 방사선 hormesis에 대한 많은 자료들은 이러한 논리를 더욱 지지하게 하였고, 이상한 결과로 간과할 수 있는 저선량 방사선에서의 결과들을 이해할 수 있는 개념을 제공하였다.

Hormesis를 이해하는 것은 환경변화에 따른 어떠한 반응을 예측할 수 있을 뿐만아니라 생물학적 반응의 해석을 가능하게 하였다. 작용물질은 어떤 반응을 일으키지 않으면서

미량 수준으로 환경내에 존재한다. 자극반응은 자연계에 있는 량의 100배이상 크거나 유해용량의 100배이하보다 적게 투여되었을 때 일어날 수 있는데 실험포장의 잔류 살충제가 후일 해충의 대량발생의 원인이 되었다는 보고⁶⁾가 그 한 예이다. Moore 등⁷⁾이 식이성 항생물질에 의한 성장촉진을 발견한 이래 많은 연구자들이 저수준의 항생물질에 의한 작용기작을 조사하였으나 시간-용량 상호작용의 복잡성과 반복간의 다양한 변이성 때문에 실용적인 결과를 얻을 수 없었고, 세균, 선충, 곤충, 새, 포유동물등을 이용해서 고온하에서의 생존율과 저농도 살충제에서의 성장증가 및 저선량 X선에서 성장을 증가등을 확인하여 hormesis 개념의 정당성은 확인할 수 있었다²⁾.

3) 선량 - 반응 곡선

약리학 자료에는 그림1에서 보듯이 4가지 형태의 중요한 용량-반응곡선 관계가 있다²⁾. 고전적인 독성의 용량-반응곡선은 α 곡선으로 정의하나 이 곡선에서 zero점까지의 추정치는 저선량반응을 고선량에서 얻은 곡선의 일부분으로 잘못 생각하게 할 수 있다. α 곡선의 단순성은 오해를 가져올 수 있어 저선량에서 더 많은 실험적 조사를 수행해서 다른 형태의 반응곡선으로 나타낼 수 있을 것이다.

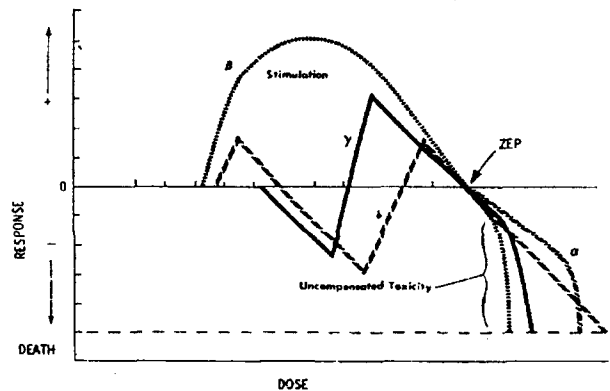


Fig 1. Types of hormesis reponse. Different types of hormetic reponse are compared to the α curve, which shows no hormesis

β 곡선은 잘 확립된 형태이나 안정된 반응을 나타내는 것은 아니고 매우 변동적이다. 환경과 개체의 미묘한 변화는 상당한 차이를 가져와 다른 실험실간에 비교할 만한 결과를 얻는 것은 매우 어렵다.

γ 와 δ 곡선은 β 곡선보다 훨씬 드물고 재현하는데도 어려움이 많으며 체계적으로도 조사되지 않아 만족스럽게 설명할 수도 없다. δ 곡선은 경우에 따라 몇 개 cycle을 만든다고 한다.

방사선 hormesis에 대한 자료는 선량-응답반응의 각 형태내에서 상당한 변화를 보이면서 하나의 peak 또는 넓은 곡선을 만들며 hormesis를 위한 선량은 항상 적을 필요는 없다.

선량-반응곡선은 그 형태와 관계없이 ①작용물질과 반응에 대한 완전한 선량-반응곡선이 각각 조사되어야 하고 ②독성에 관한 자료에서 영점까지의 추정은 대체로 많은 오차를 범하며 ③저선량에서 자극작용을 보여주는 각 작용물질에 대한 영점상등점 (zero equivalent point, ZEP)이 있음을 나타낸다(그림 2). 자극작용은 ZEP이하의 어떤 선량에서 나타나는 중요한 효과이며, ZEP는 공중위생과 안전 기

준설정 및 생리적으로 유효한 문턱선량을 결정하는 데 유용할 것으로 생각된다.

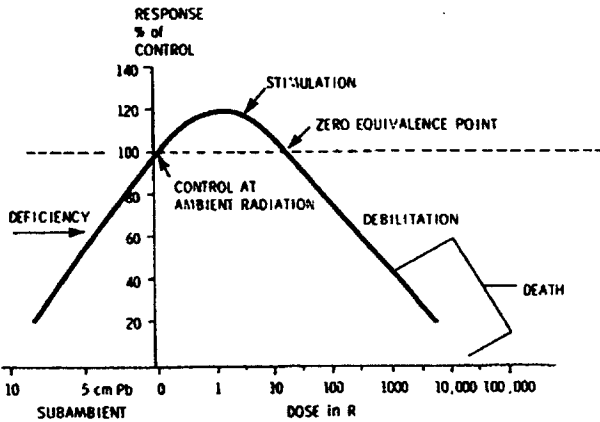


Fig 2. Complete dose-reponse curve for ionizing radiation.

The equivalence point (ZEP) shows there is no detectable response at this dose according to the parameter being tested.

높은 변이성, 즉 반복실험에서 차이가 많고, 수회의 실험 중 한두번은 유의성없는 반응을 보이는 것 등이 Hormesis의 연구를 어렵게 만들고 있는데 항생물질의 경우 성장촉진은 검체와 환경이 최적이하의 조건에서 긍정적으로 나타나며, 농도가 다르면 자극받는 생리적지표도 달라지는 것 같다. 일정농도의 반복실험에서 똑같은 반응을 보이지 않으며, 모든 작용물질의 최고의 용량-반응곡선은 각각 다른 형태를 가지므로 어떤 용량이 가장 좋다고 특정지을 수 없다. 그래서 통계적으로 확실한 결과를 얻을 때까지 많은 용량에서 반복실험을 수행하여 넓은 범위의 표준화가 이루어져 실제적인 규모로 hormesis가 이용되도록 해야할 것이다.

2. 방사선 Hormesis

방사선 자극작용에 대한 많은 증거가 보고되어 있으나 체계적인 재현성이 어려우며 자극현상의 존재는 인정되나 변이성이 높아 실제적으로 이용하기가 매우 힘들다. Luckey²⁾와 Simon 등³⁾은 식물에서의 자극작용에 대하여 광범위하게 인정하였고, 몇개의 재현성있는 효과에도 불구하고 하나의 선량-반응곡선상에 정의상관과 부의상관이 혼재한다는 이유로 많은 사람들이 수용하지 않고 있다. 많은 연구에서 거론하는 방사선자극의 낮은 재현성과 높은 변이성은 식물이 생육되는 환경속에서의 측정할 수 없고 조절할 수 없는 많은 변수 때문인데⁴⁾, Maltseva¹⁰⁾는 2 kR 조사된 토마토 종자의 함수량이 7 ~ 8%일 때는 자극효과가 있었으나 12 ~ 14% 수분함유한 종자에서는 자극반응이 적었고, 더 이상의 함수량에서는 반응이 나타나지 않았다고 하였다.

방사선을 하나의 hormetin으로 인정하므로서 이상한 결과들이 하나의 생물학적인 법칙으로 적용받게 되었고, 유용한 목적을 위해 방사선 hormesis를 체계적으로 연구할 수 있는 이론적 근거를 제공함과 동시에 방사선 자극은 hormesis의 일반 원리를 재확인 시켜주었다.

방사선 hormesis에 대한 초기연구는 주로 자연광물의 방사선을 이용한 것이다.

이들이 용기에 의해 여과 되었다면 남아 있는 주성분은 γ 선일 것이다. 즉 혼합 방사선원인 천연물질은 공기, 물, 유리, 금속, 조직등의 물질을 통과할때 α 선과 β 선은 정지되기

때문에 강한 γ 선을 발생한다. γ 선과 X선은 비슷한 영향을 주는 것으로 발생원에 의한 차이, 즉 핵외전자 수준에서 생성되는 X선은 보통 X선장치에서 발생되나 γ 선은 방사성물질의 핵내 수준에서 발생되며 사용된 대부분 X선은 γ 선보다 에너지가 낮다. 1960년대이전에는 ^{60}Co , ^{137}Cs 같은 거의 순수한 γ 선원이 없었기 때문에 많은 연구들이 저선량 X선으로 수행되었고, X선으로 수행한 초기연구들은 γ 선 성분이 높은 천연물질 (Ra과 그 생성물)로 수행하였기 때문에 사용된 각 방사선의 에너지에 따라서 연구결과를 분류하는 것은 어려워 본 보고에서는 방사선 hormesis중 전리방사선의 일반적작용에 의해 일어난 것으로서 γ 선과 X선에 관한 결과들을 정리하였다.

1) Gamma선

방사선중 γ 선은 의학과 농학분야에서 많이 이용되고 있는데 치료에 사용하는 γ 선량은 통상 원자력 직업종사자 (채광, 선광, 성형가공, 병기제조, 원자력발전) 또는 원자력산업 관련 지역주민들의 피폭에 비해 상당히 높은 선량이다. 농업분야에서도 고선량 방사선이 식품멸균, 살충, 육종, 해충구제, 발아억제등을 위해 사용되고 있는데 대부분이 유해효과를 나타내는 고선량으로 실험을 수행하였기 때문에 저선량에서의 hormesis 효과에 대한 어떤 암시도 줄 수 없었다. 방사선 자극작용에 대한 실험은 ^{60}Co , ^{137}Cs 을 이용하여 소련, 불가리아에서 한정된 규모로 수행하였고, 루마니아에서도 대규모로 수년간 실시하였다¹¹⁾.

방사선 자극작용의 연구에서 적당한 저선량으로 식물을 조사하면 뿌리혹 형성과 토양의 질산화작용이 증가하였고, 생장, 번식, 저항성, 생존율등이 저선량 γ 선 조사후에 증가하였으나 고선량에서는 유해하였다. 곡물류와 두류 및 피경류에서는 저선량의 적정선량으로 조사되었을때 상업적으로 실용적 가치가 있는 수량증가를 가져왔다¹²⁾.

곡물류 종자와 식물체의 방사선조사에 대해 상당한 자극작용이 나타났는데 (Table 1), 대조구에 비해 120%의 수량증가와 악조건하에서 발아증가와 병에 대한 저항성 증가등이 많이 보고되었으며 구소련에서는 방사선 조사를 위하여 이동형 γ 선원이 이용되었다⁶⁾. 수도의 경우 벼종자에 2.0 kR 이하의 방사선조사에서 초장과 수장 과 수량 증가가 보고되었으며¹³⁾, Sheppard와 Evenden⁹⁾은 보리와 밀종자에 저선량 방사선을 조사하여 재배한 식물체의 생육촉진과 수량증가를 보고하였으나¹⁴⁾, 방사선 조사시 수분함량이 10~13%인 종자¹⁶⁾와 조사시 온도가 10~15°C일때 자극효과가 있으나 20°C에서는 효과가 없었다는 보고도 있으며¹⁷⁾, Suess와 Grosse¹⁷⁾는 γ 선 1 ~ 2.5 kR 조사한 보리종자를 척박한 토양에서 재배하였을 경우 수량증가 효과가 있었으나, 비옥한 토양에서는 효과가 없었다고 보고하였다. 밀종자에 저선량 방사선을 조사하여 재배한 식물체의 수량증가는 없었으나 질소¹⁸⁾와 인산¹⁹⁾흡수가 증가되었다는 보고도 있다. 옥수수 종자에 저선량 방사선조사시 종자의 발아율증가²⁰⁾와 식물체의 생육촉진²¹⁾ 및 수량증가²²⁾가 보고되었으며, Degner와 Schacht²³⁾는 옥수수 수량증가는 최적 재배조건하에서 가장 양호하다고 하였고, Berezina와 Riza-Zade²⁴⁾는 0.5 kR의 γ 선 조사에서 옥수수 초장과 수량 및 단백질, 지방, 전분함량의 증가를 보고하였다. 저선량 방사선조사에 의한 호밀²⁵⁾과 메밀²⁶⁾의 수량증가와 광합성증가에 대한 결과도 보고되어 있다.

대두의 γ 선 저선량 조사에 의한 자극효과는 숙기단축과

Table 1. Gamma ray hormesis in plants

Crops	Seed srate	Dose	Stimulation effect
Rice	Dry seed	0.5-1.5kR	Increased plant height & yield
	"	1.0-2.5kR	Increased yield
	"	200R	"
Barley	Dry seed	1-100R	Increased germination, Initial development and yield
	"	10-200R	Increased germination
Wheat	Dry seed	0.5-2.5kR	Seedling growth stimulation
	"	1-200R	Increased germination
	"	10-100R	Increased P absorption
	"	1kR	Increased yield
	"	5kR	Increased N content
Corn	Dry seed	500R	Increased plant height, yield & protein, fat, starch and total nutrients content
	"	100-1,000R	Increased germination & yield
	"	0.5-2.5kR	Increased yield & total plant weight
Soybean	Dry seed	300-900R	Increased yield, protein content & full pod
	"	500R	Increased germination, yield & early ripening,
Potato	Cut tuber	1-300R	Increased germination & yield
	Tuber	200-400R	Increased tuber no. & yield
	"	100-600R	Increased yield
	"	0.5-2kR	Increased yield & vitamin C content
	Seed	500R	Increased yield & less susceptible
Tomato	Dry seed	800R	Increased germination & plant height, early flowering
	"	1kR	Fast grow , increased yield & carbohydrate
	"	0.5-1kR	Increased plant height, yield & early ripening
	"	0.5-5kR	Increased total wt. & N, P, and water uptake
Radish	Dry seed	200R	Increased yield
	"	1kR	"
	"	0.1-3kR	Increased growth & nucleic acid synthesis
Pepper	Dry seed	0.5-1kR	Increased growth & yield
Lettuce	Dry seed	50R, 3kR	Increased yield

수량증가¹¹⁾ 및 뿌리혹 생성증가²⁴⁾ 등이 보고되어 있으며, Corbean와 Bajescu¹⁶⁾는 조사된 종자가 척박한 토양에서 재배될 때 단백질함량이 증가되었으나 비옥한 토양에서는 거의 변화가 없었다고 하였다.

Sparrow와 Christensen²⁵⁾의 저선량조사에 대한 감자 연구에 뒤이어 많은 연구자들이 수량증가 효과 및 발아촉진과 휴면기간의 단축으로 한계절에 1회 이상의 수확 가능성을 보여주었으며²¹⁾²²⁾, 감자 괴경에 저선량 γ 선조사시 역병저항성 증가에 대한 보고도 있다²⁶⁾. Metlitskii²⁷⁾는 γ 선 저선량은 감자 발아를 촉진시키고, 중간 선량은 지연시키며, 고선량은 저해한다고 하였으며, 방사선조사후 단시간내에 산소 흡입량이 증가되었다가 그후 다시 정상으로 되돌아간다고 하였다. 선량이 크면 클수록 산소 흡입량의 증가가 커지고, 더 길게 유지된다고 하였는데 10 kR 조사후 2일동안 괴경전체와 그 절편에서 호흡량이 대조구에 비해 각각 123%와 128% 증가되었다. 이처리에는 ATP합성을 억제시키고 호흡을 증가시키는 방법으로 핵산대사를 변화시켜 발아를 억제하는 것으로 추정하였다.

채소 원예작물에 대한 연구는 상당한 변이를 보여주고 있으나 토마토의 경우는 발아증가와 생육촉진 및 수량증가에 대해 많이 보고되어 있으며²⁸⁾²⁹⁾, 숙기가 8일정도 단축된 조숙성¹²⁾도 나타났다. 저선량으로 조사된 토마토 종자의 식물체에서 양분함량의 증가가 많이 보고되어 있는데 탄수화물과 아미노산²⁹⁾ 및 caroten함량²⁸⁾ 증가이며, Pal 등³¹⁾은 토마토

종자에 γ 선 0.5 ~ 5.0 kR 조사하여 재배한 식물체에서 190%의 건물중 증가와 함께 물과 인산흡수 및 질소, 탄수화물, 비타민 C 함량이 증가되었다고 보고하였다.

무 종자에 대한 저선량 γ 선 조사에서도 발아와 생육촉진, 숙기단축(5~6일) 및 수량증가에 대한 결과가 보고되어 있으며²⁸⁾²⁹⁾, Pal등³⁰⁾은 무 종자에 γ 선 1 kR 조사한 결과, 발아와 생장은 촉진되었으나 비타민 C 함량은 대조구에 비하여 적었다고 하였다.

저선량 γ 선 조사에 의해 자극된 다른 식물의 종류에는 상추³¹⁾, 고추³²⁾, 오이³³⁾ 및 담배⁶⁾ 등의 생육촉진과 수량증가등 농업적가치가 있는 것이 많이 보고되어있다.

γ 선에 조사된 종자에서 생육한 식물의 생육촉진과 생장증대 외에도 옥수수³⁴⁾와 감자²⁶⁾등에서 감염에 대한 저항력 증대 보고도 있으며, 옥수수³⁵⁾에서의 광합성 증대와 콩과 식물에서 한발에 대한 저항성증가도 보고되어 있다³⁶⁾. 방사선 자극작용은 영양분이 부족한 척박한 토양에서 생육된 식물에서 효과적이라고 하였으나¹⁶⁾¹⁷⁾, Degner와 Schacht²³⁾는 옥수수의 경우 최고의 생육조건하에서 더 빠르게 생장함을 보여주었다.

2) X선

식물종자를 적당량의 X선으로 조사하면 발아율증가, 발아촉진, 생육촉진등의 효과를 가져오나 실험중 조절할 수 없는 많은 변수 때문에 일관된 결과를 얻기가 힘들다. 장비형

태, 사용된 에너지, 조사시간, 품종, 종자의 수분함량, 종자의 상태, 즉 저장된 것, 침지된 것, 발아중인 것, 재배환경 등 너무나 많은 변수가 있어 재현성이 적으며, 포장실험에서 수량과 생육증가가 나타나기도 하고 가끔 반대 결과도 있어 방사선 자극의 상업적 이용을 어렵게 만들고 있다. X선을 조사하여 파종한 종자의 생육은 Table 2에서 보듯이 가끔 성장과 수량을 촉진하여 120 ~ 160% 증가된 수량이 몇가지 선량과 수년에 걸친 실험에서 일관된 결과로 보고되어 있다^{12,37,38}. 벼종자에 X선 조사시 발아와 생육이 촉진되었으며³⁹, 저선량의 X선으로 조사한 보리의 생육증대⁴⁰ 및 수량증가⁴⁰ 효과가 얻어졌으며 Joseph⁴¹는 X선 조사한 보리종자에서 생육한 식물체에서 단백질 합성이 증가되었다고 하였다. Kuzin³⁷은 X선 조사한 밀이 대조구에 비해 발아력이 증가하였고, 숙기도 10일 정도 빨라졌으며 160% 정도의 수량증가를 보고하였다. 한편 Grisenko와 Mazhara³⁴에 의하면 X선 조사한 종자에서 생육한 옥수수가 병에 대한 저항성이 증가하였다. 콩과 식물의 X선조사는 발아력, 생육, 수량증가를 보인 γ 선 조사결과와 비슷하였으며³⁸, Weber⁴²는 X선조사하여 재배한 콩 식물체의 비타민 C 함량이 자연에서는 대조구에 비하여 높았으나, 뿌리에서는 낮은 결과를 얻었다. 감자 괴경에 대한 X선 조사는 수십년 동안 일관되게 방사선 자극효과를 보고하고 있으며 휴면타파²⁵, 발아촉진⁴³, 생육기간 단축⁴⁴, 괴경크기 증대⁴⁵ 및 수량증가^{44,46} 등의 효과가 인정되고 있으나 X선조사에 의하여 괴경크기는 증대되나 전체 수량 증가에는 효과가 없었다는 보고⁴⁶도 있다.

채소종자에 대한 X선 자극실험은 생장기간이 짧은 지역에서 실용화 가능성이 있는데 배추³⁷, 무⁴⁷, 상추³¹, 토마토⁴⁹, 고추⁴⁰ 등 발아, 생육, 개화와 숙기촉진 및 수량증가 등의 효과가 보고되어 있는데 종자에 저수준 X선을 조사하여 수행한 대부분의 연구결과는 저선량에서는 자극작용이 있고 고

선량에서는 유해작용을 한다는 공통된 특성을 보이고 있다.

방사선 Hormesis 작용기작

생체의 대사중인 조직에는 물이 중량으로서 약 70%, 분자 수로서 99%를 구성하고 있기 때문에 조직에서의 전리방사선 영향의 대부분은 간접작용이다. 물에서 생성된 이온과 radical은 SH화합물과 같은 포집제가 형성될 때까지 분자에서 다른 분자로 계속해서 주변분자에 작용한다. 대부분의 물리적, 화학적, 생물학적 작용물질들은 각각 특유한 방법으로 작용하지만 전리방사선은 유리 radical, 이온 및 파괴된 분자와 같은 공통인자를 통해서 반응을 시작하는 것으로 생각된다.

방사선 hormesis작용의 생화학적 기작에 대해서는 아직 미확인 상태이나 분명한 것은 비교적 저선량의 방사선 조사가 동·식물에 유익하게 작용하며, 세균은 일반적으로 조사에 대해 높은 저항성을 가지므로 작용기작은 전리방사선의 살균작용에 의한 것은 아니라는 사실이다. 방사선 조사후에 나타나는 대부분의 생리학적 반응은 많은 생화학적 변화를 반영하며, 최초 반응의 결정은 매우 어려운 것이나, Zelles와 Seibold⁴⁸에 의하면 새로이 생성된 RNA가 이 반응에 관련되어 있고, 어떤 종류의 아미노산의 생산증가나 quinoid 독성물질 같은 새로운 대사산물의 생성이 중요한 역할을 수행할 것이며 전체적으로는 방사선 조사된 생물체는 자극받지 않는 생물체에 비해서 보다 효율적으로 활동이 진행되는 쪽으로 변화가 일어난다는 것이다.

방사선 hormesis에 대한 일련의 변화에 관한 가설을 세울 수는 있다. 첫째 hormetin이 생물체에 특이적인 국부반응을 일으켜서 세포와 생물체의 생물학적으로 중요한 분자에 직접 또는 간접적으로 영향을 주어 새로이 생성된 특이한 이온, radical, 과산화물이 단백질, 비타민, 핵산, 지질 또는 당질을 변화시켜서 하나 또는 그 이상의 파괴된 화합물 혹은

Table 2. X ray hormesis in plants

Crops	Seed srate	Dose	Stimulation effect
Rice	Dry seed	5 - 10 R	Increased yield
Barley	"	400 - 1,600 R	Stimulated growth
	Wet seed	60 - 250 R	Increased dry wet
Wheat	Dry seed	0.5 - 2 kR	Stimulated growth
	"	5 kR	Increased sprout length
Corn	"	100 R	Increased P uptake & yield
	"	500 R	Increased seedling growth & yield
	"	1,000 R	Increased yield
Soybean	"	150 - 300 R	Increased germination & growth
	"	500 - 1,500 R	Increased yield
	"	1,000 R	Increased yield
Potato	Tuber	50, 300, 1,000 R	Increased yield
	"	400 - 800 R	Improved sprouting
	"	1,500 R	Increased yield
Cabbage	Dry seed	1 - 2 kR	Increased yield
Radish	"	500 - 1,000 R	Increased yield
	"	3 kR	Increased growth
Tomato	"	1 - 20 kR	Accerlerated germination & growth
Pepper	"	500 - 1,000 R	Increased germination & yield
	"	3 - 4 kR	Increased growth
Onion	"	100, 250 R	Stimulated rooting
	"	500 - 1,500 R	Increased weight
	Bulb	50 - 100 R	Increased height & fresh weight

이상한 화합물, 즉 방사선 독성물질로 변하게 한다^{37,50}). 둘째 문턱선량의 초기반응이 일어나는 경우, 자기조절 기능이 작동하여 생물체는 우선적으로 대사경로를 바꾸어 적응하게 된다²). 셋째는 변화된 내부환경이 조절기능을 변화시켜서 새로운 mRNA의 증가, 효소합성의 변화, hormone 균형의 변동, 세포간 인자 또는 환경인자에 대한 감수성 증대등으로 나타나게 한다. 기능에 대해서는 증가하는 것도 있고, 감소하는 것도 있을 것이고 호흡증가와 에너지의 재분배는 필연적으로 일어날 것이다^{10,69}). 넷째는 자원 이용의 우선순위가 변해서 회복, 발육촉진, 성장가속, 혹은 기타 측정이 곤란한 미세한 변화가 우선 순위로 될 것이며 저항력 증가와 수명연장은 발생초기에 기대되는 변화의 결과일지도 모른다^{21,27,69}). 다섯째는 변화된 개체는 최적조건 이하의 상태에 대해서 더욱 강하게 되어 효율과 활력의 증가를 보여준다^{1,650}). 앞에서 보고된 방사선 자극작용의 생리적 변화 대부분은 위에 열거한 작용기작의 공통점을 하나 이상씩 관계되어 있다.

생물체는 DNA, RNA, 단백질 합성, hormone, 신경 전달물질, 대사 조절인자 및 특이한 분자 등이 통합되어 매우 복잡하므로 방사선 hormesis의 작용기작의 각각을 하나의 특이한 이론으로서 해결하는 것은 매우 어려운 문제일 것으로 생각된다.

결 론

방사선 hormesis 효과가 돌연변이 결과일 가능성은 몇가지 이유 때문에 부적합하다. 즉 돌연변이 효과는 대부분 균일하지 않으며 장애가 유발된다. 유발 돌연변이에서는 균일한 반응이 일어나지 않고 조사된 수천 개 중에서 1개체만이 작물생산에서 유용한 것으로 기대된다. 방사선 hormesis에 관한 실험들은 균일한 효과를 보여주며 돌연변이 유기에 실제 사용했던 선량보다도 훨씬 낮은 선량에서 얻어진 것이고 저선량에서 조사된 개체의 1% 이하에서 돌연변이가 나타난다. 또한 돌연변이 유기효과는 대체로 첫 세대에서 나타나지 않으나 방사선 자극효과는 조사된 개체에서 일어나고, 대체로 다음 세대에서는 나타나지 않는다.

Hormesis는 개체에 변화를 일으켜 환경의 자극이나 stress에 대해서 전보다 다르게 반응시킨다. 이상적 상태에 있는 건강한 개체보다도 최적이하의 상태에 있는 개체에 활력과 체력의 증가를 일으키며 허약하거나 병약한 개체는 최대의 반응을 보이는 것으로 기대된다.

방사선 hormesis 개념을 이해하게 되면 전리방사선의 미세선량 영역까지의 이용 연구에 도움이 될 것이며, 자극 작용선량이 발견 되었다면 동일 조건을 사용해서 hormesis 선량 부근의 적당한 선량점에서 실험을 수행하여 최초 선량의 반응을 확인하는 선량-반응곡선의 특성을 확정하여야 한다. 약간의 실험조건 변화가 선량-반응곡선의 hormesis 위치와 특성을 크게 변화시킬 가능성이 있는데 고려해야 할 중요한 인자는 피검물의 조건, 환경조건 및 방사선량과 선량율이다. 일반적으로 사용하는 선량은 환경선량의 약 100배 (10~1,000배), 또는 확실한 유해작용이 있는 선량의 100 (10~1,000)분의 1정도이나 실험조건에 따라서 변경될 수 있다.

방사선 hormesis에 대한 많은 실험결과는 전리방사선의 종류에 상관없이 거의 비슷한 생물학적 영향을 보여주며 계통발생을 통해서 생물체는 저선량의 전리방사선에 의해 자극 받아 발아, 출아, 성장과 발육의 촉진, 수량 구성요소의 증

가동이 식물에서 관찰되었고 호흡, 한발, 뿌리혹 형성, 분지, 개화, 결실 및 영양생산등에서도 고유한 특성이 나타나며, 특이한 점은 저선량의 전리방사선에 의한 피폭은 그 이후의 고선량 방사선에 대해서 저항력을 증가시킨다는 것이다. 많은 작용기작이 hormesis에 관련되어 있을 것이나 회복가능한 과잉보상이 하나의 작용기작으로 고려되고 있는데 생물체의 에너지와 대사기능은 새로운 활동을 위해서 동원되게 되고 이때까지의 활동의 일부는 감소한다. 즉 통상활동의 일부가 감퇴되고 다른 기능이 발현하거나 증대하게 된다는 것이다. 방사선 hormesis는 식물 뿐만 아니라 원생동물, 척추, 무척추 동물에서도 나타나며 측정된 효과는 측정자의 능력에 의해서 한정되는 것으로 생각되나 호흡, 발아, 성장, 생육과 성숙, 생식, 질병과 조사후에 방사선에 대한 저항력 및 평균수명의 증가나 촉진등으로 나타난다.

방사선은 일종의 hormetin 이다. 물리적, 화학적, 생물학적 작용물질은 일정 용량에서 그에 상응하는 반응이 생길 것이며, 용량이 상호 친화적이라면 hormetin에 따라 서로 협력해서 작용할 것이다. 이에 대한 연구는 식이성 항생물질에 대해서는 많이 알려져 있지만 방사선에 대해서는 거의 알려져 있지 않다. 인구동태학, 질병 및 작물생산에 관한 연구는 여러가지 요소의 자연적, 인공적 변화와 상관성이 있을 것인데 자연계에 존재하는 작용물질의 농도변화로 일어나는 hormesis 개념을 도입한다면 종래 설명할 수 없었던 많은 현상에 대한 이해에 도움이 될 것이다.

요 약

Hormesis법칙의 주핵심은 유해작용을 가진 물질이 유해량 이하에서는 다량의 동일 작용물질이 보여주는 장해영향과는 정반대의 영향을 보여주는 것이다. 미량의 유해물질 투여는 생체에 미세 변화를 일으키고, 조절기능은 생체를 통상상태에서 예민상태와 회복태세로 바꾼다. 자극 받은 생체는 이전과는 다르게 환경 변화에 민감하게 반응하며, 통상기능은 지연되고 회복과 방어와 같은 기능에 에너지와 자원을 우선 이용하게 한다. 예민상태하의 생체는 영양분을 효과적으로 이용하고 성장을 빠르게 하며 방어 반응을 향상시키고 성숙도 빠르게하여 보다 효율적으로 번식시키며 질병이 감소되고 오래 살게 된다. 저선량 전리 방사선 조사 효과는 hormesis 일반 개념과 일치하였는데 방사선 종류에 상관없이 저선량으로 조사된 생물은 자극효과를 보여주었다. 식물에서는 발아, 출아, 성장, 발육, 개화, 결실촉진과 수량증대와 질병저항력 증가 및 저선량 조사 이후의 고선량 방사선에 대한 저항력 증가 등이 나타났다.

방사선 hormesis 작용은 대상식물, 종자상태, 환경 및 재배 조건, 측정하는 생리적 기능, 선량율과 선량에 따라 다르고, 조절되지 않은 많은 변수 때문에 일관된 재현성이 적으나, 일반적인 사용선량은 환경방사선량의 약 100배 (10~1,000), 또는 확실한 유해작용이 있는 선량의 100 (10~1,000)분의 1정도로 생각되나 실험조건에 따라 변경될 것이다.

방사선 hormesis의 생화학적 작용기작은 아직 미확인 상태이나 회복기능의 과잉보상이 주요 작용기작의 하나로 제시되고 있다.

REFERENCES

1. Southam, C. M. and Ehrlich, J.(1943), Effects of extract of western red-cedar heartwood on certain wood decaying fungi in culture, *Phytopathology*, 33, 517.
2. Luckey, T. D.(1980), *Hormesis with ionizing radiation*. CRC press, Inc., Boca Raton, Fla.
3. Maldiney, A. and Thourenin, J. R.(1898), On the influence of X-rays and germination, *Rev. Gen. Bot.* 10, 81.
4. Richet, C.(1906), The action of minute doses of materials upon lactic fermentation : periods of acceleration and retardation, *Arch. Int. Physiol.*, 4, 18.
5. Erler, M.(1906), Uber die heilend Wirkung der Rontgenstrahlen beiabgegrenzten Eiterungen, *Jahrb. W. Botan.*, 5, 65.
6. Kuzin, A. M., Uzorin, E. K., and Chirkovskii, V. L.(1963), Remote effects of γ irradiation of seeds on the development of various Nicotiana plants, *Radiobiology (moscow)*, 3, 903.
7. Moore, P. R., Luckey, T. D., Everson, C. A., McCoy, E., Elvehjem C, A., and Hart. E. G.(1946), Use of sulfasuxidine, streptothricin and streptomycin in nutritional studies with the chick, *J. Biol. Chem.*, 165, 437.
8. Simon, J., Digleria, M. and Lang, Z.(1981), Comparative studies on the effects of low dose x-ray and gamma irradiation on the amylase activity of maize seedling. *Proc. European Soc. for Nuclear Methods in Agriculture*. Aberdeen, U. K.
9. Sheppard, S. C. and Evenden, W. G.(1986), Factors controlling the response of field crops to very low doses of gamma irradiation of the seed. *Can. J. plant Sci.* 66, 431.
10. Maltseva, S.(1977), Effects of the moisture content of tomato seeds on the stimulatory action of low doses of γ rays (^{60}Co). *Radiobiology(Moscow)*, 17, 138.
11. Stan, S. and Croitoru, A.(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.
12. Miller, M. W. and Miller, W. M.(1987), Radiation hormesis in plants. *Health physics.* 52 (5), 607.
13. Thaug, M. M.(1960), Stimulating effects of nuclear radiation on development and productivity of rice plant. *Nature (London)*. 186, 982.
14. Glubrecht, H. and Niemann, E. G.(1971), Stimulating action of low doses of ionizing radiation in plants, 4th Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, United Nations, Geneva.
15. Iqbal, J.(1980), Effects of acute gamma irradiation, developmental stages and cultivar differences on growth and yield of wheat and sorghum plants. *Environm. and Exper. Botany*, 20, 219.
16. Corbean, S. and Bajescu N.(1965), Effect of chronic gamma radiation upon protein content of soybeans, *Ann. I. C. C. P. T. Fundulea* 33.
17. Suess, A. and Grosse, W.(1968), The effect of low doses of γ radiation of plant growth, *Strahlennutzung*, December, 1.
18. Haunold, E. and Zrara, J.(1971), Nitrogen content of two spring wheat varieties as affected by seed irradiation, *Stim. Newsl.*, 3, 30.
19. Korosi, F. and Krakkai, I.(1983), Effect of gamma irradiation of Phaseolus vulgaris L. seeds on $^{32}\text{PO}_4^{-3}$ uptake of seedlings and its translocation patters. *Environl. Exp. Bot.* 23, 149.
20. Kaindl, K. and Fosner, M.(1965), The accelerating effect of small radiation doses on plants, *Bayer. Landwirtschaft. Jahrb. Sonderh.*, 42, 11.
21. Berezina, N. M. and Riza-Zade, P. R.(1965), Radiation for pre-sowing treatment of corn seeds, *Vestn. Nauki, Min. Sel'sk Khoz. SSR*, 10, 10.
22. Caldera, P. G.(1971), Gamma stimulation of maize, *SDtim. Newsl.*, 2, 5.
23. Degner, S. and Schacht, W.(1975), Examination of the specific effect of low doses of ionizing radiation on the seed of cultivated plants : 5 year production experinents with silo maize seed irradiated with ^{60}Co gamma radiation, *Radiobiol. Radiother.*, 16, 37.
24. Hamatova, E.(1969), Influence of chronic γ irradiation on nodulation soya, *Rostl. Vyroba*, 15, 197.
25. Sparrow, A. H. and Christensen, E.,(1950), Effects of X-ray, neutron, and chronic gamma irradiation on growth and yield of potatoes, *Am. J. Bot.* 37, 667.
26. Zeimalov, I. I., Aliv, A. A., and Riza-Zade, R. R.(1972), Influence of preplanting gamma irradiation on the yield and phytophthorosis of potatoes, *Radiobiology (Moscow)*. 12, 311.
27. Metlitskii, L. V.(1967), Irradiation of potatoes and other vegetables to prevent sprouting, *Radiat. Obrabotka Pisch. Prod. Izdatel. Ekon. Moscow*.
28. Abdullaev, M. A. and Berezina, N. M. (1968), Radiostimulating effect in γ irradiated tomato seedings. *Dokl. Akad. Nauk. Az. SSR*, 24, 38.
29. Vlasjuk P. A.(1964), Effect of ionizing radiation on the physiological-biochemical properties and metabolism of agricultural plants, *Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR*, 24-31.
30. Pal, I., Pannonhalmi, K. and Maul, F.(1976), Report in the red radish phytotron experiments coordinated by ESNA at Godollo, Hungary, *Stim. Newsl.*, 9, 39.
31. Sax, K.(1955), The effect of ionizing radiation on plant growth, *Am. J. Bot.*, 42, 360.
32. Izvorska, N.(1973), The gamma ray effect on the growth, productivity, and some biochemical changes of pepper, *Inst. Fiziol. Rast. Bulg. Akad. Nauk*, 18, 79.
33. Yurina, A. V. and Kardashina, L. A.(1977), Presowing gamma irradiation of seeds as a method to increase cucumber fruitfulness in the hot house. *Radiobiology (Moscow)*. 12, 311.
34. Grisenko, G. V. and Mazhara, V. N.(1968), Ionizing and other types of radiation and their unfluence on the resistance of corn to stalk and root rot, *Tr. Vese. Soveshch. Immunitetu Rest.*, 2, 21.

35. Koepp, R. and Kramer, M.(1981), Photosynthetic activity and distribution of photoassimilated ^{14}C in seedlings of *Zea mays* grown from gamma-irradiated seeds, *photosynthetica*, 15.
36. Savin, V. N. and Stepanenko, O. G.(1967), Change of drought resistance of plants irradiated with ^{60}Co gamma rays, *Radiobiology (Moscow)*, 7, 619.
37. Kuzin, A. M. (1964), *Radiation Biochemistry*. Translated by Halperin, Y. Quastel, M. R., Ed, Israel Program, Science Translation, Jerusalem.
38. Gaur, B. K. and Joseph. B.(1972), Nature of radiation-induced stimulation in seedling growth, *Stim. Newsl*, 4, 48.
39. Saeki, H.(1936), studies in the effects of X-ray radiation upon germination, growth, and yield of rice plants, *J. Soc. Trop. Agric. Taiwan.*, 8, 28.
40. Fendrik, I. and Bors, J.(1980), Studies on the stimulating saction of x-rays on young plants of green pepper 'Cecei' -summarized results of 7 years. *Stim. Newsl*, 11, 27.
41. Joseph, B.(1972), *Physiological studies on radiation effects on plants*, Ph. D. thesis, Bombay University, India.
42. Weber, F.(1952), Bitamin C content of X-rayed seedlings, *Phyton (Am. Rev.Bot)*, 4, 144.
43. Jaarma, M. Influence of ionizing radiation on potato tubers, *Ark. Kemi*,13, 97.
44. Avakyan, T. M., Semerdzhyan, S. P., and Atayan, P. R.(1964), Resultsconcerning the remival of newly gathered potato tubers for the dormantstage, *Radiobiology(USSR)*, 4, 463.
45. Johson, E. L.(1936), Susceptibility of seventy species if flowering plants to X radiation, *Plant Physiol*, 11, 319.
46. Sprague, H. B. and Lenz, M.(1929), The Effect of X-rays on potato tubers for "seed," *Science*, 69, 606.
47. Kuzin, A. M.(1964), The utilization of ioniaing radiation in agriculture, *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, United Nations, Geneva*, 12, 149.
48. Tumanyan, E. R.(1974), Effect of radiation on tomato seeds and seedlings, *Biol. Zh. Arm.*, 27, 65.
49. Zelles, L. Seibold, H. W. and Ernst, D. E. W.(1977), Localization of the site of action of tube growth stimulation by micro UV irradiation of pine pollen, *Radiat, Environ, Biophys.*, 14, 61.
50. Kuzin, A. M., Kopylov, V. A. and Bagabova, M. E.(1976), On the role played by radiotoxins in stimulation of the growth and development of irradiated seeds, *Stim. Newsl*, 9, 27.The utilization of ionizaing radiation in agriculture, *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, United Nations, Geneva*, 12, 149.