

KAERI/AR-435/96



KR9600297

기술현황 분석 보고서

고등식물에서의 방사선 Hormesis

Radiation Hormesis in Higher Plants

한국원자력연구소

VOL 11 No 05

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

『방사선 및 방사성동위원소 이용과제』 중 “방사선 유전자원 개발연구 분야과제”와 관련하여 본 기술현황분석 보고서를 제출합니다.

제 목 : 고등식물에서의 방사선 Hormesis

1996. 3.

작성자 : 책임연구원 김 재 성

책임감수위원 김 동 훈

감 수 위 원 박 경 배

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 살게된다.

저선량 전리 방사선 조사효과는 hormesis 일반 개념과 일치하였는데 방사선 종류에 상관없이 저선량으로 조사된 생물은 자극 효과를 보여 주었다. 식물에서는 발아, 출아, 성장, 발육, 개화, 결실촉진과 수량증대와 질병저항력 증가 및 저선량조사 이후의 고선량 방사선에 대한 저항력 증가 등이 나타났다.

방사선 hormesis 작용은 대상식물, 종자상태, 환경 및 재배조건, 측정하는 생리적기능, 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 1 정도로 생각되나 실험조건에 따라 변경될 것이다.

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

자원의 보다 효율적인 이용과 식량의 최대한 생산 및 건강증진을 위해 방사선 hormesis의 실용적인 응용과 연구에 대해서 지원할 필요가 있을 것이다.

SUMMARY

The most remarkable aspect in the hormesis law is that low 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 reactions, matures faster, reproduces more effectively, has less disease, 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.

Radiation hormesis can provide more efficient use of resources, maximum production of foods, and increased health by the use of ionizing radiation as a useful tool in our technologic society. Efficient utilization of nature's resources demands support to explore the practical application of radiation hormesis.

목 차

제 1 장 서 론	1
제 2 장 Hormesis	3
제 1 절 용어 및 배경	3
1. 용어	3
2. 배경	4
3. 선량-반응곡선	5
제 2 절 Hormesis 이론	7
1. 일반적성질	7
2. 관련된 개념	9
3. Hormesis 원리	11
제 3 장 방사선 Hormesis	13
제 1 절 방사선에 의한 자극작용	13
제 2 절 전리방사선의 자극작용	14
1. Gamma선	14
2. X선	17
제 3 절 방사선 Hormesis의 작용기작	19
1. Hormesis의 작용특성	19
2. 생화학적 기작	21
3. 작용기작의 가설	24
제 4 절 방사선 Hormesis 전망과 이용	26
1. 연구전망	26
2. 응용	29
3. 돌연변이와의 관계	31
4. 실용화의 문제	31
제 4 장 결 론	38
참 고 문 헌	40

제 1 장 서 론

1898년 Atkinson (6)이 방사선 조사한 algae가 비조사한 대조군에 비해 성장속도가 빠르게 되는 신비로운 반응을 관찰한 이래 이 놀라운 새로운 현상의 발견은 그후 80년 가까이 계속되고 있다. 1919년 Davey (32)는 동종 요법적 저선량의 조사 (homeopathic doses)가 곤충의 수명을 연장시키는 것을 보고하였고, 1954년 Lorenz등 (83)은 모의 성장효과(pseudo growth effect)를 보고하였으며, 1976년 “이 기묘한 현상을 쥐에서 관찰하였는데 이들 쥐의 반응은 방사선조사된 것이 대조보다 더 원기 왕성하였다”고 결론지었다(47). 과잉으로 존재하면 상당히 유해한 것이 소량이라면 유익할 수 있을까? 많은 증거가 긍정적인 반응을 보여주고 있으며, 전리방사선의 저선량과 고선량사이에 정반대의 작용을 보여주고 있는데 본 보고서에서는 유해한 고선량에 관한 연구에서는 일반적으로 간과될 수 있는 저선량 전리방사선의 유익효과를 검토하고자 하였다.

전리방사선은 지구상의 생명의 시작에서부터 존재량에 있어서는 차이는 있으나 어디에나 편재해있다. 산간지대에 사는 사람은 해안지대보다 2배 정도의 높은 방사선을 받고 있으며 생활환경이 다르면 방사선량도 다르다. 저수준의 전리방사선은 생명에 따라 필수적이라는 증거도 있는데, 사람, 작물, 가축 및 기타 생물상에 대해 어느정도의 방사선량이 최적인가가 논의되고 있다. 대영백과사전의 “방사선” 항목에는 1945년에 일본인중 110~120R 피폭된 사람은 전혀 피폭되지 않던가, 그이상 다량으로 피폭된 사람보다 장수하였다고 기술하고 있다 (133). 이것은 포유류나 곤충에 대한 저선량 방사선의 수명연장 효과가 사람에게도 해당되는 것을 보여주고 있다.

식물생육에 대한 저선량방사선의 효과에 대한 광범위한 실험이 수행되었는데, 가장 설득력있는 실험은 phytotron내에서 수행되어 통계적으로 유의한 ($p < 0.01$) 결과가 얻어졌다. 본 보고서는 이제까지 식물분야에서 발표된 결과들을 요약하였는데 식물에 대한 저선량 전리방사선의 상업적응용이 가능한

분야는 휴면중단, 발아력증진, 생장과 발아의 촉진, 조숙 및 장기 개화유기, 발근력증진, 수량증가 등으로 나타났다.

제 2 장 Hormesis

제 1 절 용어 및 배경

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

1. 용 어

Hormology라는 말의 어원중 hormo는 그리스어의 흥분하다 (to excite)와 -ology는 ~에 관한 연구 또는 지식 (study of, or knowledge of)에서 유래한 말로서 hormology는 흥분의 연구이다. 대상, 작용물질, 수량, 반응과 반응의 방향등은 특정되어 있지 않다. 이말은 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 유해량이하에 의한 긍정적인(정의)자극을 말한다. Southam과 Ehrlich (120)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 것이다. 그 효과는 일반적으로 최적이하의 조건에서 더욱 커지며 작용물질은

물리적, 화학적, 생물학적인 어느쪽도 좋으나 “유해이하 (subharmful)”와 “소량 (small)”을 정의하는 것이 매우 어렵다.

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

Promotant는 생장촉진물질에 대해서 Briggs (19)에 의해 처음 사용된 용어이고 다른 척도로서도 사용될 수 있다. Parker (100)는 probiotic이라는 용어를 소개하였고, Zelles (148)는 biopositive라는 용어도 제안하였는데 이들 용어는 생물학에서 자극물질의 일반적인 성질을 나타내는 용어이다.

2. 배 경

여러 가지 물리적, 화학적 작용물질의 소량에 의한 자극작용의 특이한 경우 즉, 통상의 선량-효과곡선의 추정에 의해서 예측 할 수 없는 특이한 결과는 많으나 실험자들이 hormesis개념을 모르기 때문에 선량-효과곡선의 한성분으로 예상하지 않은 이상한 결과로 간주해 대부분 연구자들이 무시해 버렸다. Johnson (69)은 방사선조사에서 한번 이상 식물생장촉진을 보고하였으나 그녀 자신의 자료와 다른 사람의 결과를 인정하지 않았다. 마찬가지로 Read (101)도 실험에서 자극작용의 결과가 나타났으나 아무 언급없이 방사선생물학에 대해서 종합검토하였다. 많은 연구자들이 방사선 hormesis에 대한 증거를 획득하였으나 무시하거나 믿지 않았으며 또한 실험적 조건이 동일하게 조절되지 않았기 때문에 계속해서 동일한 결과를 얻는 것이 불가능하였고, 실험실에서나 1~2년간의 포장실험은 긍정적인 결과를 주었으나 3년째는 반대결과를 얻어서 전체적으로 선량-효과개념을 무시하고 대조구와 차이가 없는 평균치로 얻어진 결과를 일괄하였다.

마찬가지로 식이성항생물질 반응에 대한 동물생육 촉진반응도 기대하지 않은 것이었다 (85, 94). 식이성항생물질은 어떤 미지의 비타민 B를 결핍시켜 생육이 감소하도록 장내세균을 억제하는 것으로 기대하였으나 오히려 생

육을 촉진하는 것이 입증되었으며 많은 나라에서 과거 30년 동안 가금류, 돼지, 소등에 식이성항생물질을 산업적으로 이용하고 있으며 (84, 85), 인간도 비슷하게 반응한다고 보고하였다 (105). 불활성화된 항생물질과 비살균성약제에 의한 동물성장촉진과 소량의 살균제에 의한 세균의 발효와 성장촉진 보고도 있다 (85).

식이성항생물질은 화학적촉진제로 가장 잘 알려져 있고 방사선은 물리적 촉진제로서 가장 많이 기록되고 있다. 상처로 인한 성장지연은 치유후 가끔 성장촉진이 뒤따르는데 옥수수과 보리의 가벼운 상처는 1일에서 수일간의 성장촉진을 유도하였다 (134, 141).

Rivera (104)는 전자장이 식물과 식물종양의 성장을 촉진하는 것을 발견하였고, Santha (107)는 묘목을 강한 자장에 3일간 노출시켰을때 상당한 성장촉진이 있는 것을 보았으며, microwave가 저선량에서는 성장촉진을, 고선량에서는 성장을 억제한다는 보고 (131)와 열충격이 종자의 발아를 촉진한다는 보고도 있다 (5).

Pheromone같은 신호화학물질 (semiochemical)은 우리들의 환경작용물질로서 생물적 인자와 화학적인자사이의 상호작용을 보여주고 있는데 연어의 회귀가 이것의 좋은 증거이다 (64).

사회심리학적인자는 관찰하기 매우 어렵지만 생물학에서의 작용물질은 hormology에서도 이용가능하다고 생각되어진다. 우세, 만연, 군중, 감염등의 사회적요인과 애정, 혐오, 자기인식, 우울등의 심리적요인도 화학적, 물리적 작용물질과 마찬가지로 hormetin으로 작용할 수 있을 것이다.

3. 선량-반응곡선

약리학 자료에는 4가지형태의 중요한 용량-반응곡선 관계가 있다 (그림1) (135). 고전적인 독성의 용량-반응곡선은 α 곡선으로 정의하였다. 이 곡선에서 zero점까지의 추정은 저선량반응을 고선량에서 얻은 곡선의 일부분으로 잘못 생각하게 할 수 있다. α 곡선의 단순성은 오해를 가져올 수 있어 저선

량에서 더 많은 실험적 조사를 수행해서 다른 형태의 반응곡선으로 나타낼 수 있을 것이다.

β 곡선은 잘 확립된 형태이나 안정된 반응을 나타내는 것은 아니다. 이것은 쉬운 것으로 보이지만 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 몇개 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 추정치는 대체로 많은 오차를 범하며 ③저선량에서 자극작용을 보여주는 각 작용물질에 대한 영점상동점 (zero equivalent point, ZEP)이 있음을 나타낸

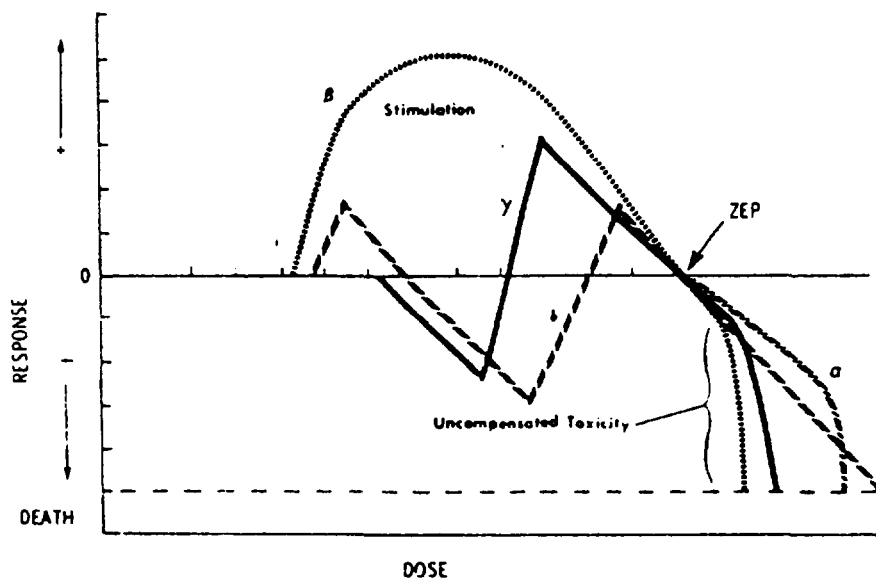


Fig. 1. Types of hormetic responses. Different types of hormetic responses are compared to the α curve, which shows no hormesis.

다. 자극작용은 ZEP이하의 어떤 선량에서 나타나는 중요한 효과이며, ZEP는 공중위생과 안전 기준설정 및 생리적으로 유효한 문턱선량을 결정하는데 유용할 것으로 생각된다.

높은 변이성, 즉 반복실험에서 차이가 많고, 수회의 실험중 한두번은 유의성없는 반응을 보이는 것등이 hormesis의 연구를 어렵게 만들고 있는데 항생물질의 경우 성장촉진은 검체와 환경이 최적이하의 조건에서 긍정적으로 나타나며, 농도가 다르면 자극받는 생리적지표도 달라지는 것 같다. 일정농도의 반복실험에서 똑 같은 반응을 보이지 않으며, 모든 작용물질의 최고의 용량-반응곡선은 각각 다른 형태를 가지므로 어떤 용량이 가장 좋다고 특정 지을 수가 없다. 그래서 통계적으로 확실한 결과를 얻을 때까지 많은 용량에서 반복실험을 수행하여 넓은 범위의 표준화가 이루어져 실제적인 규모로 hormesis가 이용되도록 해야 할 것이다.

제 2 절 Hormesis 이론

1. 일반적성질

많은 약리학적 작용물질의 다양한 효과중 식물의 생육, 증식 및 저항성을 촉진하는 여러종류의 화학물질중에는 항생물질, 호르몬, 비살균성화합물, 비소와 비소유도체, 색소, 표면활성제, 농약 및 금속등이 포함되어 있다 (84, 135). 물리적 작용물질은 소량으로도 매우 효과적인데, 열 (9, 38), 저온처리 (31, 132), 광 (142), 초음파 (41), 자장 (107) 및 전기 (93)등이 이에 포함되며 번식, 생존율, 성장, 호흡, 섭식효율 및 수명등에 관해 많이 연구되었다.

전리방사선은 이것이 발견된후 짧은 시간내에 자극작용이 있는 것으로 알려졌는데, Maldiney와 Thourenin (86)은 X선이 종자의 발아를 촉진하는 것을 발견하였고, Richet (103)는 소량의 Ra이 발아를 증가시키며, Erler(40)는 방사선조사가 식물의 성장을 가속시킨다고 보고하였다.

이와 같이 다양한 물질의 저용량에서의 유사한 반응은 공통된 작용기작이

있을 가능성을 암시하는데 이들 일련의 자료에서 상관관계를 그림2에 나타냈다. 이 결과에서 귀납적인 추리는 미지의 생물학적법칙이 존재함을 분명히 알 수 있다.

독극물, 항생물질, 약물 및 개개의 물리적 작용물질과 관련된 가설들이 하나의 주요 원리를 형성하기 위한 상호관계가 있을 것이다. 즉 “유해물질의 유해량이하의 적당한 용량은 생물체에 대해서 자극작용을 가질수 있다.”는 논리가 형성되는데 이것은 특히 최적조건이하의 상태에 있는 생물체에 적절하며 많은 문헌조사에 의해 형성된 것이다 (85).

이 논리에 의해 방사선 자극작용을 이해할 수 있었으며 좀 더 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.

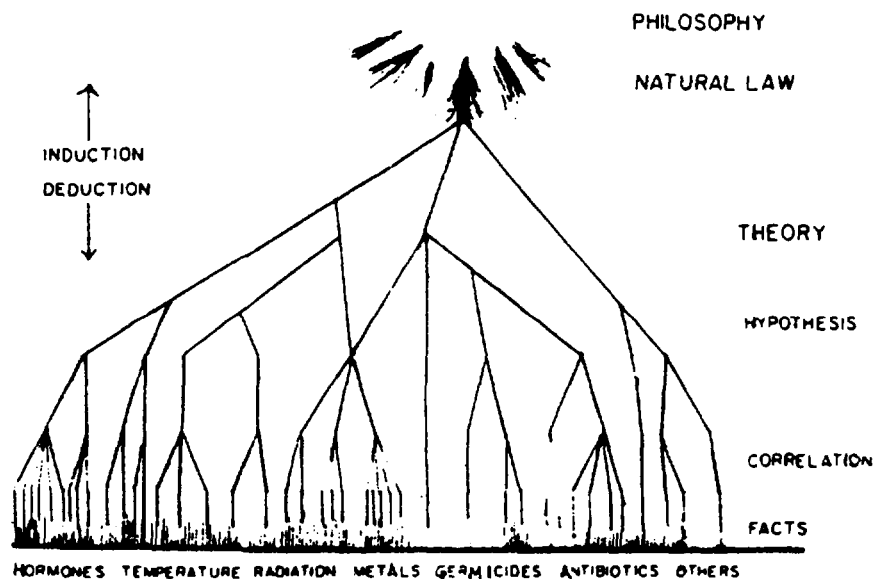


Fig. 2. Correlation of data sets suggests the hormesis thesis. Deduction from the thesis allows considerable understanding and predictability of results in relatively unexplored areas.

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 잔류살충제가 후일 해충의 대량발생의 원인이 되었다는 보고 (84)가 그 한 예이다.

Moore 등 (94)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 있었다 (83, 84).

2. 관련된 개념

1) Hippocrates & Hahnemann

여러가지 병의 치료를 위하여 미량 또는 소량 약을 투여한다는 것이 초기 의학의 기본원칙이었는데 hormesis에서 얻어진 결과들은 이 개념에 대한 실험적근거를 제공하였다. “similia similibus curantur”의 Hippocrates 원리는 질병증상과 비슷한 반응을 보이는 약을 처방한다는 것이다 (2). 이것은 후에 병은 발병된 기관과 물리적으로 비슷한 물질에 의해 치료될 수 있다는 특정 원리로 나타났다. 예를들면 귀통을 치료하기 위하여 cyclamen 잎을 먹는 것이다 (60). Hippocrates원리는 Hahnemann에 의해 수정 되었다 (61). 유사물 치료법의학 (Homeopathic medicine)은 아직도 많은 나라에서 시행되고 있으며 비현실적인 회석이 사용된다는 이유로 심하게 비평받고 있으나 가루약 조제시 흡착현상이 있으며 대부분 약처방에서 실제적으로 회석이 이용되며, 또한 의술은 단순한 약물만의 투여가 아니라는 인식등이 결여된 비평이라고 하였다. 유사물치료법과 hormesis의 주요한 차이는 유사요법은 각각의 증상

에 특수한 약을 사용하는 것에 반해서 hormesis는 많은 작용물질이 같은 결과를 나타낸다는 것이다. 유사요법 (homeopathy)은 인류에게 특별히 유효한 실험결과에 의존하고 있으나 hormesis는 Hippocrates의 첫번째 원리와 “contraria contrariis curantur (병은 길항물질에 의해서 치료될 수 있다)”는 제2원리도 포함하고 있다. 현대의학은 특수약품은 특별한 범주로 구별하고 있으며 이들은 특수한 작용기작을 갖는다. 소량의 식이성 항생물질이 넓은 성장촉진작용을 갖는다는 것은 hormesis에 특이성이 있다는 것을 의미한다. 이것은 비용, 안정성, 독성, 맛, 특허와 같은 시장특성과 취급상의 지식한계 등에 의해 있을 수 있을 것이다.

2) Bernard

Bernard는 치유된 조직은 상처받기 전보다 강해지고 환경변화에 적응성이 더욱 있음을 확인하였는데 이것을 내부환경의 항상성을 유지하는 생리적 과정중의 하나라고 하였다 (14). Weigert (141)와 Townsend (134)는 식물에서도 이 효과를 확인하였다. 단식, 침술, 지압요법, 출혈요법등의 유익한 효과도 이것과 같은 방법으로 해석되고 있으나 비슷한 작용의 성질로 보아 hormesis 개념을 왜곡하고 있는지도 모른다.

3) Arndt-Schultz and Weber

원래 미생물의 독성에 관한 Arndt-Schultz 법칙을 일반법칙으로 고전약리학에서 인용하고 있다. 즉 약한 자극제는 활성을 촉진하고 중간정도의 자극제는 억제하며 강한 자극제는 활성을 중지시킨다는 것이다 (112). 이것은 hormesis 개념과 일치하는 것이고 “일정 강도를 넘으면 어떠한 자극제도 자극작용이 감소된다”는 Weber의 법칙과도 일치한다(139). Maximov (89)는 식물독성에서 이 일반적인 효과를 관찰하였으며 음주, 흡연, 향신료, 흥분제 및 환각유발제등은 다소 차이는 있지만 사회적으로 허용된 hormetin으로 생각된다.

4) Richet

Richet는 Cannon의 개념을 예상하였다 (102). 즉 “생명은 영원한 자기조절이고, 변화하는 외부조건에 대한 적응이다.” 생명체는 자극에 의해서 안정되고 외부환경에 따라서 스스로 변형할 수 있다. 이 능동적인 재조절 작용은 진정한 안정성을 위해 필요한 조건이다.

5) Cannon

생물체의 일정한 상태의 평형유지 (항상적 평행상태의 불변성) 즉, Cannon의 항상성 (homeostasis)은 외부환경의 변화에 대해 적응하기 위해서는 여러 작용기작이 있어야 할 것이다. 생체는 결정적인 stress수준이 이들 항상성 작용기작의 하나를 변형시킬때 반응한다 (24). 항상성 및 항상성 작용기작인 다양한 대사반응과 생화학적기능은 hormesis와 관련된 반응의 해석에 유용한 정보를 제공하였는데 DNA회복기작과 같은 반응은 homeostasis와 방사선 hormesis 모두에 중요하다.

3. Hormesis 원리

Hormesis는 다양한 물리적, 화학적, 생물학적 작용물질에 의한 생물체의 자극에 대한 공통작용기작을 의미한다. 유해물질의 유해량이하의 소량투여는 최적이하의 조건하에서 생물체의 반응을 변화시킨다. 이 자극반응은 유해량으로 투여되었을 때 나타나는 작용물질의 특이적인 작용과는 거의 관계가 없다. 가벼운 stress인자의 존재는 현재로서는 완전히 이해할 수 없는 여러 가지 방법으로 생물체를 최적이하의 조건에 대해서 반응하도록 변화시킨다. 예를 들면 항생물질이 투여된 병아리는 같은 최적이하의 조건에 있는 대조구에 비해 단백질, 비타민, 무기염류, 먹이의 요구량이 적었고 더 빠른 체중증가를 보였다.

Hippocrates, Hahnemann, Schultz, Cannon, Bernard등은 현대의학에서 특이적작용을 갖는 약품과는 별도로 작용물질이 비특이적인 유익작용을 갖는

다는 개념의 정립에 공헌하였다. 유해물질의 이중적인 작용에 대해서 설명하기가 어려운 것은 저용량에서의 자극작용은 비특이적이고, 동일한 작용물질을 대량 투여했을 때의 작용과는 정반대효과를 나타내기 때문이다. Hormesis는 유해물질의 작용에 대한 우리들의 개념을 바꾸어 놓았으며, 유해물질의 소량 투여는 일반 stress인자로 작용하여 특이적반응을 일으키는데 대량투여시 물질의 특성에 따라 일어나는 특이적인 유해작용과는 반대로 작용물질 보다는 반응조건에 의존하며 내적 및 외적 최적이하의 조건에 따라서 다르게 반응한다. 이와같은 개념은 약물에 관한 다수 문헌에서 서술되어 있으며 저선량 방사선에 관한 자료에서도 확인되고 있어 방사선에 의한 자극작용도 hormesis이론과 일치하는 것으로 생각된다.

제 3 장 방사선 Hormesis

제 1 절 방사선에 의한 자극작용

방사선 자극작용에 대한 많은 증거가 보고되어 있으나 체계적인 재현성이 어려우며 자극현상의 존재는 인정되나 변이성이 높아 실제적으로 이용하기가 매우 힘들다. Luckey (84)와 Simon 등 (116)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 측정할수 없고 조절할수 없는 많은 변수 때문인데 (115), Maltseva (87)는 2 kR 조사된 토마토 종자의 함수량이 7~8%일 때는 자극효과가 있었으나 12~14%수분함유한 종자에서는 자극반응이 적었고, 더이상의 함수량에서는 반응이 나타나지 않았다고 하였다.

방사선을 하나의 hormetin으로 인정하므로써 이상한 결과들이 하나의 생물학적인 법칙으로 적용받게 되었고, 유용한 목적을 위해 방사선 hormesis를 체계적으로 연구할 수 있는 이론적근거를 제공함과 동시에 방사선 자극은 hormesis의 일반원리르 재확인 시켜주었다. Kuzin (76)은 초기연구에 의하여 생산성이 20%이상 증가하여 생물학적 오차변이를 넘어 통계적으로 유의성 있는 정의 상관을 보고하였다.

방사선 hormesis 에 대한 초기연구는 주로 자연광물의 방사선을 이용한 것이다. 이들이 용기에 의해 여과되었다면 남아있는 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 핵내수준에서 발생되며 사용된 대부분 X선은 γ 선보다 에너지가 낮다. 1960년대 이전에는 ^{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 X선과 γ 선에 관한 결과들을 정리하였다.

제 2 절 전리방사선의 자극작용

1. Gamma선

방사선중 γ 선은 의학과 농학분야에서 많이 이용되고 있는데 치료에 사용하는 γ 선량은 통상 원자력 직업종사자 (채광, 선광, 성형가공, 병기제조, 원자력발전) 또는 원자력산업관련 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 실시하였다 (117, 124).

방사선 자극작용의 연구에서 적당한 저선량으로 식물을 조사하면 뿌리혹형성과 토양의 질산화작용이 증가하였고, 성장, 번식, 저항성, 생존율등이 저선량 γ 선 조사후에 증가하였으나 고선량에서는 유해하였다. 곡물류와 두류 및 괴경류에서는 저선량의 적정선량으로 조사되었을때 상업적으로 실용적 가치가 있는 수량증가를 가져왔다 (95, 114, 115).

곡물류 종자와 식물체의 방사선조사에 대해 상당한 자극작용이 나타났는

데, 대조구에 비해 120%의 수량증가와 악조건하에서 발아증가와 병에대한 저항성 증가등이 많이 보고되었으며 구소련에서는 방사선 조사를 위하여 이동형 γ 선원이 이용되었다 (117). 수도의 경우 벼종자에 2.0 kR 이하의 방사선조사에서 초장 (129)과 수장 (23) 및 수량 (46, 130) 증가가 보고되었으며, Sheppard와 Evenden (114)은 보리와 밀종자에 저선량 방사선을 조사하여 재배한 식물체의 생육촉진과 수량증가를 보고하였으나 (53, 66, 108) 방사선 조사시 수분함량이 10~13%인 종자 (17)와 조사시 온도가 10~15℃일때 자극 효과가 있으나 20℃에서는 효과가 없었다는 보고도 있으며 (128), Davies (33)는 보리와 밀종자의 방사선 조사시 식물체의 분얼수는 증가하였으나 수량증가는 없었으며, Suess와 Grosse (127)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 질소 (65)와 인산 (75)흡수가 증가되었다는 보고도 있다. 옥수수 종자에 저선량 방사선조사시 종자의 발아율증가 (72)와 식물체의 생육촉진 (12) 및 수량증가 (22)가 보고되었으며, Degner와 Schacht (34)는 옥수수 수량증가는 최적 재배조건하에서 가장 양호하다고 하였고, Berezina와 Riza-Zade (13)는 0.5 kR의 γ 선조사에서 옥수수 초장과 수량 및 단백질, 지방, 전분함량의 증가를 보고하였다. 저선량 방사선조사에 의한 호밀 (76)과 메밀 (118)의 수량증가와 광합성증가 (73)에 대한 결과도 보고되어 있다.

대두의 γ 선 저선량 조사에 의한 자극효과는 숙기단축 (124), 뿌리혹생성 증가 (62) 및 수량증가 (125)등이 보고되어 있으며, Bajescu등 (8)은 300~900 R의 γ 선 조사한 대두종자에서 112%의 생육 촉진효과와 117% pod형성 증가 및 단백질함량이 증가된 결과를 얻었으며, Corbean와 Bajescu (30)는 조사된 종자가 척박한 토양에서 재배될 때 단백질함량이 증가되었으나 비옥한 토양에서는 거의 변화가 없었다고 하였다.

Sparrow와 Christensen (122)의 저선량조사에 대한 감자 연구에 뒤이어 많은 연구자들이 수량증가 효과 및 발아촉진과 휴면기간의 단축으로 한계질

에 1회이상의 수확 가능성을 보여주었다 (21, 127). 감자괴경에 저선량 γ 선 조사시 수량증가와 함께 비타민C 함량 (91)과 역병저항성 (145)증가에 대한 보고도 있다. Metlitskii (92)는 γ 선 저선량은 감자발아를 촉진시키고, 중간선량은 지연시키며, 고선량은 저해한다고 하였으며, 방사선조사후 단시간내에 산소흡입량이 증가되었다가 그후 다시 정상으로 되돌아간다고 하였다. 선량이 크면 클 수록 산소흡입량의 증가가 커지고, 더 길게 유지된다고 하였는데 10 kR 조사후 2일동안 괴경전체와 그 절편에서 호흡량이 대조구에 비해 각각 123%와 128% 증가되었다. 이처럼은 ATP합성을 억제시키고 호흡을 증가시키는 방법으로 핵산대사를 변화시켜 발아를 억제하는 것으로 추정하였다.

채소원예작물에 대한 연구는 상당한 변이를 보여주고 있으나 토마토의 경우는 발아증가와 생육촉진 및 수량증가에 대해 많이 보고되어 있으며 (1, 11, 138), 숙기가 8일정도 단축된 조숙성 (90)도 나타났다. 저선량으로 조사된 토마토 종자의 식물체에서 양분함량의 증가가 많이 보고되어 있는데 탄수화물과 아미노산 (138) 및 caroten함량 (1) 증가이며, Pal (98)은 토마토 종자에 γ 선 0.5~5.0 kR 조사여 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 있으며 (18, 72, 138), Pal등 (99)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 상추 (111), 당근 (18), 고추 (67), 오이 (144) 및 담배 (79)등의 생육촉진과 수량증가등 농업적 가치가 있는 것이 많이 보고되어있다.

γ 선에 조사된 종자에서 생육한 식물의 생육촉진과 성장중대외에도 옥수수 (56), 감자 (144)등에서 감염에 대한 저항력 증대 보고도 있으며, 옥수수 (73)에서의 광합성 증대와 콩과 식물에서 한발에 대한 저항성증가도 보고되어 있다 (109). 방사선 자극작용은 영양분이 부족한 척박한 토양에서 생육된

식물에서 효과적이라고 하였으나 (30, 127), Degner와 Schacht (35)는 옥수수의 경우 최고의 생육조건하에서 더 빠르게 성장함을 보여주었다.

2. X선

식물종자를 적당량의 X선으로 조사하면 발아율증가, 발아촉진, 생육촉진 등의 효과를 가져오나 실험중 조절할 수 없는 많은 변수 때문에 일관된 결과를 얻기가 힘들다. 장비형태, 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 방사선자극의 상업적이용을 어렵게 만들고 있다.

파종된 종자의 방사선 조사는 가끔 성장과 수량을 촉진하여 120~160% 증가된 수량이 몇가지 선량과 수년에 걸친 실험에서 일관된 결과로 보고되어 있다 (76, 95, 115). Gaur와 Joseph (50)는 X선 조사한 보리의 수량 측정에서 선량-반응곡선에 2중 peak를 보고하였고, 치사열량으로 처리한 종자가 뒤이은 X선조사에 의해 소생했다는 흥미로운 보고도 있다 (20).

벼종자에 X선 조사시 발아 (74)와 생육 (106)이 촉진되었으며, Yamada (143)는 X선 조사한 벼종자에서 대조구에 비하여 140%의 수량증가를 보고하였다. 저선량의 X선으로 조사한 보리의 발아와 생육촉진(25), 생육증대(50) 및 수량증가(42)효과가 얻어졌으며 Joseph (71)는 X선조사한 보리종자에서 생육한 식물체에서 단백질 합성이 증가되었다고 하였다. 밀에서도 성장촉진 (108)과 수량증가 (77)가 저선량 X선조사에서 발생하였으며 Kuzin (77)은 X선 조사한 밀이 대조구에 비해 발아력이 증가하였고, 숙기도 10일정도 빨라졌으며 160%정도의 수량증가를 보고하였다. 한편 Grisenko와 Mazhara (56)에 의하면 X선조사한 종자에서 생육한 옥수수가 병에 대한 저항성이 증가하였다.

콩과 식물의 X선조사는 발아력, 생육, 수량증가를 보인 γ 선 조사결과와

비슷하였으며 (16, 49), Weber (140)는 X선조사하여 재배한 콩 식물체의 비타민 C 함량이 자엽에서는 대조구에 비하여 높았으나, 뿌리에서는 낮은 결과를 얻었다. 감자괴경에 대한 X선조사는 수십년 동안 일관되게 방사선 자극효과를 보고하고 있으며 휴면타과 (121), 발아촉진(68), 생육기간 단축 (7), 괴경크기 증대 (69) 및 수량증가 (7, 69) 등의 효과가 인정되고 있으나 Sprague와 Lenz (123)는 X선조사에 의하여 괴경크기는 증대되나 전체수량 증가에는 효과가 없었다고 하였다.

채소종자에 대한 X선 자극실험은 생장기간이 짧은 지역에서 실용화 가능성이 있는데 배추 (77), 무 (44, 76), 상추 (111), 토마토 (136), 당근 (82), 고추 (45)등 발아, 생육, 개화와 숙기촉진 및 수량증가등의 효과가 보고되어 있다.

종자에 저수준 X선을 조사하여 수행한 대부분의 연구결과는 저선량에서는 자극작용이 있고 고선량에서는 유해작용을 한다는 공통된 특성을 보이고 있다. Maldiney와 Thourenin (86) 및 Seckt (113)들이 방사선조사에 의해 종자 발아와 식물체의 생리적 기능이 촉진된다는 초기 연구를 확인한 1900년부터 현재까지 저선량 X선 조사에 의해 종자와 생육중인 식물체에 대한 hormesis반응을 보여주는 일관된 결과들이 계속 보고되고 있다.

생육중인 식물에 방사선을 조사한 초기 관심은 저선량으로 조사된 세포에서 원형질체유동의 증가를 관찰한 세포 생리학자들이 었지만(96), 가장 많은 결과는 생장율에 관한 것이었다. 대부분 연구에서 방사선 조사가 auxin 생성 감소와 재생세포에 장애를 유도하여 줄기의 성장점우세와 활성을 감소시키고 측아의 활성우세가 관찰되었다 (95). 측아생장이 많은 것은 중간선량의 방사선이 조사된 식물에서 나타나는 특성이며 선량이 증가됨에 따라 장애를 받게된다. Christensen (26)과 Gunckel과 Sparrow (59)는 부정근 발생을 관찰하였고, 절경의 발아와 발근증가 및 뿌리 생장증가와 개화촉진등이 감자, 레몬, 카네이션등에서 보고되었다 (51, 121).

X선 조사된 식물이 병에 대해 저항성이 증가되었다는 보고가 있으며(56), 뚝딴지(숨영킵키)의 종양 생성이 암종균 (Agrobacterium tumefaciens) 접종 전에 방사선을 조사하면 억제되는 것으로 나타났다 (70).

제 3 절 방사선 Hormesis의 작용기작

1. Hormesis의 작용특성

유해물질이 미량으로 투여되는 경우는 미세한 변화만이 생겨나기 때문에 다량에 의해 일어날 수 있는 초기 반응만이 관찰될 수 있다. 조절기능이 작용하여 생물체를 통상상태에서 예민상태 또는 회복태세로 전환시켜 자극받지 않은 대조구와는 다르게 환경요인의 변화에 대해 더욱 민감하게 반응하는 것 같다. 통상의 기능은 지연되고 회복과 방어등의 기능을 위해 에너지와 양분이 우선적으로 이용되며 hormetin이 유해량까지 존재하지 않는 경우 생체는 자극상태에 있게 되어 종래 억제되었던 성장, 발육, 방어와 같은 기본적인 생리작용에 자원을 이용하여 자극 이전보다도 유전적 잠재능력을 보다 잘 발휘하게 된다. 예민상태하의 생체는 양분을 보다 효과적으로 이용하고, 성장을 빠르게 하며, 방어반응을 향상시키고, 숙성도 빠르게 하여 보다 효율적으로 번식시키며, 질병이 감소되고 오래 생명이 유지되게 하는 것 같다.

방사선 hormesis에 대한 대부분의 정보는 관찰된 기본적인 현상의 서술로서 작용기작에 대한 체계적인 연구는 거의 없었다. 식물에서는 발아의 증가, 성장과 개화의 촉진 및 초장, 생체중, 수량중대등이 나타났고, 동물에서는 성장촉진, 생식력증대, 조기사망의 감소, 수명연장등이 보고되어 이들 모두가 작용기작의 일부인 것으로 생각되나 전체와 관련된 작용기작을 추측하는 것은 자료가 충분치 않아 미제로 남아 있는 실정이다.

전리방사선의 생체에 대한 일반적인 작용은 널리 알려져 있으나 생체의 복잡성과 발육관계에 따라서 각각 다른 작용을 보일 것이며 홀몬과 신경전달 물질등도 관여할 것으로 생각된다. 방사선 종류는 조사선량이나 흡수선량에 비해 영향이 적은 것으로 보이나 문제가 되는 것은 건조체나 비교적 순수한 용액중에서 극히 고선량 영역에서 일어나는 물리 화학적반응을 복잡한 생리적 조건을 갖춘 생체에 낮은 선량과 선량율의 방사선을 투여한 경우와 동일하게 취급하는 것이다. 또한 치사선량을 이용한 고전적인 연구결과는 동

일한 환경조건하에서 저선량으로 수행한 결과와는 상당히 다른 양상을 보여주었다.

지구상의 모든 생명체가 방사선 환경중에서 발생해서 진화하였다는 사실은 방사선이 생명현상유지에 필요 불가결한 것이며, 어떤 유리기, 이온 및 여기된 분자가 어떤 종류의 분자나 생화학적경로에 효과적으로 이용될 가능성을 나타낸다. 전리방사선의 영향을 받은 분자는 에너지 준위가 상승되고 어떤 종류의 분자는 다른 것보다 특이적인 반응성을 가지며 활성화된 분자는 다른 분자보다 훨씬 쉽게 반응하는 것도 있다. 예를들면 phenol의 유리기는 산화환원반응에서 기능성이 높아지지만, carotene 유리기는 생물학적으로 불활성화되고, 전리방사선에 반응성이 낮은 다당류를 많이 가진 식물은 동물에 비해 방사선에 대한 감수성이 낮다. 극저선량의 반응과 치사선량의 반응이 분명히 다르지만 혼합되어 있어 구별하기가 힘들고 하나의 복합적인 선량-반응곡선을 형성하며 저선량이나 고선량을 사용한 순수반응은 반대로 나타나지만 이들은 같은 반응의 한 부분일 것이며 관찰한 사람에 따라서 유해 반응 또는 자극반응으로 구별할 것이다.

생체의 초기반응은 유해물질의 량에 관계없이 유사하지만 과도한 자극물질에 의한 장애는 초기반응이 나타나지 않을 수도 있어 저선량에서만 장애세포의 복잡한 반응없이 생체의 초기반응을 명확하게 관찰할 수 있다. 저선량방사선에 의한 일반적인 반응은 소량의 항생물질이나 다른 유해물질의 처리후에 관찰 또는 예상되는 반응과 매우 유사하며 원생동물에서 포유류까지 각종 생물체가 관련되어 있으므로 hormesis는 생물일반의 반응으로 생각할 수 있고 방사선 hormesis의 작용기작도 일반적인 생물학적법칙에 따라 추정할 수 있을 것이다. Hormetin의 종류, 즉 물리적, 화학적, 생물학적 자극물질에 따른 각각 고유의 장애는 다를지라도 생물체에 예정된 반응은 한정되어 있다. Hormetin에 따라 생체에 다른 반응을 일으키지만 그이후는 공통적인 지각반응계통으로 발달된 생화학적, 생리학적 기능에 의해서 감지되고 처리될 것이다. 이들 계통은 생체가 복잡하게 됨에 따라 정교하게 되지만 진화론적 계통발생에 수반해서 원생동물에서 포유류까지 상호관련되어 있는

연속된 공통기구가 존재할 것이므로 한 생체의 어떤 hormetin에 대한 정보는 다른 생체의 지침에 도움이 될 것이다. 많은 연구결과는 방사선 hormesis의 영향은 다른 잠재적인 유해물질의 소량에 의한 영향과 유사하다는 것을 보여주고 있으며 (84, 116), 이것은 초기 연구자들의 공통된 정설, 즉 “소량의 독극물은 자극제이다 (small doses of poison are stimulants)”의 재론인 것이다 (60, 61, 112)

2. 생화학적 기작

1) 회복기능

작은 상처에 대한 반응과 회복현상에 의해 조직은 상처받기전 보다도 현재 환경에 대해 보다 강해지고, 보다 잘 적응한다는 Bernard (14)와 Weigert (141)의 주장이래 이 개념은 계속되고 있다 (52, 97). DNA의 방사선장해에 대한 회복기능은 광범위하게 검토되고 있으나 (57, 77), 대부분의 회복기능에 대한 연구는 고선량 방사선으로 수행하였다. 가벼운 상처가 회복기능을 활성화하여 과잉보상에 의해 성장, 발육, 숙성, 생산등의 반응을 가속화 하는 것으로 추정된다.

저선량의 방사선은 간접작용과 직접작용에 의해 회복가능한 장해를 일으키는데 간접작용이 특히 많은 것 같다 (119, 그림3). 간접작용의 증거로 Amminato와 Steward (4)가 방사선 조사된 서당용액을 당근 배양배지에 첨가하면 분화, 발육이 촉진되었으나 비조사용액은 효과가 없었고, 자극효과는 1세대이상 계속되었다고 하며 비슷한 결과가 Kuzin등(78, 80)과 Zelles (146)에 의해 보고되었다.

Comorosan등 (29)은 저선량 방사선의 자극효과는 효소계의 활성화에 의한 것이라고 하였고, Maltseva와 Kuzin (87)은 대두의 싹초에 저선량 γ 선을 조사하면 분열조직의 단백질함량이 증대되나 histone함량에는 변화가 없었다고 하였다. 단백질합성과 RNA함량이 증가되었다는 보고 (77)와 몇가지 식물에서는 1KR이하의 γ 선조사는 RNA함량이 감소하고 DNA합성은 증가되나

10KR이상의 고선량에서는 RNA함량이 증가되었다는 보고도 있다 (137).

방사선조사로 인한 단순한 DNA손상은 ①자외선에 의한 광회복 ②장해지점의 효소적제거와 손상되지 않은 nucleotide에 의한 치환 ③복제시 손상지점의 우회와 발생된 틈새의 효소적회복등에 의해서 회복될 것이다. Mandel과 Chambon (88)은 방사선조사에 의한 nucleotide 증가는 nucleotide 생합성효소가 핵산 합성효소 보다 감수성이 낮기 때문이며 그 결과 조직중의 nucleotide의 과잉과 이에 따른 총핵산 함량의 일시적인 감소가 일어나고 이로 인해 조직의 RNA와 DNA함량이 결국 대조구에 비해 3-4배 증가된다고 하였다.

Zelles (146)는 소나무 화분관의 성장에는 3단계가 있음을 발견하였다. 방사선이나 항생물질 어느쪽도 초기발생기인 제1단계에서는 변화를 일으키지 않으며 이것은 전단계에서 생성된 RNA를 이용하여 단백질을 합성하는 발아기이다. 제2단계에서의 생장은 DNA합성을 억제하는 actidione과 복제과정에서 단백질합성을 저해하는 puromycin에 의해서 저해되었다. 제3단계에서의 생장은 전사를 방해하는 actinomycin에 의해 중지되었다. 방사선 hormesis는 제3단계에서만 관찰되며 제2단계에서 새로운 RNA와 단백질이 합성될 때만이 일어났다. 조사된 화분에서의 추출물을 발아중인 화분에 첨가하면 그 효과는 방사선조사시의 화분의 성장단계에 따라서 달랐다. 제1, 제2단계 화

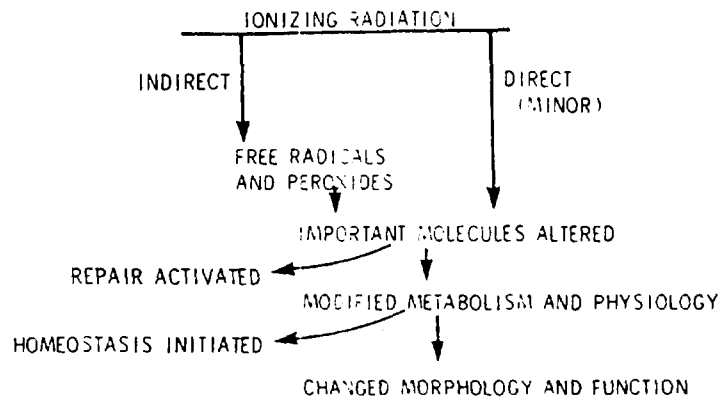


Fig. 3. Direct and indirect effects from ionizing radiation.

분막에서의 수용성 추출물은 억제작용을 나타냈으나 제3단계의 추출물은 자극작용을 보였다. 건조한 추출물을 조사하면 이들의 억제효과가 감소하였고 자극작용은 촉진되었다. 활성이 있는 세포벽 추출물에는 lysine 과 hydroxy proline이 많았다. 여러 가지 저분자 물질에 대해서 자극작용의 활성을 검색해 본 결과, hydroxy proline이 가장좋은 결과를 주었으며, serine, alanine, threonine, glycine, valine등이 효과적이었으나 lysine은 생장을 억제하였고 다른 아미노산은 효과가 거의 없었다. 발아된 화분의 세포벽에서 발아하지 않은 화분의 6배정도로 hydroxy proline이 함유되어 있었고, 화분의 방사선 조사는 대조구에 비해 hydroxy proline 함량을 123%~129%까지 증가시켰다. 3단계 성장단계의 실험에서 새로운 RNA합성이 영향 받는 것을 일관되게 보여주었다.

2) Hormone작용

저선량의 방사선은 식물체의 auxin 함량을 감소시키며, indole acetic acid의 첨가는 고선량 방사선의 생장 억제작용을 감소시킨다고 Gordon (54)이 보고하였다. Glubrecht (51)는 자극작용은 새로운 물질의 형성에 의해 시작되는 것이 아니고 제어물질의 분해나 억제에 의해서 시작된다고 하였다. 분열조직 세포에 대한 방사선장해가 비분열 세포의 발육을 활성화시켜 새로운 성장점을 재형성하여 발육시키는 것도 관찰되었으며 (28), 조사된 식물에서 측지의 증가는 단순히 정아의 생장지연이나 정아우세가 감소된 결과인 것으로 나타났다 (110).

방사선 hormesis의 주효과는 초기발육에 있는 것으로 생각한 Kuzin (78)은 특정과 불특정 유기인자에 의해서 발육과정의 전이가 일어난다고 하였으며, Gudkov (58)는 땅콩과 옥수수 종자의 세포주기가 각각 17.4시간과 13.8시간에서 13.6시간과 10.4시간으로 단축되는 것을 보여주었다.

3) 독소 생성

독소설은 방사선 hormesis가 간접적인 작용에 의해서 일어남을 의미하며

방사선 조사에 의해서 하나 또는 그 이상의 화합물이 변화해서 조직에 작용하여 분화와 발육을 촉진한다는 것이다. Duryee (37)는 세포핵이 세포질에서 적출되면 방사선조사에 대해 훨씬 저항성이었으며, 조사된 세포질 10^{-4} ml을 세포에 주입하면 방사선 중독증상을 보인다고 하였다. 식물의 생장점부근을 방사선조사하고 직후에 절단하여 보면 변화가 없으나 4시간후에 절단하여 보면 억제작용을 가진 물질의 이동을 나타낸다 (77). 그후에 Kuzin등 (78, 80)은 유사분열을 억제하는 quinoid화합물을 분리하였는데 이에 tyrosine semiquinone 또는 histamine이 함유되어 있었다. 조사된 감자에서 분리된 독소는 소량에서 자극작용이 있었고, 조사된 감자의 추출물은 비조사 감자의 같은 추출물 보다 20배 높은 돌연변이 유기능력을 보여주었다 (81). 조사된 대두에서 분리된 비슷한 인자 (FV)는 동일한 활성을 가지고 있었으며 산화물이나 과산화물일 것으로 추측되었다 (63).

4) 다른 생화학적요소

다른 생화학적변화로써 식물의 생장을 억제하는 방사선량인 X선 $10\sim 50$ kR을 조사한 해바라기 종자에서 lipoxidase의 활성증가가 보고되었으며 (129), Barakat등 (10)은 방사선 조사가 비타민 C 합성을 억제하고, 분해를 촉진한다고 하였다. X선 조사한 대두의 종자에서 유기된 식물은 대조구보다 식물상부에 비타민 C가 많았고 뿌리 선단부는 더 적었다 (140).

Ehrenberg등 (39)은 세포의 방사선자극에 대한 생화학적 작용기작을 제안하였는데, 종자에 방사선 조사후 초기의 호흡증가는 세균이나 효모에 산소를 첨가할 때 보여주는 glucose 섭취량의 감소, 즉 pasteur 효과에 상응하는 것으로 보았다. 이것이 pentose 합성을 제한하고 그 결과 hexose monophosphate에 의한 합성이 불충분하여 ribose-5-phosphate에서의 RNA 합성이 억제된다는 것이다.

3. 작용기작의 가설

방사선 hormosis 작용의 생화학적기작에 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 Seibold (147)에 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 않은 생물체에 비해서 보다 효율적으로 활동이 진행되는 쪽으로 변화가 일어난다는 것이다.

방사선 hormosis에 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 이상한 화합물, 즉 방사선 독성물질로 변하게 한다. 둘째 문턱선량의 초기반응이 일어나는 경우, 자기조절 기능이 작동하여 생물체는 우선적으로 대사경로를 바꾸어 적응하게 된다. 예를들면 과잉의 양자는 SH화합물에 의해 제거될 수 있고 RSH/RSSR 비율의 변화는 새로운 세포내 환경을 형성한다. 셋째는 변화된 내부환경이 조절기능을 변화시켜서 새로운 mRNA의 증가, 효소합성의 변화, hormone 균형의 변동, 세포간 인자또는 환경인자에 대한 감수성 증대등으로 나타나게 한다. 기능에 대해서는 증가하는 것도 있고, 감소하는 것도 있을 것이고 호흡의 증가와 에너지의 재분배는 필연적으로 일어날 것이다. 넷째는 자원이용의 우선순위가 변해서 회복, 발육촉진, 성장가속, 혹은 기타 측정이 곤란한 미세한 변화가 우선 순위로 될 것이며 저항력 증가와 수명연장은 발생초기에 기대되는 변화의 결과일지도 모른다. 다섯째는 변화된 개체는 최적 조건 이하의 상태에 대해서 더욱 강하게 되어 효율과 활력의 증가를 보여준다. 앞에서 보고된 방사선 자극작용의 생리적 변화 대부분은 위에 열거한 작

용기작의 공통점을 하나 이상씩 관계되어있다. 생물체는 DNA, RNA, 단백질 합성, hormone, 신경 전달물질, 대사 조절인자 및 특이한 분자등이 통합되어 매우 복잡하므로 방사선 hormesis의 작용기작의 각각을 하나의 특이한 이론으로서 해결하는 것은 매우 어려운 문제일 것으로 생각된다.

제 4 절 방사선 Hormesis 전망과 이용

1. 연구전망

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 석탄연소, 가스연소 및 석유연소 시설등이 포함되는데 이들 에너지원의 해결과 합리적 관리가 인류 기술사회의 발전을 결정한다고 할 수 있다. 대부분 사람들에게 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.

생체의 대사중인 조직에는 물이 중량으로서 약 70%, 분자수로서 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.

전리방사선은 다른 오염물질보다 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 농업관련분야에서 유의할 가능성이 있고 돌연변이의 대부분은 미래의 자손에 유전자 및 표현형에 이상을 가져온다. 고선량의 전리방사선은 세포의 액화 및 사멸을 가져오며 증식중의 세포, 특히 유사분열시의 DNA 손상은 회복할 시간이 없기 때문에 감수성이 가장 높다.

방사선 장해에 관한 우리들의 지식은 저선량율과 저·중선량 피폭에 대한 정보가 부족하여 고선량 급성 피폭에 관한 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 만성피폭 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 hormosis의 증거에 의해 타당치 않다는 것을 보여주는 것도 무시하고 있다.

저선량 전리방사선의 피폭효과는 hormesis의 일반적인 개념, 즉 유해작용을 가진 작용물질의 유해량이하의 투여는 생물체를 자극한다는 법칙과 일치한다. 생물체는 최적이하의 상태에 있게되면 자극은 그 상태에서의 생물체의 반응을 변화시켜 적극적으로 대응케한다. Hormesis는 많은 관련 개념을 포함하고 있는데 그중 하나가 질병과 유사한 반응을 가진 약품에는 치료효과가 있다는 것과 질병은 병에 대한 길항 약에 의해서 치료된다는 Hippocrates의 제 1, 제2원리이며 이것은 Hahnemann에 의해 치료는 주로 환자의 반응변화에 의한다는 개념으로 발전되었다. Bernard (14)는 치료가능한 외부 상처의 치유후에는 상처전 보다도 조직이 강하게 된다고 보고 하였다. 약물의 이 보편적인 성질은 Schultz (112), Weber (139), Richet (102) 및 Maximov (89)등에 의해서도 보고되었다.

Hormesis의 일반적 성질은 약리학, 독물학, 영양학 및 방사선의학에서 잘 알려져 있는 사실인데 그 예측 실험에는 ①항생물질로 처리된 세균의 효소유기 ②저수준의 항생물질을 투여한 지렁이의 가열저항성 ③저수준의 살충제 투여한 곤충의 성장증가 ④유기·무기자극제를 투여한 병아리의 활동개선 ⑤유해이하 선량의 γ 선을 조사한 세균포자의 성장증대 ⑥저선량 X선에 피폭된 쥐의 성장가속등이 포함되어 있다.

Hormesis에서 가장 중요한 점은 소량의 유해작용물질은 다량의 같은 물질이 보여주는 영향과는 정반대의 반응을 보여주는 것이다. 자극작용과 유해작용의 전환점은 표준상태에서 적절한 실험계획에 의해 확정될 수 있는데 이 선량-반응곡선의 전환점은 생리학적으로는 영점(zero)에 가까운 것(ZEP)이고, 분명한 문턱선량 값도 보여준다 (그림4). 특정한 조건하에서는 이 문턱값은 이론적으로도, 실제적으로도 매우 중요하며, 어떤 측정가능한 생리적 기능에 대해서 정의할 수 있고, 안전기준 확정에 의해서도 고려사항이 될 수 있다.

방사선 hormesis에 대한 많은 실험결과는 전리방사선의 종류에 상관없이 거의 비슷한 생물학적 영향을 보여주며 계통발생을 통해서 생물은 저선량의 전리방사선에 의해 자극받아 발아, 출아, 성장과 발육의 촉진, 수량 구성요소의 증가등이 식물에서 관찰되었고 호흡, 한발, 뿌리혹 형성, 분지, 개화, 결실 및 영양생산등에서도 고유한 특성이 나타나며, 특이한 점은 저선량의 전리방

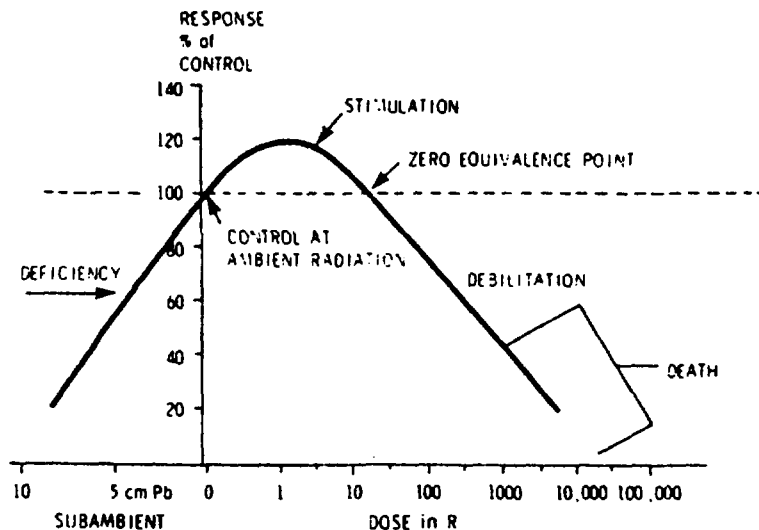


Fig. 4. Complete dose-reponse curve for ionizing radiation.

사선에 의한 피폭은 그 이후의 고선량 방사선에 대해서 저항력을 증가시킨다는 것이다. 많은 작용기작이 hormesis에 관련되어 있을 것이나 회복가능의 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 것인데 Zelles (146)가 보고한 DNA 의존성 RNA 합성의 전사경우에만 일어나는 소나무 화분에서의 단백질 합성의 활성화가 그 한 예인데, 이것은 특이한 자극물질이 저선량 조사후에 생성되거나 방출되었다는 결과들과 일치하는 것이다.

전리방사선에 의해 생성된 이온, radical 및 특이분자들은 산소존재시에는 더욱 복잡해져서 과산화물, hydro peroxides 및 여러가지 산화분자가 생성되는데 이들 속에는 비교적 유독한 화합물질도 포함될 것이다. Kuzin등 (78, 80)은 전리방사선의 특유의 독소로서 여러가지 quinone 또는 과산화물을 들고 있는데 아마 이들 물질은 저농도에서 자극작용을 나타낼 것이다. 보고되어 있는 방사선 hormesis에 관한 다른 생화학적 요소에는 당질대사, 광합성, 영양소 농도, 산화적 인산화 반응 및 효소활성의 변화등이 있으나 증거가 확실치 않으며 작용기작에 관계없이 방사선 자극작용이 hormesis 일반법칙과 일치한다는 점에서 이의 이해와 응용을 위해 통일된 이론적 근거를 제공하는 것이 가능할 것이다.

2. 응용

방사선 hormesis 원리는 자연환경의 이해, 식물생산성 향상, 식품관리, 치료 및 건강유지의 분야에서 이용할 수 있을 것이며, hormesis를 선량-반응 곡선의 필연의 구성성분으로 인식하는 것은 환경-생물체간의 중요한 상호작용을 이해하는 것이다. 작용물질에 단순히 선악의 표지를 붙이는 것은 진리를 외면하고, 대량으로 투여하면 해가되는 작용물질의 수용과 적절한 이용을 지연시키는 것이다.

방사선은 일종의 hormetin이다. 물리적, 화학적, 생물학적 작용물질은 일정 용량에서 그에 상응하는 반응이 생길 것이며, 용량이 상호친화적이라면 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 상관이 있을 것인데 자연계에 존재하는 작용물질의 농도변화로 일어나는 hormesis 개념을 도입한다면 종래 설명할 수 없었던 많은 현상에 대한 이해에 도움이 될 것이다.

방사선 hormesis개념을 이해하게 되면 전리방사선의 미세선량 영역까지의 이용연구에 도움이 될 것이며, 자극 작용선량이 발견되었다면 동일 조건을 사용해서 hormesis 선량 부근의 적당한 선량점에서 실험을 수행하여 최소 선량의 반응을 확인하는 선량-반응곡선의 특성을 확정하여야 한다. 약간의 실험조건 변화가 선량-반응곡선의 hormesis 위치와 특성을 크게 변화시킬 가능성이 있는데 고려해야 할 중요인자는 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.

환경중에는 hormesis 선량에 해당되는 만성피폭을 투여하고 있는 경우도 있는데 Nive 고산주민은 이 조건하에 있는 것으로 추측되며, 고선량 방사선이 Georgia의 Caucasus 산악지대, Himalaya의 Hunza지역, Andes의 Vilcamba지역에 거주하는 사람들의 장수에 기여하는 원인이라고 추측하였다 (84). 중앙 그루지아의 Arabia산의 화강암은 고농도의 방사성핵종을 함유하고 있으며, 이것이 우주방사선이 Andes나 Himalaya보다 적은 이 지역의 환경방사선을 증가시키는 한 요인이라고 하였다.

실용적인 방사선 조사방법이 확립된다면 인간사회에 방사선 hormesis는 유익한 역할을 수행할 것으로 기대되며 가장 먼저 이용될 수 있는 분야는 다양한 요구를 충족키위한 작물생산을 증가시키기 위해 종자나 식물에 방사선조사일 것인데, 대규모 실험이 소련과 동구에서 수행되었다. 원자로의 사

용후 핵연료가 적당한 방사선원으로 이용될 수 있는데 이는 가장 값싸고 만족스러운 hormetin이 사용될 수 있음을 나타낸다.

방사선 hormesis에서 식물, 동물 및 일반 공중보건을 위한 안전 피폭한계는 ZEP, 즉 선량-반응곡선의 전이점, 영 상동점에 의해 나타난다. ZEP는 환경방사선과 동일한 결과를 주는 최대선량이며 조건, 연구된 지표 및 개체에 따라서 다를 것이다. 식물의 경우 일반인들에 비해 엄격한 관리는 요구되지 않으나 각 지표마다 가중치를 부여하고 이에 따른 각 집단마다 표준치가 제공되어야 할 것이며 이에 의해 허용될수 있는 문턱치와 안전평가를 위한 최대피폭한도가 결정될 것이다.

3. 돌연변이와의 관계

방사선 hormesis 효과가 돌연변이 결과일 가능성은 몇가지 이유때문에 부적합하다. 즉 돌연변이 효과는 대부분 균일하지 않으며 장해가 유발된다. 유발돌연변이에서는 균일한 반응이 일어나지 않고 조사된 수천 개 중에서 1개체만이 작물생산에서 유용한 것으로 기대된다. 방사선hormesis에 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 첫세대에서 나타나지 않으나 방사선 자극효과는 조사된 개체에서 일어나고, 대체로 다음 세대에서는 나타나지 않는다. 원생동물과 단순환 식물에서 효과가 몇세대 걸쳐 나타나는 보고도 있으나 지속성은 없다.

4. 실용화의 문제

방사선 hormesis에 관한 많은 연구결과가 발표되었으나 좀 더 집중적으로 탐구되지 않고, 실제적으로 이용되지 못하고 있는 것에는 몇가지 이유가 있는데 다음과 같다.

① hormesis에 대한 결과는 대부분 연구자들에게 예기치 못한 돌발적인 발견이었다. 즉 수명연장과 같은 방사선 자극작용은 많은 사람들이 논의하였으나 일부 생물학자들에게는 알려져 있지 않으며 이상한 결과들로 인식되어 왔다.

저선량방사선에 의한 식물의 자극작용은 장애의 일부로 생각했다. Weigert (141)는 재생되는 조직은 상처 받기전의 상태에서 필요로 하는 것보다 더 많은 물질을 생성한다고 하였고, Clark (27)는 방사선에 의한 세포분열 촉진작용을 광범위하게 검토하여 비판적인 결과를 발표하였다. Read (101)는 실험자료에서 자극작용을 보여주고 있는데도 무시하였다. 그러나 이제는 최적이하의 조건하에서 선량-반응곡선의 더 낮은 부분을 연구한 많은 연구자들에 의해서 방사선 자극작용이 더이상 기대하지 않은 돌발 결과라고 생각할 수 없게 되었다.

② 방사선 hormesis의 특이한 사례는 극단적인 변이인 것으로 받아들이고 있으며 각각 실시된 실험에서 하나는 높고, 하나는 낮은 값을 제공하므로 자극작용을 확인할 알맞는 기준이 없다는 것이다.

어떠한 실험에서도 변이는 예상되며 전체에서 통상 2-5%가 특정치를 나타낸다. 저선량으로 제한된 실험의 수행에서 3번중 2번만 자극작용을 보여도 재현성이 없는 우연한 결과로 확신하게 만드나 각기 다른 지역과 사람들에 의한 일관성있는 결과를 간과해선 안될 것이다. 일관성은 3가지 방법으로 보여주는데 ① 같은 선량이나 다른 선량에서 보여주는 자료로 결과 확인 ② 다른 시기에 같은 실험실에서의 재현성 ③ 다른 실험실간의 결과의 재현성이다. 방사선 자극작용에 대한 가장 재현성있는 연구는 딸기 뿌리줄기 증식 실험을 수행한 Hannover 기술대학 방사선 식물학 연구팀의 연구결과이다 (43). Kuzin (76)의 X선 조사한 호밀에서도 재현성있는 비슷한 결과가 얻어졌다. Degner (36)등은 γ 선 200R를 조사한 옥수수 종자의 대규모 재배에서 생육, 가뭄내성, 전분함량, 단백질 농도 증가를 보고하였고 3년간의 수량 조사 결과 대조구 100%에 비해 1년차 - 151%, 2년차 - 116%, 3년차 - 155%로

일관되게 종실수량 증가를 보여주었다.

③ 완전한 선량-반응곡선을 나타내는 경우가 드물다.

“이상한 결과를 보여준다”는 저선량 영역까지의 연구를 거의 하지 않았기 때문이나 hormesis 선량영역에서 일관된 결과들이 많은 연구자들에 의해 보고되었다. 특히 Davey (32)와 Lorenz 등 (83)은 hormesis 선량영역과 장해영역 양쪽, 즉 ZEP를 보여주는 결과를 발표하였는데 완전한 선량-반응곡선이 hormesis 영역까지 확립되면 hormesis형이 증명될 것이다.

④ 발표된 자료에서 볼 때 방사선 hormesis를 인정하는 것은 타당성이 있으나, 다른 형태의 선량-반응곡선이 존재하는 것은 선량-반응관계를 더욱 복잡하게 하는 요인이 될 수 있다.

3가지 형태(β, γ, δ)의 hormesis반응이 이론적 곡선으로 제기되고 있으며 3가지중 하나만으로 모든 결과들을 설명하기는 확실히 불안하다. β 곡선이 가장 단순한 hormetin 응답 model로서 이용되며, γ 와 δ 곡선은 조직적으로 연구되지 않고 변동도 심하다. 이 응답의 다양함과 표준화 결핍이 실험결과의 변동을 크게하고 방사선 hormesis 개념 수용을 지연시키고 있다.

⑤ 실험수행시 개체수가 적은 것과 통계적으로 평가가 불충분한 것 그리고 차이가 있으나 정서적으로 무시하는 것등이 hormesis결과에 대한 불신감으로 실제 존재하고 있다.

초기 연구의 대부분은 개체수가 적었고, 전체 증가량은 대조구에서 나타나는 평균 편차보다도 대체로 적었으며, 통계처리가 통상 행해지지 않았고 가끔 보여주는 일관된 재현성은 무시되었다. Johnson (69)은 X선조사하여 수행한 실험에서 시험한 70개 식물종중 11개종이 초장이나 가지수에서 증가를 보여주었으나 식물종의 특성에 따라 분리처리하지 않고 평균치로 일괄 처리하여 자극작용을 무시하였다. 언어와 거리상의 제한 또한 동구권등의 실험을 인식하는데 방해가 되었으나 많은 연구자들의 노력과 통신수단의 발달로 정

보고류가 가능해져 변수조절과 반복 실험에 의해 방사선 hormesis의 확실한 증거들이 많이 제공되었다.

⑥ 규칙적으로 일어나지 않는 저선량효과를 무시한 자료의 일괄 처리가 방사선 hormesis를 수용하지 않는 이유의 하나이다.

Alexander (3)는 미국 농업시험장의 다양한 RI 비료로 수행한 실험에서 생육촉진 또는 수량증가가 선량에 따라 차이가 있었고 46개 실험중 17개에서 증가가 있어 실험의 37%에서 방사선 hormesis가 인정되었으나 모든 실험치의 평균치가 대조구와 비슷함을 보여주기 위해 모든 결과를 일괄처리하였다. 이러한 인식이 답습되어 통계적으로 유효한 자극작용도 무시되어 왔는데 (69, 111), 선량-반응곡선의 관계에서 보면 이와같이 자료의 일괄처리는 정당화 될 수 없음을 보여준다.

⑦ 집중연구되어 장애를 일으키는 고선량과 고선량율에서의 추정은 hormesis에 어떤 암시도 줄 수 없다.

고선량과 고선량율의 자료에서 영점까지의 선량-반응곡선의 추정은 대중적인 목적으로 방사선 자료를 단순화하게 만들었다. 저선량에서 변칙적인 복잡한 반응을 연구하거나 설명하는 것보다는 무시하는 것이 더욱 쉬울 것이기 때문이다. 방사선 hormesis는 조건의 다양한 변이 때문에 명확하게 정의하고 확증할 수 없지만, 문턱선량치가 존재함을 보여준다. 방사선 유해론을 반전시킨 증거는 Frigerio (48)등이 장기적으로 저선량 방사선의 피폭은 방사선에 의해 유발되기 쉬운 악성종양인 백혈병을 포함하여 악성종양에 의한 사망율을 감소시킨다는 보고와 Hiroshima와 Nagasaki에서 110~120R 피폭된 사람들이 이 이하로 피폭된 사람들보다도 수명이 연장되었다는 보고 (133)에 의해 입증되었다.

⑧ 표준화와 적절한 대조군의 부족

다양한 변수는 반복실험을 불확실하게 하므로 변수와 표준화 문제는 항상

물질 hormesis보다도 방사선 hormesis에서 더 중요하다고 할 수 있다. 식이 성 항생물질의 섭취시 변수는 작용기작의 완전한 이해없이 특정결과를 위해 투여하는 공적적인 수단으로서 배제되어 왔다.

방사선 hormesis의 체계적인 연구와 실용적인 이용을 위해 고려해야할 요소들은 표1에서 보듯이 방사선 hormesis의 복잡성을 설명해주며, 특정효과를 얻기 위해서 철저한 연구가 수행된다면 이들 변수는 선별될 수 있고 표준조건도 확립될 수 있을 것이다. 고려된 변수중 계통과 개체의 감수성, 방사선 종류, 선량, 선량율, 에너지전이와 환경인자등이 중요하며, 방사선 감수성은 조사되는 식물개체의 발육단계 즉 발생 단계에서 부터 숙기에 따라 감수성이 감소해간다. 즉 발생중의 배 > 신초 >유묘 > 성숙 > 노화순이다. 발아 중인 종자는 감수성이 특히 높은 반면건조 종자는 비교적 감수성이 낮은데 Bhattacharya와 Joshi (15)는 수분함량이 4%와 15%인 종자에서는 자극효과가 나타나지 않았으나 8%에서는 상당한 자극 효과가 있었다고 보고하였고, Zelles등 (148)은 자극작용이 선량/선량율 비율에 따라서 다름을 확인하였다. 식물의 생리적 상태와 영양상태도 매우 중요한데 약하고, 병들고 영양이 불량한 개체에서는 방사선 hormesis에 의한 생육개선이 기대되나 최적조건에 가까운 생육상태인 건강하고 강한 개체에서는 생육개선은 기대할 수 없는 것 같다 (113).

⑨ hormesis의 포괄적인 이해와 실용화를 위한 이론적기반과 작용기작의 해명이 부족하다.

이론적근거가 부족하기 때문에 많은 연구결과들이 바람속의 마초처럼 흐트러져 있었으나 이제는 방사선 hormesis의 작용영역, 실용성, 작용기작, 기능 등에 관한 진지하고 체계적인 연구를 정당화하기 위하여 많은 자료들이 발표되고 있다. 초기에 돌출된, 변칙적인 결과로 인식한 연구자들의 단편적인 지식에서 벗어나 대량의 자료들은 공통된 인식과 방사선 hormesis를 일반적인 hormesis 명제의 한 분야로서 확신하게 하는 기반을 제공하였다.

Table 1. Variables in Radiation hormmesis

I. Exogenous factors

A. Radiologic

1. Radiation type.
2. Energy or LET
3. Radiation dose
4. Exposure rate
5. Exposure duration
6. Source, external or internal, point, or diffuse
7. Penetration, depth
8. Shielding

B. Environment

1. Oxygen
2. Temperature
3. Relative humidity (air), water content (soil), salt content (water)
4. Electromagnetic flux (nonionizing)
5. Biologic associations
6. Nutrients and organic materials
7. Diurnal status
8. Air contents and exchange
9. Altitude (air), density (soil)

II. Endogenous factors

A. Morphologic

1. Tissue or cell types exposed
2. Development stage
3. Density
4. Area exposed

B. Cytologic

1. Chromosome number and ploidy
2. Nucleus and chromosome size
3. Genotype
4. Stage of cell cycle during exposure
5. Percent of cells reproducing

C. Physiologic

1. Species susceptibility
2. Age and maturation of individual
3. Hormetins presented
4. Nutrient supply
5. Waste removal
6. Stress factors, before, present, after
7. Repair capability
8. Disease status
9. Previous radiation

D. Biochemical

1. Water content
2. DNA content
3. Hormone control
4. Heavy metal content
5. Reducing compounds
6. RSH/RSSR ratio
7. Oxygen and peroxide concentration

제 4 장 결 론

전리방사선의 자극작용에 관한 많은 연구결과는 방사선 hormesis가 hormesis 일반원리에 일치하는 개념임을 확인시켜주었다. 전리방사선은 저선량으로 피폭될 경우 일반적으로 자극작용을 나타내며 hormesis를 일으키는 선량은 대상, 조건, 측정하는 생리적기능, 선량을 및 선량에 따라 다르다. 생리적기능감퇴, 방사선 중후군 및 사망을 가져오는 고선량 방사선에 대한 고전적인 연구에서는 예측할 수 없는 방사선 hormesis 선량은 발육의 촉진, 질병 및 조사후 방사선에 대한 저항력 상승, 생식능력의 증대 및 수명연장등을 가져온다.

방사선 hormesis는 기존의 유해선량에서 영점까지의 직선적 외삽의 부당성을 지적하며 저선량영역에서 선량에 비례하여 유해한 영향을 준다는 논리에는 근거가 없다. 방사선 hormesis는 측정하는 식물특성 대부분에 분명한 문턱선량이 있음을 나타내며 ZEP가 그 한계선량이고 이 선량 이하에서는 중대한 장애가 나타나지 않는다. 문턱선량의 개념은 방사선이 저선량인 경우에는 일반적으로 생각하는 것보다 위험이 적다는 것을 의미하며 환경보다도 다소 높은 선량에 의한 만성조사는 식물과 동물에 유익하다는 것이나 일관된 결과를 얻기 위해서는 관여하는 변수에 대해 표준화가 되어야 할 것이다.

방사선 hormesis는 식물뿐만 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.

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 hormesis는 인간의 과학기술 사회에 유용한 도구로서 전리방사선을

적절하게 이용할 수 있는 기반을 제공하며, 자원의 보다 효과적인 이용, 야채와 식량의 최대한 생산 및 건강증진과 수명연장을 가능하게 할 것이다. 자연자원의 효율적인 이용을 위해서 방사선 hormesis의 실용적인 응용과 연구에 대해서 한층 지원할 필요가 있겠다.

참 고 문 헌

1. Abdullaev, M. A. and Berezina, N. M., Radiostimulating effect in γ irradiated tomato seedings. Dokl. Akad. Nauk Az. SSR, 24, 38, 1968.
2. Adams, F., The Genuine Works of Hippocrates. Williams & Wilkins, Baltimore, 1939.
3. Alexander, L. T., Radioactive materials as plant stimulants, field results, Agron. J., 42, 252, 1950.
4. Amminato, P. V. and Steward, F. C., Indirect effects of irradiation: morphogenetic effect of irradiated sucrose, Dev. Biol., 19, 87, 1969.
5. Atakuziev, S., Comparative study of the effects of ionizing radiation and chemical mutagens on the cotton plant, Dokl. Akad. Nauk Uzb. SSR, 5, 50, 1971; NSA 27:12297.
6. Atkinson, G. F., Report upon some preliminary experiments with the Rontgen rays on plants, Science, 7, 7, 1898.
7. Avakyan, T. M., Semerdzhyan, S. P., and Atayan, R. R., Results concerning the removal of newly gathered potato tubers for the dormant stage, Radiobiology(USSR), 4, 463, 1964; NSA 18: 33376.
8. Bajescu et al., Taken from Stan and Jinga(1968).
9. Baldwin, W. F., Simklarities in Killing by heat and by X radiation in the insect *Dahlbominus fuscipennis* (Zett), Radiat. Res., 5, 46, 1956.
10. Barakat, M. Z., Abdel-Wahayb, M. F., and Megahed, Y. M., Variations in ascorbic acid content of Gramineae during germination and the effect of β and γ radiations, J. Sci. Food Agric., 17, 205, 1966.
11. Bebawi, F. F., Effects of gamma irradiation on *Sorghum bicolorstriga hermonthica* relation, Environm. and Exper. Botany, 24, 123, 1984.
12. Berezina, N. M., Kornova. E. I., and Riza-Zade. R. R., Result of pro

- duction testing maize seeds irradiated prior to sowing with ^{137}Cs gamma rays, *Radiobiology (USSR)*, 2, 180, 1962.
13. Berezina, N. M. and Riza-Zade, R. R., Ionizing radiation for pre-sowing treatment of corn seeds, *Vestn. Nauki, Min. Sel'sk Khoz. SSR*, 10, 10, 1965; NSA 20:45455.
 14. Bernard, C., *Lecon sur les Phenomenes de Lavie Communs aux Animaux et aux Vegetaux*, Bailliere, Paris, 1878.
 15. Bhattacharya, S. and Joshi, R. K., Factors modifying radiation-induced stimulation in plants: preirradiation moisture content, *Radiat. Environ. Biophys.*, 14. 45. 1977.
 16. Bhattacharya, S., Joshi, R. K., and Fendrik, I., A preliminary report on the effect of low doses of X-rays on the yield of two species of *Phaseolus* (Mung beans). *Stim. Newsl.*, 8. 4. 1975.
 17. Biebl, R. and Mostafa, I. Y., Water content of wheat and barley seeds and their radiosensitivity, *Radiat. Bot.*, 5, 1, 1965.
 18. Breslavets, I. P., Berezina, N. M., Shchibria, G. I., Romanchikovam, M. L, lazykova, V. A., and Mileshko, Z. F., Increased yield of radishes and carrots by X or γ irradiation of seeds before sowing, *Biophysics (USSR)*, 5, 86, 1960.
 19. Briggs, G. M., Antibiotics in poultry rations, *Feedstuffs*, 22, 32, 1950.
 20. Caldecott, R. S. and Smith, L., Resuscitation of heat-inactivated seeds with X-radiation, *J. Hered.*, 39, 195, 1948.
 21. Caldera, P. G., Gamma stimulation of potato tubers, *Stim. Newsl.*, I, 6, 1970.
 22. Caldera, P. G., Gamma stimulation of maize, *Stim. Newsl.*, 2, 5, 1971.
 23. Campos, F. F. and Velasco, E. G., Comparative effect of cobalt⁶⁰ on plant character of two recommended Philippine lowland rice varieties. *Philipp. Agric.*, 46, 93, 1962.
 24. Cannon, W. B., Stresses and strains of homeostasis, *Am. J. Med. Sci.*, 189, 1935.
 25. Chekhov, N. V., Effects of X-rays on plants. *Tr. Tomsk. Gos.*

Univ. kuibysheva, 85, 67, 1932.

26. Christensen, E., Root production in plants following localized stem irradiation, *Science*, 119, 127, 1954.
27. Clark, J. H., The biological effects of radiation, *Annu. Rev. Physiol.*, 1, 21, 1939.
28. Clows, R. A. L., The immediate response of the quiescent center to X-rays, *New Physiol.*, 69, 1, 1970.
29. Comorosan, S., Vieru, S., and Sandru, D., Evidence for a new biological effect of low level irradiations, *Int. J. Radiat. Biol.*, 17, 105, 1970.
30. Corbean, S. and Bajescu, N., Effect of chronic gamma radiation upon protein content of soybeans, *Ann. I. C. C. P. T. Fundulea* 33 Ser. C, 1965.
31. Crocker, W., *Growth of Plants*, Reinhold, New York, 1948, 127.
32. Davey, W. P., Prolongation of life of *Tribolium confusum* apparently due to small doses of X-rays, *J. Exp. Zool.*, 28, 447, 1919.
33. Davies, C. R., Effects of gamma irradiation on growth and yield of agricultural crops. I I. Spring-sown barley and other cereals, *Radiat. Bot.*, 10, 19, 1970.
34. Degner, W. and Schacht, W., Specific effects of low doses of ionizing radiations on seed of cultivated plants, *Radiobiol. Radiother.*, 15, 661, 1974.
35. Degner, S. and Schacht, W., 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 irradiated with ^{60}Co gamma radiation, *Radiobiol. Radiother.*, 16, 37, 1975 ; NSA 32: 6662.
36. Degner, W., Schacht, W., and Koepf, R., Specific effects of small doses of ^{60}Co γ radiation applied to seeds before sowing on the yield of silo maize. small and large plot field experiments. *Stim. Newsl.*, 7, 12, 1975.
37. Duryee, W. R., The nature of radiation injury to amphibian cell nuclei, *J. Natl. Cancer Inst.*, 10, 735, 1944.
38. Edwards, J. I., Busta, F. F., Jr., and Speck, M. S., Heat injury of

- Bacillus subtilis* spores at ultra high temperature, Appl. Microbiol., 13, 858, 1965.
39. Ehrenberg, L., Fedorcsak, I., and Naslund, M., Possible biochemical mechanisms of "radiostimulation" of living cells, Stim. Newsl., 5, 1, 1973.
 40. Erler, M., Uber die heilend Wirkung der Rontgenstrahlen bei abgegrenzten Eiterungen, Jahrb. W. Botan., 5, 65, 1906.(Footnote in Koernicke, Jahrb, Wiss, Bot., 56, 418, 1915.)
 41. Faitel'berg-Blank, V. R., Mechanism of ultrasound action on absorption in the gastrointestinal tract, Fed. Proc. Fed. Am. Soc. Exp. Biol., 24, T195, 1965.
 42. Fendrik, I., and Bors, J., Study of interaction of "low" dose of radiation with presoaking of seeds on the yield of spring barley, Impala, Stim, Newsl., 3, 17, 1971.
 43. Fendrik, I. and Glubrecht, H., The effect of small radiation doses on the yield of strawberries, Gartenbauwissenschaft, 37, 155, 1972.
 44. Fendrik, I. and Bors, J., Studies on the stimulating action of x-rays on seeds of radish var. saxa-alteration of temperature and moisture content. Stim. Newsl. 11, 18, 1980.
 45. Fendrik, I. and Bors, J. Investigations on the effects of x-irradiation of young plants of green pepper 'Cecei'-summarized results of 7 years. Stim. Newsl. 11, 27, 1980.
 46. Filho, J., Bragantini, C., and Santos, F. D. P., Behavior of rice seeds (*Oryza sativa* L.) exposed to gamma radiation, Center de Energid Nuclear na Agric., Brazil, 1972, 1, NSA 33 : 3189.
 47. Friedberg, W., Hanneman, H. D., Faulkner, D. N., Neas, B. R., Cosgrove, G. E., Jr., and Darden, E. B., Jr., Fast-neutron irradiation of mouse embryos in the pronuclear zygote stage: mortality curves and neoplastic diseases in 30-day postnatal survivors, Proc. Soc. Exp. Biol. Med., 151, 808, 1976.
 48. Frigerio, N. A., Eckerman, K. F., and Stowe, R. S., Carcinogenic hazard from low-level, low-rate radiation, in The Argonne radiological Impact Program, Part I, Rep. ANL/ES-26, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., 1973.
 49. Gaur, B. I, and Desai, B. M., Screening of crop plants for radiation

- induced stimulation. I. Kidney bean. onion. and lettuce. Stim. Newsl., 3, 13, 1971.
50. Gaur, B. K. and Joseph. B., Nature of radiation-induced stimulation in seedling growth, Stim, Newsl, 4, 48, 1972.
 51. Glubrecht, H., The effect of low doses of radiation on plants, Gem. Jahrb. Deutsch. Ges. Rein Aug. Biophysik., 181, 1968.
 52. Glubrecht, H. and Fendrik, I., Effects of low dose X irradiation in *Fragaria spez*, Stim. Newsl., 5, 52, 1973.
 53. Glubrecht, H. and Niemann, E. G., Stimulating Action of Low Doses of Ionizing Radiation in Plants, 4th Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, United Nations, Geneva, 1971.
 54. Gordon, S. A., The effects of ionizing radiation on plants. Biochemical and physiological aspects, Q. Rev. Biol., 32, 3, 1957.
 55. Granhall, I., Ehrenberg, L., and Borenus, S., Experiments with chronic gamma irradiation on growing plants, Bot. Not., 2, 155, 1953 ; PBA 23 ; 2330.
 56. Grisenko, G. V. and Mazhara, V. N., Ionizing and other types of radiation and their influence on the resistance of corn to stalk and root rot, Tr, Vses. Soveshch. Immunitetu Rast., 2, 21, 1968 ; CA 73 ; 52774.
 57. Grosch, D. S., Biological Effects of Radiations, Blaisdell, New York, 1965.
 58. Gudkov, I. N., Acceleration of mitotic cycle in meristem cells of seedling roots by gamma irradiation of pea and maize seeds at stimulating doses. Stim. Newsl., 9, 8, 1976.
 59. Gunckel, J. E. and Sparrow, A. H., Aberrant growth in plants induced by ionizing radiation. Abnormal and pathologic plant growth, Brookhaven Symp. Biol., 6, 252, 1954.
 60. Guthrie, D., Janus in the Doorway, Charles C Thomas, Springfield, Ill., 1963.
 61. Hahnemann, S., Organon of Medicine, 6th ed., Boerioke, W., transl., Boesicke and Tafel, San Francisco, 1922.
 62. Hamatova, E., Influence of chronic γ irradiation on nodulation soya,

Rostl. Vyroba, 15, 197, 1969 ; NSA 24 ; 51099.

63. Harms-Ringdahl, M., Fedorcsak, I., and Ehrenberg, L., Isolation of substances that stimulate RNA synthesis from red kidney bean : their activities in lymphocytes and *E. coli*, Proc. Natl. Acad. Sci. (U. S. A), 70, 569, 1973.
64. Hasler, A. D., Scholz, A. T., and Horral, R. M., Olfactory imprinting and homing in salmon , Am. Sci., 66, 347, 1978.
65. Haunold, E. and Zrara, J., Nitrogen content of two spring wheat varieties as affected by seed irradiation, Stim. Newsl., 3, 30, 1971.
66. Iqbal, J., 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, 1980.
67. Izvorska, N., The gamma ray effect on the growth, productivity, and some biochemical changes of pepper, Inst. Fiziol. Rast. Bulg. Akad. Nauk, 18, 79, 1973 ; NSA 31 ; 14326.
68. Jaarma, M., Influence of ionizing radiation on potato tubers, Ark. Kemi, 13, 97, 1958.
69. Johson, E. L., Susceptibility of seventy species of flowering plants to X radiation, Plant Physiol., 11, 319, 1936.
70. Jonard, R. and Landre-Ruch, C., Radiobiology : effect of rays on the formation of tumors provoked on tissues of Jerusalem artichoke by *Agrobacterium tumefaciens*. C. R. Acad. Sci. Ser. D. 263, 1517, 1966.
71. Joseph, B., Physiological Studies on Radiation Effects in Plants, Ph. D. thesis, Bombay University, India, 1972 ; NSA 29 ; 7936.
72. Kaindl, K. and Fosner, M., The accelerating effect of small radiation doses on plants, Bayer. Landwirtsch. Jahrb. Sonderh., 42, 11, 1965.
73. Koepp, R. and Kramer, M., Photosynthetic activity and distribution of photoassimilated ^{14}C in seedlings of *Zea mays* grown from gamma-irradiated seeds. photosynthetica, 15, 484, 1981.
74. Komuro, H., The effect of X-rays on the germination of *Oryza sativa*, 223, Bot. Mag.(Tokyo), 33, 223, 1919.

75. Korosi, F. and Krakkai, I., Effect of gamma irradiation of *Phaseolus vulgaris* L. seeds on $^{32}\text{PO}_4^{-3}$ uptake of seedlings and its translocation pattern. *Environl. Exp. Bot.* 23, 149, 1983.
76. Kuzin, A. M. The utilization of ionizing radiation in agriculture, *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, United Nations, Geneva*, 12, 149, 1955.
77. Kuzin, A. M., *Radiation Biochemistry*. Translated by Halperin, Y., Quastel, M. R., Ed., Israel Program, Science Translation, Jerusalem, 1964.
78. Kuzin, A. M., Kopylov, V. A., and Bagabova, M. E., on the role played by radiotoxins in stimulation of the growth and development of irradiated seeds, *Stim. Newsl.*, 9, 27, 1976.
79. Kuzin, A. M., Uzorin, E. K., and Chirkovskii, V. I., Remote effects of γ irradiation of seeds on the development of various *Nicotiana* plants, *Radiobiology (moscow)*, 3, 903, 1963. (NSA 18 : 19690).
80. Kuzin, A. M., Vagobova, M. E., and Revin, A. F., 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 ; AI 9 : 367474.
81. Kuzin, A. M. and Yurov, S., The mutagenic effect of radiotoxins, *Radiobiology (Moscow)*, 8, 456. 1968.
82. Kwon, O. Y., Studies on the acceleration of germination in carrot seed. II. Effects of X-ray and ultraviolet light in the germination of carrot seed, *Korean J. Bot. (Shingmul hakhoe Ji)*, 13, 15, 1970.
83. Lorenz, E., Jacobsen, L. O., Heston, W. E., Shimkin, M., Eschenbrenner, A. B., Deringer, M. K., Doniger, J., and Schwersthal, R., Effects of long-continued total body gamma irradiation on mice, guinea pigs and rabbits, III. Effect on life span, weight, blood picture and carcinogenesis, and the role of the intensity of radiation, in *Biological Effects of External X and Gamma Radiation, Part 1*, Zirkle, R. E., Ed., McGraw-Hill, New York, 1954, 24.
84. Luckey, T. D., *Hormisis with ionizing radiation*. CRC press, Inc., Boca Raton. Fla. 1980.

85. Lukey, T. D., Antibiotics stimulate growth of germfree chicks, Fed. Proc., 37, 2553, 1978.
86. Maldiney, A. and Thourenin, J. R., On the influence of X-rays and germination, Rev. Gen. Bot., 10, 81, 1898.
87. Maltseva, S., Effect of the moisture content of tomato seeds on the stimulatory action of low doses of γ rays (Co^{60}). Radiobiology (Moscow), 17, 138, 1977 ; AI 9 : 360249.
88. Mandel, P. and Chambon, P., Some effects of X-rays on the in vivo biosynthesis of nucleic acids capable of explaining the reduction of enzymatic activities and the occurrence of mutations, in Immediate and Low Level Effects of Ionizing Radiations, Buzzati-Traverso, A. A., Ed., Taylor and Francis, London, 1960, 71.
89. Maximov, N. A., A Textbook of Plant Physiology, McGraw-Hill, New York, 1930.
90. Menyhert, Z., Radiation stimulation of tomatoes, Stim. Newsl., 1, 17, 1970.
91. Menyhert, Z. and Balint, A., Radiostimulation—experiments with potato, Bayer. Landwirtsch. Jahrb., 42, 61, 1965.
92. Metlitskii, L. V., Irradiation of potatoes and other vegetables to prevent sprouting, Radiat. Obrabotka Pisch. Prod. Izdatel. Ekon. Moscow, 1967 ; NSA 23 : 12249.
93. Moinar, K., Subbiologic aspects of ageing and the concept of biologic cathode protection, Mech. Ageing Dev., 1, 319, 1973.
94. Moore, P. R., Luckey, T. D, Everson, C. A., McCoy, E., Elvehjem, C. A., and Hart, E. G., Use of sulfasuxidine, streptothricin and streptomycin in nutritional studies with the chick, J. Biol. Chem., 165, 437, 1946.
95. Miller, M. W. and Miller, W. M., Radiation hormesis in plants. Health physics. 52 (5), 607, 1987.
96. Nadson, G. A., On the primary effect of radium rays on living substances, Biochem. Z., 155, 381, 1925.
97. Niemann, E. G., Baboth, E., Zelles, L., Ehrenberg, L., Fedorcsak, I.,

- and Fendrik, I., Low level radiation effect on plants. Biochemical aspects of radiation stimulation. Biological and Environmental Effects of Low-Level Radiation, Vol. 1., International Atomic Energy Agency, Vienna, 1976, 141.
98. Pal, I., Investigations in the effects of seed irradiation of plants in a phytotron. I. Tomato. Stim Newsl., 8, 23, 1975.
 99. Pal, I., Pannonhalmi, K., and Maul, F., Report in the red radish phytotron experiments coordinated by ESNA at Godollo, Hungary, Stim. Newsl., 9, 39, 1976.
 100. Parker, R. B., Probiotics—the other half of the antibiotics story, Anim. Nutr. Health, 29, 4, 1974.
 101. Read, J., Radiation Biology of *Vicia faba* in relation to the General Problem, Charles C Thomas, Springfield, Ill., 1959.
 102. Richet, C., Dictionnaire de Physiologie, F. Akon, Paris, 1900.
 103. Richet, C., The action of minute doses of materials upon lactic fermentation : periods of acceleration and retardation, Arch. Int. Physiol., 4, 18, 1906.
 104. Rivera, V., Influence of the Lakhovsky oscillating current on the development of tumors in plants, Boll. Stn. Patol. Veg. Roma, 8, 357, 1926.
 105. Rosenberg, I. H., Beisel, W. R., Gordon, J. E., Katz, M., Keusch, G. T., Luckey, T. D., and Mata, L. J., Infant and child enteritis-malabsorption-malnutrition: the potential of limited studies with low dose antibiotic feeding, Am. J. Clin. Nutr., 27, 304, 1974.
 106. Saeki, H., Studies on the effects of X-ray radiation upon germination, growth, and yield of rice plants, J. Soc. Trop. Agric. Taiwan., 8, 28, 1936 ; BA 11 ; 8019.
 107. Santha, A., Investigations on the relations between the biologic effects of ionizing radiation and magnetism. II. Joint effect of ionizing radiation and magnetism on the growth of the root of *Vicia faba*, Honvedorvos, 20, 198, 1968 ; NSA 23 : 6615.
 108. Saric, M., Curic, R., Ceric, I., and Hadzijeve, D., Effects of gamma irradiation in some varieties of wheat seed on the morpho-physiological characteristics of seedlings, in Effects of Ionizing Radiations on Seeds, International Atomic Energy Agency, Oak

- Ridge, Tenn., Vienna, 1961, 503.
109. Savin, V. N. and Stepanenko, O. G., Change of drought resistance of plants irradiated with ^{60}Co gamma rays, Radiobiology (Moscow), 7, 619, 1967 ; NSA 22 : 15115.
 110. Savin, V. N. and Stepanenko, O. G., Mechanism of the intensified growth of lateral shoots of irradiated plants, Dokl. Akad. Nauk SSSR, 193, 929, 1970 ; NSA 25 : 50930.
 111. Sax, K., The effect of ionizing radiation on plant growth, Am. J. Bot., 42, 360, 1955.
 112. Schulz, H., Uber Hefegiste, Arch. Ges. Physiol., 42, 517, 1888.
 113. Seckt, H., Influence of X-rays on plants, Ber. Dtsch. Bot. Ges., 20, 87, 1902.
 114. Sheppard, S. C. and Evenden, W. G., Factors controlling the response of field crops to very low doses of gamma irradiation of the seed. Can. J. plant Sci. 66, 431, 1986.
 115. Sheppard, S. C. and Regitig, P. J., Factors controlling the hormesis response in irradiated seed. Health physics, 52 (5), 599, 1987.
 116. Simon, J. and Bhattacharya, S. H., The Present status and Future Prospects of Radiation Stimulation in Crop Plants, Budai Janos, Budapest, 1977.
 117. Simon, J., Digleria, M. and Lang, Z., 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, 1981.
 118. Skok, J., Chronney, W., and Rakosnik, E. J., An examination of stimulatory effects of ionizing radiation in plants, Radiat. Bot., 5, 281, 1965.
 119. Smith, K. C. and Hanawalt, P. C., Molecular Photobiology, Academic Press, New York, 1969.
 120. Southam, C. M. and Ehrlich, J., Effects of extract of western red-cedar heartwood on certain wood decaying fungi in culture, Phytopathology, 33, 517, 1943.
 121. Sparrow, A. H., Uses of large sources of ionizing radiation in

- botanical research and some possible practical applications, in Large Radiation Sources in Industry, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1960, 195.
122. Sparrow, A. H. and Christensen, E., Effects of X-ray, neutron, and chronic gamma irradiation on growth and yield of potatoes, Am. J. Bot., 37, 667, 1950.
 123. Sprague, H. B. and Lenz, M., The Effect of X-rays on potato tubers for "seed," Science, 69, 606, 1929.
 124. Stan, S. and Croitoru, A., 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, 1970.
 125. Stan, S. and Jinga, A., The effect of low gamma ray doses of ^{60}Co on bean and soybean plants. Ann. Inst. Cercet. Pentru, Cereale Plante Teh. Fundulea, 34, 369, 1966 ; NSA 23:20427
 126. Starzycki, S., Pala, J., and Konopko, E., The effect of low doses of gamma rays upon the rate of infection of plants with grass mildew (*Erysiphe graminis* DC), Hodowla Rosl. Aklim. Nasienn., I. 103, 1967 ; NSA 24 : 6141.
 127. Suess, A. and Grosse, W., The effect of low doses of γ radiation of plant growth, Abt. Strahlennutzung, December, 1, 1968.
 128. Suess, A. and Haisch, A., Influence of seed irradiation with small doses on the development of wheat and barley, Radiat. Bot., 4, 439, 1964.
 129. Surrey, K., Modification of the relationship between growth and metabolism in seeds by X irradiation, Radiat. Res., 25, 470, 1965.
 130. Thaug, M. M., Stimulating effects of nuclear radiation on development and productivity of rice plant. Nature (London). 186. 982. 1960.
 131. Thomas, J. R., Finch, E. D., Fulk, D. W., and Burch, L. S., Effects of low level microwave radiation on behavioral baselines, Ann. N. Y. Acad. Sci., 247. 425. 1975.
 132. Thompson, H. C., Vernalization of growing plants, in Growth and Differentiation in Plants. Loomis. W. E., ED., Iowa State College Press. Ames, 1949, 179.

133. Tobias, C. A., Biological effects of radiation. Vol, 15, Encyclopaedia Britannica. 1974. 378.
134. Townsend, C. O., the correlation of growth under the influence or injuries. Ann. Bot. (London). 11, 509, 1897.
135. Townsend, J. F. and Luckey. T. D., Hormoligosis in pharmacology, JAMA, 173, 44, 1960.
136. Tumanyan, E. R., Effect of radiation on tomato seeds and seedlings, Biol. Zh. Arm., 27, 65, 1974 ; NSA 31:19924.
137. Vakarenko, G. E., Effect of ionizing radiation on the dynamics of ribonucleic acids in plants, Nuclear Sciences Abstracts, 18, 9912, 1963.
138. Vlasyuk, P. A., Effect of ionizing radiation on the physiological-biochemical properties and metabolism of agricultural plants, Inst. Fiziol. Biokhim. Rast. SSR, 1964: 24-31. NSA 20 : 45453.
139. Weber, F., Forcing resting plants by X-rayed. Biochem. Z, 128, 495, 1922.
140. Weber, F., Bitamin C content of X-rayed seedlings, Phyton (Am. Rev. Bot), 4, 144, 1952.
141. Weigert, C., Verhandlungen der gesellschaft deutscher nature forscher und aerzte, Versammlung. 1. 136, 1896.
142. Went, F. W., The Role of Environment in Growth of Plants, Brody Memorial Lecture No. 111, Special Report 42. University of Missouri, Columbia, 1964.
143. Yamada, M., On the effect of Roentgen rays upon seeds of *Oryza sativa* J. Phys. Therapy, 6, 100, 1917.
144. Yurina, A. V. and Kardashina, L. A., Presowing gamma inrradiation of seeds as a method to increase cucumber fruitfulness in the hot house. Radiobiology (Moscow). 17, 141, 1977 : AI 9 : 360253.
145. Zeimalov, I. I., Aliv, A. A., and Riza-Zade, R. R., Influence of preplanting gamma irradiation on the yield and phytophthorosis of potatoes, Radiobiology (Moscow). 12. 311, 1972 ; NSA 27 : 2731.
146. Zelles, L., Effects of antibiotics on UV stimulated tube growth of *Pinus silvestris* pollen, Radiat. Environ. Biophys., 14, 323, 1977.

147. Zelles, L. and Seibold, H. W., Radiation induced pollen tube growth stimulation of *Pinus silvestris*, Environ. Exp. Bot., 16, 15, 1976.
148. Zelles, L, Seibold, H. W., and Ernst, D. E. W., Localization of the site of action of tube growth stimulation by micro UV irradiation of pine pollen, Radiat. Environ. Biophys., 14, 61, 1977.

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS주제코드
KAERI/AR-435/96			
제목 / 부제	고등식물에서의 방사선 Hormesis		
연구책임자 및 부서명	김 재 성 (방사선 응용실)		
연구자 및 부서명			
발행지	대 전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	52	도표	유(0), 무 ()
발행일			1996. 3.
크 기			26 cm
참고사항			
비밀여부	공개(0), 대외비(),	급비밀	보고서종류
			기술분석보고서
위탁연구기관		계약번호	
초록(300단어내외)	<p>저선량 전리방사선 조사효과는 hormesis 일반 개념과 일치하였는데 방사선 종류에 상관없이 자극효과를 보여주었다. 식물에서는 발아, 출아, 생장, 발육, 개화, 결실 촉진과 수량증대와 질병저항력 증가 및 저선량 조사 이후의 고선량 방사선에 대한 저항력 증가등이 나타났다.</p>		
주제명 키워드(10단어내외)	<p>저선량방사선, 식물자극작용, 생육촉진, 수량증가, 질병저항력증가</p>		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report Report No.	INIS Subject Code
KAERI/AR-435/96			
Title/ Subtitle			
Radiation Hormesis in Higher Plants			
Project Manager and Dept.		Jae-Sung Kim (Radiation Application Dept.)	
Researcher and Dept.			
Pub. Place	Taejon	Pub. Org.	Pub. Date 1996. 3
Page	52	Fig. and Tab.	Yes(0), No() Size 26 cm
Note			
Classified	Open(0), Outside(), Class	Report Type	State of Art Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract (About 300 Words)			
<p>Accelerated germination, sprouting, growth, blooming, deveploment, 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.</p>			
Subject Keywords(About 10 Words)			
<p>Radiation Hormesis, Plant growth stimulation, Yield increasing, Disease resistance</p>			

고등식물에서의 방사선 Hormesis
Radiation Hormesis in Higher Plants

1996年 4 月 15 日 印刷

1996年 4 月 18 日 發行

發行人 申 載 仁

發行處 韓國 原子力 研究所

大田直轄市 儒城區 德津洞 150

印刷所 大田, 忠南 印刷工業協同組合

믿는마음 지킨약속 다져지는 신뢰사회