

특집 : 단체급식에서의 안전성 확보를 위한 합리적인 개선방안

방사선조사에 의한 식자재의 살·멸균 원리

김 동 호

한국원자력연구소 방사선이용연구부

Principles of Radiation Sterilization of Food Materials

Dongho Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, Advanced Radiation Technology Institute, Daejeon 305-353, Korea

서 론

식품의 조리, 가공, 보존, 유통 등 식품위생과 관련된 관리시스템의 발전과 소비자의 의식수준 향상, 그리고 의료기술의 발전에도 불구하고 식품에서 유래한 질병의 발생은 오히려 증가하고 있다. 우리나라에서도 학교급식 등에 의한 집단 식중독 발생이 급격히 증가하고 있고 최근에는 광우병, 구제역, 돼지 콜레라, 조류독감 등과 같은 가축 전염병이 세계적으로 확산되고 있어 사회적 불안이 커지고 있다. 식품 유래 질병에서 가장 문제가 되는 것은 병원성 미생물에 의한 식중독과 전염병이라 할 수 있다. 식품 유래 병원성 미생물에 의한 질병은 불특정 다수를 대상으로 예고 없이 발병하므로 사회 구성원 전체에 극심한 심리적 불안을 초래하게 되며 나아가 경제적 손실 또한 막대하다. 더구나 최근의 식중독이나 식품관련 질병은 집단급식이나 외식산업의 확대와 더불어 대형화되는 추세이며, 이러한 현상은 학교급식에서 더욱 심각하다. 이는 곧 현재 시행 중인 다양한 식품위생화 기술과 HACCP 등의 제도적 장치에도 불구하고 아직까지 식품의 위생안전성 확보가 진전을 보이지 못하고 있음을 반증한다. 따라서 세계 각 국에서는 국가적 차원에서 보다 효과적인 식품위생화 기술과 시스템의 개발에 주력하고 있다.

식품의 방사선조사기술은 지난 반세기동안 선진국 중심의 다각적인 연구에 의하여 발전되어 왔으며 현재의 어떤 위생화 처리방법보다도 효과적이고 미생물학적, 독성학적, 유전학적, 영양학적 안전성이 확보된 유용한 기술로 평가되고 있다. 2001년 미국 질병통제센터(CDC)는 만약 가금육을 포함한 식육에 방사선조사기술을 50% 수준으로 적용할 경우 미국 내 식중독 발생 건수를 1/10 수준으로 낮출 수 있다고 보고하여 방사선의 이용이 식품의 안전저장과 위생화에 상당한 효과가 있을 것임을 제시하였으며

실제로 미 농무성은 2002년 말까지 미국 내 학교급식에 사용되는 모든 식육 및 그 가공품에 대한 방사선조사를 승인하고(2002. 10. 25) 학교급식에서의 위생성 확보를 위하여 방사선 조사된 식품의 사용을 권고하고 있다. 식품의 방사선조사기술은 현재 유럽공동체(EU), 미국 등의 선진국과 식량 수출국을 중심으로 산업화가 급속하게 진행되고 있다. 최근에는 WTO 국제무역체제에 있어 “위생식품 검역 조치의 적용에 관한 협정”(Sanitary and Phytosanitary Measures, SPS), “무역의 기술적 장해에 관한 협정”(Technical Barriers on Trade, TBT) 등이 체결됨으로써 국제적으로 식품의 방사선조사에 대한 산업적 적용은 더욱 가속화될 전망이다.

그러나 일련의 연구 성과와 기대효과에도 불구하고 우리나라에서의 방사선조사식품의 활용도는 아직까지 도입 단계에 머무르고 있으며 여기에는 방사선조사식품에 대한 소비자나 식품 생산자의 이해와 수용도가 선진국에 비하여 상대적으로 낮은 것이 가장 중요한 요인으로 지적되고 있다. 위에서 언급한 바와 같이, 미국에서는 가장 안전하고 위생적인 식품이 공급되어야하는 학교급식에 이미 방사선조사식품이 공급되고 있을 정도로 사회적 인식이 변하고 있다. 본 논문에서는 우리나라 식품산업 종사자와 소비자의 방사선조사식품에 대한 이해도를 증진시키고 이 기술의 활용도를 높이기 위하여 방사선의 일반적 개요와 방사선의 살·멸균 원리를 소개하고자 한다.

방사선과 방사선조사 시설

식품의 방사선조사에 이용되는 방사선의 종류와 특징
방사선은 크게 우리의 환경에서 접하는 자연방사선과 인위적으로 발생시킨 인공방사선으로 구분하며 인공방사선은 방사성 동위원소로부터 방출되는 α(알파), β(베타),

γ (감마)선 외에도 기계적으로 발생하는 X선, 전자가속기에서 나오는 전자선(electrons), 원자로에서 만들 수 있는 중성자선 등이 있다. 방사선은 물질을 통과할 때 물질의 원자나 원자단, 분자 등을 전리시켜 이온을 생성하게 되는데, 이와 같은 성질을 지닌 방사선을 전리방사선(ionizing radiation)이라 하며 γ 선, 전자선, X선, 자외선, α 선, 중성자선 등이 이에 포함된다(그림 1). 이 중 관련 국제기구(FAO, IAEA, WHO 등)와 Codex 식품규격위원회에서 식품 및 의료제품의 조사에 안전하게 이용될 수 있다고 밝힌 방사선의 종류는 표 1과 같다.

이들 방사선 가운데 식품산업에서 직접 활용되고 있는 방사선은 감마선과 전자선이며 그 사용비율은 감마선이 80%, 전자선이 20% 정도를 차지하고 있다. 전자선은 감마선에 비해 투과력은 약하나 전원에 의해서 조절이 가능하므로 공정제어, 신속·정확성, 에너지 효율성, 소비자 수용성 등의 측면에서 장점이 있다. 현재 산업적으로 가장 많이 이용되고 있는 감마선은 투과력이 강하여 제품을 포

표 1. 식품 및 공중보건관련 산업에서 이용될 수 있는 방사선의 종류

방사선	선 원	반 감 기	이용 에너지(MeV)
γ (감마)선	Co-60	5.3년	1.17, 1.33
	Cs-137	30년	0.06
전자선(electrons)	전자가속기에서 발생(10 MeV 이하)		
X선	기계적으로 발생(5 MeV 이하)		

장한 상태로 연속 처리할 수 있으므로 살균처리 후 재포장에 따른 2차 오염을 방지할 수 있으며 제품의 온도 상승이 없어(국제적으로 건전성이 허가된 10 kGy 조사시 물과 같은 열용량을 가진 산물에서 약 2.4°C 상승) 성분의 파괴를 최소화하고 냉장·냉동상태에서도 살균이 가능하다. 전자선과 감마선은 모두 화학 훈증제나 보존제와는 달리 유해성분의 생성이나 잔류성분이 남지 않는다는 장점과 처리 시 환경조건의 영향을 거의 받지 않는 특징이 있다(표 2).

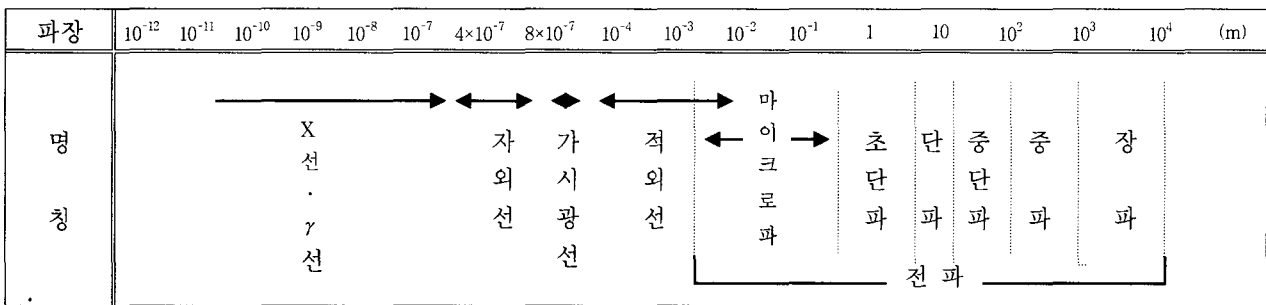


그림 1. 방사선의 종류와 파장.

표 2. 각종 살균·멸균방법의 특징 비교

항 목	고압증기	EO	감 마 선	전 자 선
멸균 확실성	비교적 확실	처리제품에 EO gas 침투 필수	가장 확실	비교적 확실
처리 parameter	온도, 시간, 압력	온도, 습도, 시간, 압력, EO 농도	시간	시간
공정 control	비교적 용이	복잡	용이	용이
처리 시간	수 분	수 시간	수 십초~수 시간	수 초~수 분
처리 방법	batch식	batch식	연속식	연속식
처리 제품의 재질	내열성	적용범위 大	내방사선	내방사선
처리시 포장형태	증기투과성(narrow)	EO gas 투과성(narrow), 재포장	완포장(wide)	완포장(wide)
물질투과성	小	밀봉구조 멸균불가	大	小
물질과의 작용	가스분해	히드록시에틸화	방사선 분해	방사선 분해
처리후 contol	건조/방냉공정	1주간 탈기	無	無
처리후 제품안전성(잔류독성)	無	독성 有(출하시 EO 기준치 이하)	無	無
처리비용	저가	저가(고압증기보다 고가)	최고가	고가
설비비용	저가	고가	최고가	최고가

방사선조사선량의 단위

식품산업에서 사용하는 방사선 흡수선량 단위는 그레이(gray, Gy)가 사용되며 1 Gy=100 rad(래드)=1 Joule/kg에 해당한다. 여기서 1 rad(radiation absorption dose)는 피조사체의 종류에 관계없이 물질 1 g당 100 erg의 방사선 에너지를 흡수하였을 때를 말한다.

방사선조사시설

조사시설 : 감마선 조사시설의 주요 구성요소는 ① 방사선원(Co-60이나 Cs-137 동위원소), ② Conveyor system, ③ 차폐 시설 및 선원 저장 수조, ④ Operation 및 control system의 네 가지로 구분된다. 감마선원으로 가장 많이 사용되는 Cobalt-60은 천연 Cobalt-59 pellet을 원자리에 넣어 중성자를 이용하여 생산되며 Cobalt-60 pellet은 통상 pencil이라고 부르는 이중의 스테인레스 원통 안에 보관한다.

Cobalt-60 선원은 차폐된 콘크리트 조사실 안에 보관되는데 콘크리트 벽의 두께는 1.8 m에서 3 m로 선원의 최대 에너지에 의해 결정된다. 조사실 내부에는 6~7 m 깊이의 수조가 있고 시설이 작동하지 않을 때에는 이 수조 안에 선원이 보관되며, 조사가 진행될 때 선원이 수조 밑으로부터 올라오게 된다. 산업용 감마선 조사시설의 효율성을 결정하는 Conveyor system은 처리하고자 하는 물품의 특성, 활용도 등에 따라 적정 방식을 선택한다. 이 중 가장 많이 적용되고 있는 시스템은 다목적의 서비스 조사시설인 Pallet irradiator이며 국내 유일의 산업용 감마선 조사 시설(그린피아기술 주식회사)도 Pallet irradiator type의 설비이다(그림 2).

전자선 조사시설 : 전자가속기는 사용하지 않을 때 전원을 내리면 에너지가 없으므로 생산 시스템에 유용성을 부여한다. 전자선은 투과도가 낮아 제품을 얇게 배열하여 조사하여야 하나 전자선을 양측에서 조사하

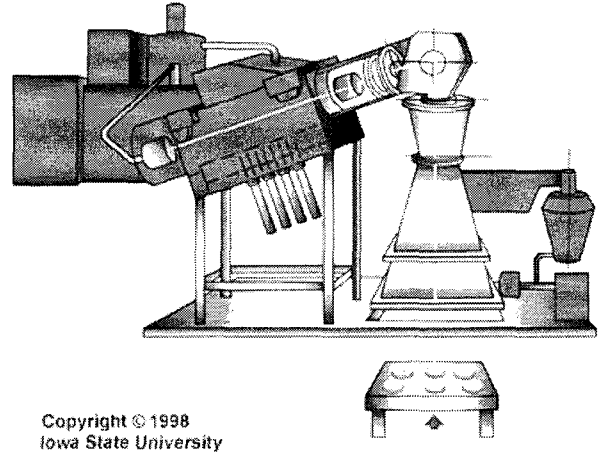


그림 3. 전자선 조사장치.

는 경우 그 투과 깊이는 증가한다(10 MeV의 경우 8.9 cm). 전자선은 제품에 직접 조사하므로 감마선이 모든 방향으로 에너지를 방출하는 것과 비교하여 높은 효율을 갖는다고 볼 수 있다. 그래서 10 kW의 에너지를 갖는 전자선 발생장치는 Co-60의 1 million curie와 동등한 효과를 갖는다.

높은 에너지를 갖는 전자선 발생장치는 작동 중 열을 발생하여 가속기를 불안정하게 만들 수 있다. 그래서 가속장치 내부의 온도를 항상 ±0.5°C로 제어하는 정밀한 시스템이 요구된다. 식품에 대한 전자선의 이용은 10 MeV 이하의 에너지를 사용할 수 있도록 국제적으로 규정하고 있으며, 투과력 때문에 현재까지는 곡류나 그 가공품 및 과일류 등의 살충과 표면 살균 등의 목적에 주로 이용되고 있다.

방사선 살균

방사선조사기술은 병원성 미생물 및 유해 생물의 사멸

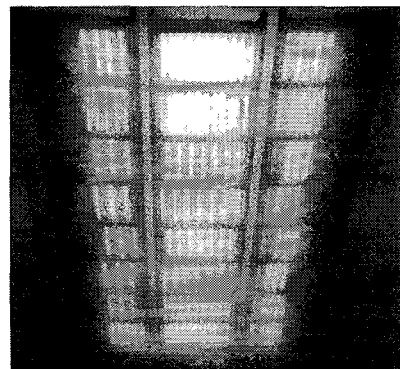
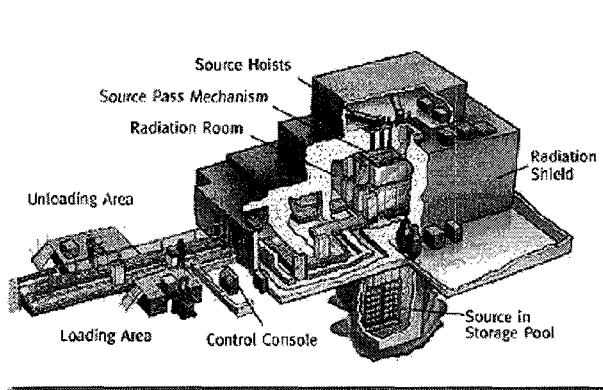


그림 2. 감마선 조사시설(좌)과 조사시설에 사용되는 Co-60(우).

에 의한 위생화, 식량자원의 장기보존 및 손실방지, 그리고 국가 간 식량교역에 따른 검역관리기술로서 이용되고 있다. 각 식품에 대한 조사선량 범위와 주요 사용 목적을 표 3에 정리하였다.

방사선조사식품에 관한 초기연구는 주로 ① 농산물의 발아, 발근 억제(inhibition of sprouting), ② 농산물의 해충구제(insect disinfection), ③ 농축산물의 기생충 사멸(parasite disinfection), ④ 농산물의 숙도조절(delay of physiological process), ⑤ 저장수명 연장(extension of shelf-life) 등 농산물의 보존과 국제교역에서의 안전성 확보를 목적으로 이루어졌다. 최근에는 식품위생화에 대한 보다 상세한 연구와 산업적 적용이 시행되고 있으며 나아가 방사선의 물질변환 효과와 BT 또는 NT 기술을 접목한 복합기술 개발을 통하여 식품·의약소재 및 신제품개발에 관한 연구분야에서도 획기적인 연구결과가 보고되고 있다. 아래에서는 방사선을 이용한 식품위생화와 관련하여 미생물에 대한 방사선의 작용기작, 미생물의 방사선 감수성 등을 살펴보고자 한다.

방사선에 의한 미생물 살균의 구분

식품의 방사선조사가 기존의 살균 기술에 비하여 식품 고유의 특성변화를 가장 최소화할 수 있는 기술이라고는 하지만 조사선량, 식품의 종류 등에 따라 어느 정도의 품질변화가 수반되는 것은 사실이다. 따라서 제어하고자 하는 대상 미생물, 제어 수준, 식품의 특성 등에 따라 조사선량을 조절하여야 한다. 방사선에 의한 식품 내 미생물 살균은 그 목적에 따라 ① 방사선 완전살균(radappertization), ② 방사선 병원성 미생물 살균(radicidation), ③ 방사선 부분살균(radurization)으로 구분한다. 각 살균의 개념을 정리하면 다음과 같다.

방사선 완전살균(Radappertization): *Bacillus*속 및 *Clostridium*속 등의 내생포자를 포함한 모든 미생물이 검출되지 않을 정도로 완전 살균하는 처리로서 30~50 kGy

의 고선량 조사가 필요하다. 통조림 식품과 병원 환자용 무균식품, 우주인 식품, 특수스포츠식품, 실험동물용 무균 사료(SPF 또는 Germ-free 사료 등), 의약품, 의료용품 및 식품의 포장재료 등의 살균에 적용된다.

방사선 병원성 미생물 살균(Radicidation): 식품에 오염된 식중독균, 경구전염병균 등의 병원성 미생물을 1.0~10 kGy 조사선량 범위로서 사멸시키는 방법으로 주로 위생화를 목적으로 실시되며 세계적으로 실용화가 가장 활발한 예이다.

방사선 부분살균(Radurization): 방사선에 의해 대상 식품의 일반 오염미생물의 생균수를 감소시켜 보존기간 또는 냉장기간을 연장시키는 처리로서 0.5~10 kGy 정도의 방사선조사선량이 요구된다.

방사선의 생물학적 작용

방사선의 생물학적 작용은 세포 구성성분에 대한 직접적인 작용과 함께 방사선에 의한 분해산물이 표적에 영향을 주는 간접작용에 의하여 결정된다. 일반적으로 방사선에 대한 가장 직접적인 표적은 DNA이다. DNA에 대한 방사선의 직접효과는 DNA 분자결합 자체의 파괴에 의하여 이루어지고 간접효과는 DNA의 주변환경을 이루는 물 분자를 수소분자(H⁺), 수산 radical(OH[·]), 수용성 전자(e_s⁻)와 같은 1차 radical로 전환시키는 작용에 의하여 이루어진다. 특히 OH[·] radical은 DNA 분자의 수화 경계면에서 90% 정도의 손상율을 차지함으로써 미생물의 방사선 감수성에 가장 큰 영향을 미친다. 한편, 미생물들은 DNA의 손상에 대한 다양한 복구 시스템을 가지고 있는데 일반적으로 DNA 이중나선의 복구시스템이 결여된 미생물은 방사선 감수성이 크고 방사선 저항성 미생물들은 DNA의 복구능력이 상대적으로 큰 것으로 알려지고 있다. 또한 방사선조사에 의한 미생물의 감수성은 미생물 고유의 특성뿐만 아니라 미생물의 생존에 영향을 주는 외부환경에 의해서도 크게 좌우된다. 즉, 온도, 기체환경, 수분활성도,

표 3. 주요 식품군의 방사선조사 목적 및 유효선량

주요 식품군	조사선량 (kGy)	주요 목적 및 효과
육류, 가금육, 어패류, 채소 및 기타 신선식품을 이용한 특수영양식품, 무균식품 등	20~70	상업적 완전살균 멸균처리 후 상온 보존
향신료	8~30	미생물의 유효한 감균 및 곤충사멸 화학살균 살충의 대체
육류, 가금육, 어패류	1~10	병원성 미생물의 살균 및 부패 방지
딸기 등 과채	1~4	곰팡이의 제거로 보존성 연장
곡류, 과일, 야채	0.1~1	해충의 제거
바나나, 아보카도, 망고 등	0.25~0.35	숙성의 지연
돼지고기	0.08~0.15	선모충의 제거
감자, 양파, 마늘	0.05~0.15	발아의 억제

pH, 식품의 화학적 성분, 미생물의 성장단계와 같은 외부 환경이 미생물 세포의 물리·화학적 특성에 영향을 미쳐 방사선에 대한 미생물의 반응에 차이가 생기게 되는 것이다. 미생물의 방사선 감수성에 영향을 미치는 주요 환경인자를 살펴보면 다음과 같다.

온도 : 일반미생물의 치사범위 이하인 45°C 정도의 열처리만으로도 미생물에 대한 방사선조사는 상당한 상승효과를 나타낸다. 이는 DNA의 손상 등에 대한 미생물의 복구작용이 환경온도 이상에서는 작동하지 않기 때문이다. 100°C에서도 수 시간 이상 내열성을 갖고 방사선에 대해서도 상당한 저항성을 갖는 세균의 포자를 80°C 정도의 온도로 처리하여 방사선을 조사하면 방사선 저항성은 급격히 감소한다. 반대로 미생물의 영양세포를 어는점 이하의 온도에서 방사선을 조사하면 상온에 비하여 방사선 저항성이 높아지는데 이는 어는점 이하에서 수분활성도가 감소하고 물의 동결에 따라 radical의 확산이 제한되기 때문이다.

기체환경 : 일반적으로 무산소의 조건보다는 유산소 조건에서 미생물에 대한 방사선의 살균효과는 증가한다. 이는 산소의 유무에 따라 미생물의 생리적 대사과정과 radical의 생성정도가 달라지기 때문이다. 실험결과 무산소 상태에서는 유산소계에 비하여 미생물 영양세포의 저항성이 2~5의 비율로 커진다고 알려져 있다.

수분활성도 : 미생물은 주변환경이 부분적으로, 또는 전체적으로 탈수되어 있는 상태보다는 수분이 높은 환경에서 방사선에 민감하다. 수분이 낮은 환경에서는 방사선조사에 의하여 물에서 생성되는 radical의 생성율이 낮아지므로 DNA에 대한 간접효과의 정도도 낮아진다. 냉동식품의 조사에서 대부분의 세균 영양세포는 2배 정도로 방사선 저항성이 증가하는데 특히 *Pseudomonas*와 *Acinetobacter*의 경우는 냉동상태에서의 방사선 저항성이 6~7배 정도, 무산소 상태를 조합하면 8~9배 정도까지도 저항성이 증가하였다는 보고가 있다.

pH 및 식품의 화학적 조성 : 이온화 방사선의 미생물에 대한 효과는 상당부분 radical에 의한 간접작용에 의하여 나타나므로 pH 등과 식품의 화학적 조성도 미생물의 방사선 감수성에 중요한 작용을 한다. 일반적으로 식품의 화학적 조성이 복잡할수록 방사선에 의하여 세포내부에서 생성되는 radical과의 경쟁이 커지게 되므로 저항성이 증가한다. 호기성 세균 포자의 방사선 저항성은 pH 5~8에서는 큰 영향을 받지 않으나 pH 5이하에서는 감응도가 증가한다. 또한 보존용 염과 같이 전자에 친화성을 갖는 일부 화학첨가물들은 방사선에 대한 감수성을 높이는 작용

을 하는 것으로 알려져 있다.

기타 : 열손상을 받은 세포와 마찬가지로, 방사선을 조사한 후에도 생존한 미생물들은 정상세포에 비하여 환경조건에 보다 민감해진다. 따라서 방사선조사와 미생물을 제어하는 첨가물 등을 병용할 경우 식품의 지속적인 보존에 훨씬 유효한 결과를 기대할 수 있다. 식품의 보존이나 살균을 위한 방사선 에너지의 양은 같은 종의 미생물일 경우 오염된 미생물의 초기농도에 의존한다. 따라서 모든 조건이 같으면 많은 수의 미생물을 불활성화 시키기 위해서는 적은 수의 미생물에 비하여 방사선의 조사선량을 높여야 한다.

미생물의 방사선 감수성

방사선 감수성의 표시 : 방사선조사에 대한 미생물의 감수성은 미생물의 개체수를 1/10로 줄이는데 필요한 방사선량(D₁₀-value)으로 표시한다. 이 값은 아래와 같이 조사선량과 미생물 생존율의 반비례적 직선관계로 나타낼 수 있다.

$$D_{10} = \frac{\text{Dose}}{(\log N_0 - \log N)}$$

여기서 N₀는 미생물의 초기균수이고 N은 방사선조사 후 생존한 미생물의 수이다.

미생물의 생존곡선은 shoulder를 갖게 되므로 방사선에 대한 미생물의 반응은 이 shoulder의 길이(L-값)와 생존곡선의 지수적 변화인 D₁₀-값으로 나타내는 것이 유효하다. 때로는 log 생존곡선으로부터 미생물의 완전사멸선량(inactivation dose)을 계산하여 나타내기도 하는데 일반적으로 10¹² cells/g 수준의 초기미생물을 완전 사멸할 수 있는 방사선의 선량(12D)을 표시한다. 식품미생물은 각 분

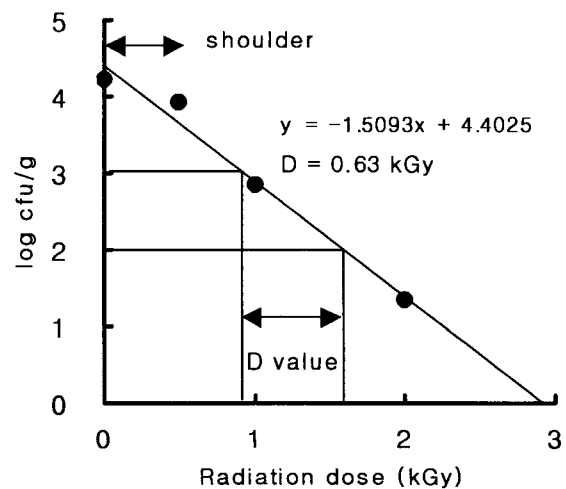


그림 4. 방사선조사 미생물의 D value 표시.

류군에 따라, 또는 같은 종일 경우라도 미생물의 성장상태에 따라 방사선에 대한 감수성이 다르게 나타난다. 여기서 분류군은 원핵세포인 세균, 진핵세포인 곰팡이와 효모, 그리고 바이러스로 대별할 수 있으며 미생물의 성장상태는 영양세포의 성장단계와 포자로 구분하는 것이 보통이다. 일반적으로는 고등 미생물일수록 방사선에 민감하며 포자는 영양세포에 비하여 방사선 저항성이 큰 것이 보통이다.

식품 관련 주요 미생물의 방사선 감수성: 미생물의 방사선 감수성은 미생물 중 자체의 생리적 특성과 환경에 의하여 영향을 받으므로 실제적인 방사선조사선량의 결정은 각 식품 model에서 검증되어야 한다. 식중독을 유발하는 미생물의 종류는 매우 다양하나 통계적으로 *Salmonella*, *Shigella*, *Vibrio*, *Listeria*, *E. coli*, *Campylobacter* 등이 주원인균으로 알려지고 있다. 이중 우리나라의 경우는 *Salmonella*에 의한 식중독이 가장 높은 비중을 차지한다. 일반적으로 대부분의 병원성 세균은 약 5 kGy 수준의 방사선조사에 의하여 사멸이 가능하다. 세균의 포자, 특히 *Clostridium*과 *Bacillus* 속의 세균 포자는 방사선, 열, 화학물질 등에 매우 높은 저항성을 가지며 그 중 일부는 식품의 부패에 직접적으로 관여하고 때로는 식품위생에도 위협요소가 된다. 2002년에 미국 전역을 공포로 몰아넣었던 탄저균도 이 범주에 속한다. 식육의 방사선 멸균에서 *C. botulinum* type A와 B를, 어류의 방사선 살균에서는 *C. botulinum* type E를, 의료기기의 멸균에는 *C. tetani*, *C. perfringens*, *C. septicum* 등의 완전살균을 목표로 한다. 이러한 내생포자의 완전살균에는 일반적으로 30 kGy 내외의 선량이 필요하다.

한편, 영양세포 상태에서도 방사선에 대하여 매우 높은 저항성을 갖는 미생물들이 존재하는데 이를 세균포자와 구분하여 방사선 저항성 세균이라 부른다. 그러나 방사선 저항성 세균들은 대부분 비병원성이며, 다른 균주에 비해 영양 요구성이 매우 까다롭고, 열에 대한 저항성이 없으며, 식품 균총 중 적은 부분을 차지하므로 세균포자에 비하여 식품 위생학적 위협성은 크지 않다.

가장 대표적인 방사선 저항성 세균인 *Micrococcus radiodurans*는 미국 Oregon주의 한 정육공장의 방사선조사 육제품에서 분리되었고 *M. radiophilus*는 10~20 kGy의 선량으로 방사선을 조사한 어류에서 분리되었으며 쌀에서는 상당히 방사선 저항성을 나타내는 *Pseudomonas* 균주가 분리되었다. 이외에도 효모 *Trichosporon oryzae*, 가금류로부터 분리된 *Pseudomonas*와 *Alcaligenes* 등이 방사선 저항성 세균으로 알려져 있다. 방사선 저항성 세균의 특징은 ① DNA의 방어 및 복구능력 ② 방사선에 의한 손상에 대응하는 독특한 형태학적, 화학적 특징(다층의 세

표 4. 주요 미생물군의 방사선 감수성

미생물 및 유기체	유효 살균선량 (kGy)
곤충류	0.22~0.93
바이러스	10~40
곰팡이 (균사)	0.5~3
곰팡이 (포자)	2~8
효모 (발효성)	4~9
효모 (막 형성균)	3.7~18
병원성세균	
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	1.4
<i>Staphylococcus aureus</i>	1.4~7.0
<i>Cornybacterium diphtheriae</i>	4.2
<i>Salmonella</i> spp.	3.7~4.8
그람양성세균	
<i>E. coli</i>	1.0~2.3
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1.6~2.3
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	1.2~2.3
<i>Enterobacter aerogenes</i>	1.4~1.8
그람양성세균	
<i>Lactobacillus</i> spp.	0.23~0.38
<i>Streptococcus faecalis</i>	1.7~8.8
<i>Leuconostoc dextranicum</i>	0.9
<i>Sarcina lutea</i>	3.7
세균포자	
<i>Bacillus subtilis</i>	12~18
<i>Bacillus coagulans</i>	10
<i>Clostridium botulinum</i> (A)	19~37
<i>Clostridium botulinum</i> (E)	15~18
<i>Clostridium perfringens</i>	3.1
<i>Putrefactive anaerobe</i> 3679	23~50
<i>Bacillus stearothermophilus</i>	10~17

포구조 등) ③ 특징적인 에너지 전달기작 ④ 색소형성 등을 들 수 있다. 여기서 DNA에 관한 내용은 DNA가 방사선의 가장 중요한 target이라는 점에 비추어 당연한 결과라 할 수 있으나 색소의 형성은 매우 흥미로운 내용이다. 그러나 아직까지 방사선 저항성 세균의 방사선 저항성에 관한 메카니즘은 불충분한 실정이다.

곰팡이의 균사는 연결된 다핵상으로 되어 있으므로 방사선조사에 의한 D₁₀값을 설정하기가 어렵고 대부분 포자 상태의 D₁₀값을 비교한다. 곰팡이도 세균과 마찬가지로 조사후의 식품의 화학성분이나 환경요소, 곰팡이의 성장상태 등에 의하여 크게 영향을 받는다. 일반적으로 곰팡이의 방사선 감수성은 세균의 영양세포의 수준이다. 곰팡이는 특히 곡류 등의 보존에서 곰팡이독을 형성하는 곰팡이의 살균을 용이하게 수행할 수 있다는 점에서 관심을 끈다. 곰팡이독을 형성하는 대표적인 미생물군인 *Aspergillus*와 *Penicillium*속 곰팡이들의 감마선에 대한 D₁₀값은 0.2~0.4 kGy 범위로 감마선 조사에 의하여 비교적 쉽게 살균할

수 있는 수준이다. 일반적으로 식품의 발효나 부패에 관여하는 *Saccharomyces*, *Candida* 등의 효모는 0.3 kGy 내외의 D_{10} 값을 가지나 *Trichosporon* 등과 같이 1.2~1.6 kGy의 D_{10} 값을 갖는 방사선 저항성 효모도 관찰된다.

바이러스는 식품의 부패와는 유의성 있는 연관관계가 적어 최근까지도 식품보존의 관점에서는 논의의 주요 대상이 아니었다. 그러나 사람 또는 가축의 바이러스성 질환의 증가로 인하여 식품 위생 관점에서의 바이러스 제거가 관심을 끌게 되었다. 방사선 식품 조사에 있어 바이러스 문제가 부각된 것은 1960년대 중반부터이며 이후의 연구 결과 방사선조사는 바이러스의 유입을 줄일 수 있는 것으로 확인되었다. 바이러스의 방사선 저항성은 비교적 높은 편이며 바이러스 그룹간의 방사선 저항성도 차이가 크다. 일반적으로 한 가닥의 핵산을 갖는 바이러스는 두 가닥의 핵산을 갖는 바이러스보다 10배정도 높은 감수성을 나타내고, 큰 genome을 갖는 것은 작은 genome을 갖는 것보다 감수성이 5배정도 높게 나타난다. 바이러스의 방사선 저항성은 세균이나 곰팡이에 비하여 주변 환경에 더 크게 영향을 받는다. Bacteriophage T7은 0.4~6.4% 범위의 nutrient broth 농도에서 저항성이 10배 정도 증가한다. 그러나 식품 생산물 중의 바이러스는 전통적인 가열공정에 의해 비교적 쉽게 불활성화 되어지므로 가열공정처리와

방사선조사의 병용처리 등이 권장되고 있다.

결 론

식품에서 유래한 질병의 발생은 아직도 여전히 인류의 삶의 질을 크게 위협하고 있으며 오히려 사회구조의 변화와 더불어 점차 대형화되는 추세에 있다. 식품의 방사선조사기술은 유해미생물에 대하여 선택적으로 강력한 살균 효과를 나타내며 식품의 생화학적 변화를 최소화하고 식품위생학적 위해성도 나타내지 않는 매우 안전하면서도 유용한 식품 위생화 기술이다. 그러나 방사선조사식품의 산업화를 위해서는 생산자와 소비자의 이해 증진이 필수적이므로 이를 뒷받침하기 위한 제반 연구의 활성화와 기술적 인프라의 확보가 요구된다. 향후, 식품조사기술에 대한 정확한 정보의 확산과 소비자 교육, 교역 대상 국가와의 조사식품 교역증진 연구, 정부기관-산학연-소비자단체 등이 공동으로 참여하는 조사식품 연구 및 교육프로그램의 개발 등이 진행되면 식품 방사선조사기술의 활용은 자연스럽게 확산될 것으로 전망된다. 식품에 대한 방사선조사기술이 식품산업의 발전과 국민보건 및 삶의 질 향상에 기여할 수 있기를 기대한다.

표 5. 곰팡이 포자의 방사선 저항성

Mould	Gamma-irradiated (kGy)	Electron-irradiated (kGy)	Values not significantly different (p<0.005, Student <i>t</i> -test)
<i>Aspergillus echinulatus</i>	0.319	0.241	
<i>A. fumigatus</i>	0.276	0.198	m
<i>A. glaucus</i>	0.250	0.243	×
<i>A. niger</i>	0.245	0.199	
<i>A. ochraceus</i>	0.209	0.198	×
<i>A. versicolor</i>	0.282	0.234	×
<i>Penicillium aurantiogriseum</i>	0.236	0.194	×
<i>P. cyclopium</i>	0.397	0.290	
<i>P. granulactum</i>	0.239	0.201	
<i>P. roqueforti</i>	0.416	0.341	
<i>P. verrucosum</i>	0.266	0.208	
<i>P. viridicatum</i>	0.333	0.265	×
<i>Curvularia geniculata</i>	1.798	1.193	
<i>Alternaria alternate</i>	2.409	1.099	

표 6. 효모의 방사선 저항성

Yeast	Condition	Induction dose (shoulder) (kGy)	D_{10} -value (kGy)
<i>Candida</i> sp. V3-1	Air-bubbling	0	0.32
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> 52A	Air-bubbling	0.32	0.36
<i>Pullularia pullulans</i>	Air-equilibrium	0.2	1.6
<i>Trichosporon</i>	Air-bubbling	2.5~3.0	1.2
<i>oryzae</i> nov. op. R1	Air-bubbling	3.0~3.5	1.6

표 7. 바이러스의 방사선 저항성 (0.5°C 감마선 조사)

Virus	Nucleic acid		D-Values (kGy) ²⁾	
	Type	Strands ¹⁾	MEM [®] ³⁾	Distilled water
Adenovirus	DNA	D		-
2			4.1	-
3			4.9	-
5			4.4	-
12			4.6	-
Simian virus 40	DNA	D	4.5	-
Herpes simplex virus	DNA	D	4.3	-
Reovirus 1	RNA	D	4.4	-
Poliovirus	RNA	S		
1			4.9	-
2			5.0	-
3			4.8	1.1
Influenza virus A	RNA	S	4.6	1.0
Coxsackievirus	RNA	S		
A-9			4.6	1.2
A-11			4.8	-
B-1			4.1	-
B-2			4.5	1.4
B-3			4.3	-
B-4			5.0	-
B-5			4.1	-
Echovirus	RNA	S		
4			4.6	-
5			4.9	-
6			5.1	-
7			5.5	-
9			5.0	-
11			4.3	1.4
12			5.0	-
18			4.4	-
Newcastle disease virus	RNA	S	5.2	-

¹⁾Double (D) or single strand (S).

²⁾The D-value is defined as the amount of gamma radiation required to reduce the number of virus plaque-forming units by 90%.

³⁾MEM[®]-minimal essential medium containing 2% fetal bovine serum (pH 7).

참고문헌

- Ahn HJ, Yook HS, Rhee MS, Lee HY, Cho CJ, Byun MW. 2002. Application of gamma irradiation on breakdown of hazardous volatile N-nitrosamines. *J Food Sci* 67: 596-599.
- Al-kahtani HA, Abu-tarbouch HM, Atia M, Bajaber AS, Ahmed MA, El-mojaddidi MA. 1998. Amino acid and protein changes in tilapia and Spanish mackerel after irradiation and storage. *Radiat Phys Chem* 51: 107-114.
- Aliste AJ, Vieira FF, DelMastro NL. 2000. Radiation effects on agar, alginates and carrageenan to be used as food additives. *Radiat Phy Chem* 57: 305-308.
- Byun MW, Lee JW, Yook HS, Lee KH, Kim KP, Lee CH. 1999. Harmonized regulations for international trade of irradiated food in Asia and Pacific regions. *Food Sci Ind* 32: 82-87.
- Byun MW. 1997. Application and aspect of irradiation technology in food industry. *Food Sci Ind* 30: 89-100.
- Byun MW. 1994. Application of irradiation techniques to food industry. *Radioisotope News* 9: 32-37.
- Byun MW, Kim DH, Yook HS, Kim JO, Cha BS. 2001. Changes of microbiological and general quality characteristics of gamma irradiated *Doenjang* (fermented soybean paste). *Food Sci Biotechnol* 10: 7-11.
- Doyle ME, Steinhart CE, Cochran BA. 1993. *Food Safety*. Marcel Dekker, New York, USA. p 254-259.
- Filali-mouhim A, Audette M, St-louis M, Thauvette L, Denoroy L, Penin F, Chen X, Rouleau N, Le Caer JP, Rossier J, Potier M, Le Maire M. 1997. Lysozyme fragmentation induced by γ -radiolysis. *Int J Radiat Biol* 72: 63-70.
- IAEA. 2003. IAEA/RCA Project Review and Formulation Meeting on Food Irradiation for Food Security, Safety and Trade. '03. January 20-24. Quezon, Philippines.

11. ICGFI. 2002. The 19th Annual Meeting of the International Consultative Group of Food Irradiation (ICGFI). '02. November 12-14. Vienna, Austria.
12. ICGFI. 1991. Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Vienna, Austria. "Facts about Food Irradiation", A series of Fact Sheets from the International Consultative Group on Food Irradiation.
13. International Atomic Energy Agency. 1992. Irradiation of spices, herbs and other vegetable seasonings. IAEA-TECDOC-639.
14. Jo C, Lee JW, Byun MW. 2001. Short communication of novel application of food irradiation. *J Food Sci Nutr* 6: 253-256.
15. Jo C. 2002. Development of processing method for highly pure natural materials by radiation technology. *Neutopia* 30: 6-7.
16. Kim DH. 1998. Studies on the model systems of Korean traditional soy sauce using the soybean cereals fermented. *PhD Thesis*. Chonnam National Univ., Korea.
17. Kwon JH, Chung HW, Kwon YJ. 2000. Infrastructure of quarantine procedures for promoting the trade of irradiated foods. Paper presented at Symposium of The Korean Society of Postharvest Science and Technology of Agricultural products on Irradiation Technology for the Safety of Food and Public Health Industries and Quality Assurance. p 209-254.
18. Lee JW, Yook HS, Lee KH, Kim JH, Kim WJ, Byun MW. 2000. Conformational changes of myosin by gamma irradiation. *Radiat Phys Chem* 58: 271-277.
19. Loaharanu P. 1998. International developments of food irradiation and consumer acceptance of irradiated food. *Food Sci Ind* 31: 11-18.
20. Ministry of Agriculture and Forestry. 1997. Technology development on low-salted and fermented seafoods and hygienic packaging. Ministry of Agriculture and Forestry Final Report. G1228-0889.
21. Olson DG. 1998. Irradiation of food. *Food Technol* 52: 56-62.
22. Shea KM, Balk SJ, Gitterman BA, Miller MD, Shannon MW, Weil WB, Galson SK, Linet M, Miller RW, Rogan W, Coven B, Bearer CF, Etzel RA, Goldman L, Halbrook B, Kaferstein F, Keener K, Thayer DW, Hall LA. 2000. Technical report: Irradiation of food. *Pediatrics* 106: 1505-1510.
23. Thayer DW. 1994. Wholesomeness of irradiated foods. *Food Technol* 48: 58-67.
24. UNEP. 1995. *Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer*. 1994 Report of the Methyl Bromide Technical Options Committee. p 294.
25. WHO. 1981. *Wholesomeness of irradiated food*. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. Tech Rep. 651. World Health Organization, Geneva.
26. WHO. 1994. Food irradiation. In *Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food*. Ch. 2. World Health Organization, Geneva. p 5-13.
27. WHO. 1999. High-dose irradiation: Wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, WHO Technical Report Series 890, Geneva, Swiss.
28. WHO. 1992. Review of the safety and nutritional adequacy of irradiated food. WHO/HPP/FOS/92.2.