
식품방사선조사 최근 동향

2008. 4

- 목 차 -

1. 방사선조사식품이란
2. 식품방사선조사 기술
3. 식품방사선조사의 이용분야
4. 식품방사선조사의 안전성
5. 방사선조사식품의 영양적 품질
6. 방사선조사식품의 포장
7. 식품방사선조사 비용
8. 방사선조사식품의 교역
9. 식품방사선조사의 국제적 이용 현황
10. 식품방사선조사의 규제 현황
11. 방사선조사식품의 검지방법

1. 방사선조사식품이란

방사선조사식품이란 발아억제, 숙도조절, 식중독균 및 병원균의 살균, 기생충 및 해충사멸 등을 위하여 이온화 에너지로 처리한 식품을 말한다. 방사선조사란 특정한 종류의 에너지를 이용하여 포장된 식품이나 대용량의 식품에 일정 시간 노출시킴으로써 식품의 보존성 및 안전성을 향상시키는 기술이다.

방사선조사는 방사능오염과는 엄연히 다르다. 방사능오염식품은 핵 반응기의 누출사고나 핵실험시 발생된 방사능물질에 의하여 비의도적으로 오염된 식품으로써, 방사선조사식품과는 전혀 다르다. 방사선조사 과정에서 식품을 얼마나 오래 노출시키든지, 또 식품에 얼마나 많은 에너지가 흡수되는지 관계없이 식품의 방사능은 증가하지 않는다.

2. 식품방사선조사 기술

가. 방사선

방사선은 방사성동위원소로부터 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 발생시키는데, 이러한 성질을 가진 방사선이 전리방사선(ionizing radiation)이다. 이러한 전리방사선에는 γ 선, 전자선, X선, 자외선, α 선, 중성자선 등이 있는데, 이들 중 X선과 감마선은 매우 짧은 초단파장이고 높은 에너지를 갖는 전자기파이다. 이는 우리가 일상생활에서 쉽게 접하고 있는 microwave나 라디오/TV전파, 자외선, 가시광선, 적외선 등과 같은 범주에 속한다.

식품조사에서 피조사체 식품에 대한 방사선 조사량은 국제단위계(SI)의 방사선 흡수선량(absorbed dose)으로 나타내며, 그 단위는 Gy(gray, 그레이)가 사용된다($1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ joule/kg}$). 1 rad(radiation absorbed dose)는 피조사체의 종류에 관계없이 물질 1 g당 100 erg의 에너지를 흡수하였을 때를 의미한다. 식품조사에서 조사량의 단위는 흡수선량으로 rad가 사용되었으나 현재는 Gy가 사용되고 있다.

표 1. 방사선량과 방사능의 단위

	흡수선량	방사능
단위	gray(Gy)	becquerel(Bq)
정의	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegration/sec}$
이전 단위	rad	curie(Ci)
변환	$1 \text{ Rad} = 0.01 \text{ Gy}$ $1 \text{ krad} = 10 \text{ Gy}$ $1 \text{ Mrad} = 10 \text{ KGy}$	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$ $1 \text{ kCi} = 37 \text{ TBq}$ $1 \text{ mCi} = 37 \text{ PBq}$

식품의 방사선조사는 넓은 의미에서는 광합성, 천일건조, 숯불구이, 전기구이,

마이크로웨이브 가열, 자외선 살균, X-선/전자선/감마(γ)선 조사 등 모든 형태의 방사선 조사를 포함하게 된다. 그러나 현재 관련 국제기구(FAO/WHO/IAEA)와 Codex 국제식품규격위원회에서 안전하게 식품조사에 이용될 수 있다고 밝힌 방사선은 감마선, 전자선 및 X-선이다. 이 중 식품조사에 직접 활용되는 방사선은 감마선과 전자선이며, 감마선의 사용비율이 80%, 전자선이 20%를 차지하고 있다.

표 2. 식품조사에 사용되는 방사선의 종류

방사선	선 원	반감기	이용에너지(MeV)
감마(γ)선	^{60}Co ^{137}Cs	5.3년 30년	1.17~1.33 0.06
전자선	전자가속기에서 발생		10MeV 이하
X선	기계적으로 발생		5MeV 이하

식품조사에 이용될 수 있는 방사선 에너지의 특징을 살펴보면 현재 이용률이 가장 높은 감마선의 경우 우수한 투과력을 지니고 있어서 식품이 포장된 상태에서도 살균, 살충 효과를 거둘 수 있어 연속처리가 가능하고 재포장에 따른 2차오염의 위험이 없다. 전자가속기(electron accelerator)에서 발생하는 전자선은 감마선에 비해 투과력이 약하여 적용범위가 제한되지만 곡류, 육류 등의 표면살균에 이용이 가능하다. 특히 전자선은 에너지 발생이 전원에 의해 조절되고 공정제어, 신속성, 에너지 효율성, 소비자 수용성 등의 측면에서 장점이 있으므로 미국 등 선진국에서는 전자선의 이용 연구 및 실용화가 활발히 추진되고 있다. 그러나 X-선은 전자선으로부터 전환되는 에너지의 발생 효율이 낮아 실제적으로 이용률이 낮다.

나. 방사선조사 기술

식품조사기술은 방사선의 생물학적 작용으로 근채류 농산물(감자, 마늘, 양파, 밤 등)의 발아 및 발근 억제, 과일 등의 숙도지연, 식품의 부패균/병원균 사멸 등과 같은 식품의 저장성 및 안전성을 증진시키는 다양한 효과를 얻을 수 있다. 이러한 생물학적 작용기작은 직접작용설(direct theory), 즉 표적설

(target theory)과 간접작용설(indirect theory)로 설명된다.

먼저 직접작용설은 생물체의 세포나 그 밖의 표적물질에는 방사선에 대해 감수성이 높은 부분(DNA 등)이 존재하므로 여기에 방사선 에너지가 직접 유효한 전리작용을 일으켜 생물학적 효과를 가져온다.

간접작용설은 생체 내에 세포구조를 둘러싸고 있는 물이나 전리 생성물(이온이나 유리기 등)이 2차적으로 세포생활에 필요한 물질 또는 그 구조에 화학적 변화를 일으켜 간접적으로 생물학적 작용을 나타내는 학설로 설명된다.

일반적으로 식품 및 생체에 대한 방사선의 작용은 이상의 두 가지 작용이 동시에 일어나는 것으로 이해되며, 따라서 피조사체 식품의 수분함량(건조상태), 생리적 상태(숙도, 저장기간), 공존물질, 조사 시 온도, 조사시 환경(산소 존재 여부) 등에 의해 방사선의 생물학적 작용이 상이하게 나타날 수 있다.

방사선 식품조사는 에너지 소요량이 적은 장점을 가지고 있다. 즉, 2.5 kGy 조사시 21 kJ/kg의 에너지가 소요되는 반면, 가열살균, 조리(93℃), 냉동(-25℃, 3.5주) 및 냉장(0℃, 5.5일간) 가공은 각각 918 kJ/kg, 25558 kJ/kg, 5149 kJ/kg 및 157 kJ/kg의 에너지가 소요된다. 방사선 조사식품은 비열처리(non-thermal treatment), 냉온살균(cold pasteurization) 가공법으로 처리식품의 내부온도 상승이 거의 없어 식품의 물성, 영양 및 관능적 품질의 변화를 최소화 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 즉, 10 kGy 처리시 비열이 물과 동일한 경우 2.4℃ 정도의 낮은 온도상승이 일어나 냉장, 냉동식품의 위생화 처리에도 아주 적합하다.

다. 방사선조사시설

식품방사선조사 시설은 조사목적에 따라 시설의 구조가 달라지며, 정치형과 연속형 2종류로 구분할 수 있다. 정치형은 방사선조사 전에 정해진 양의 식품을 정확하게 일정시간 조사하며 조사 후 식품을 조사실에서 꺼내고 새로운 식품을 넣어 새로 조사를 행한다. 연속형은 모든 식품에 대해 설정된 선량이 조사되도록 계산하여 일정한 속도로 식품이 연속적으로 조사실을 통과한다.

정치형 조사시설은 연속형에 비해 구조 또는 조작이 간단하고, 한 종류의 식품을 일정한 선량으로 조사하는데 적합하다. 식품산업에서는 규모의 장점 때문에 연속형 조사시설이 많이 사용된다. 연속형은 선량을 더욱 균일하게 한 다거나 선원 이용을 효율적으로 하기 위하여 식품이 여러 방향에서 감마선을 조사할 수 있도록 되어 있다.

신선도를 유지해야 하는 식품이나 수확 후 가공까지의 시간이 많이 소요되는 식품에 대해서는 이동식 조사장치가 유용하게 사용된다.

현재 식품방사선조사에 직접 활용되는 방사선은 감마선과 전자선으로 감마선과 전자선 조사시설의 예시는 그림과 같다.

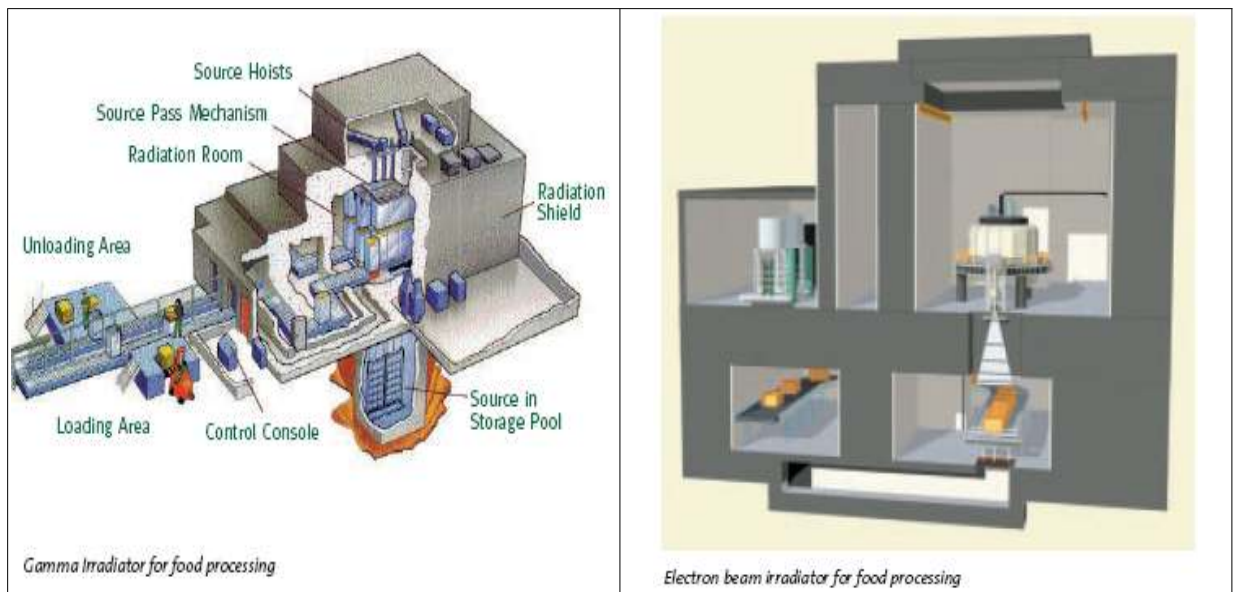


그림 1. 감마선 조사시설과 전자빔 조사시설

감마선 조사 시설은 제품을 정리하여 알루미늄 커리어에 넣는 준비단계(조사실 밖)와 감마선조사가 이루어지는 처리 단계(조사실 안)로 구분할 수 있으며, 감마선조사가 이루어지는 조사실은 2미터 두께의 철근콘크리트 벽으로 밀폐되어 있다.

알루미늄 커리어에 들어간 제품을 레일을 따라 조사실 안으로 들어가며, 조사실 한가운데에는 감마선을 발생하는 코발트-60이 부착된 패널이 있다. 레일은 패널 주위를 360도로 회전하도록 설계되어 제품이 패널을 도는 동안 구

석구석 살균되도록 되어있다.

감마선은 천천히 조금씩 제품에 투과되며, 한번 조사하는데 소요되는 시간은 제품에 따라 15~28시간 가량이다. 제품의 특성에 따라 조사 시간, 조사 강도 등이 달라지며, 공정이 없을 때에는 방사선동위원소가 부착된 패널은 방사선 차폐용 물탱크에 보관된다.

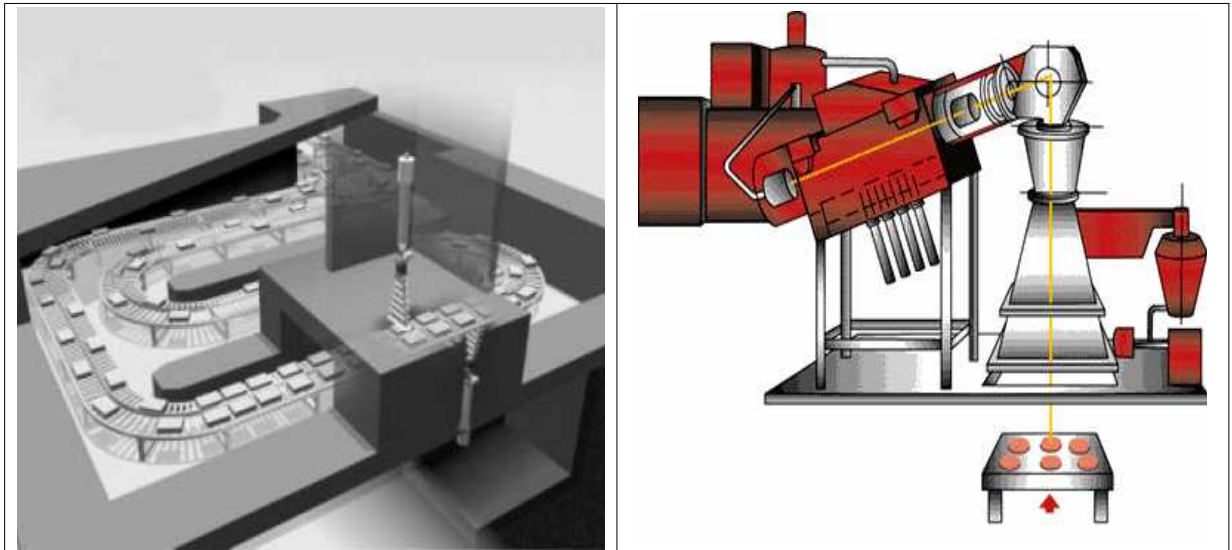


그림 2. 미국 아이오와주의 전자빔 육류 저온살균 시설

미국 아이오와주에서 2000년도부터 가동되기 시작한 전자빔 육류 저온살균 시설(선형가속시설)은 연간 20만톤의 ground meat를 조사할 수 있다.

각각의 조사시설은 조사를 하고자 하는 식품의 유형이나 형태 등에 따라 다르게 설계될 수 있다. 대량의 곡류에 대해 감마선 방사선조사를 할 수 있는 설비는 아래와 같이 설계할 수 있다.

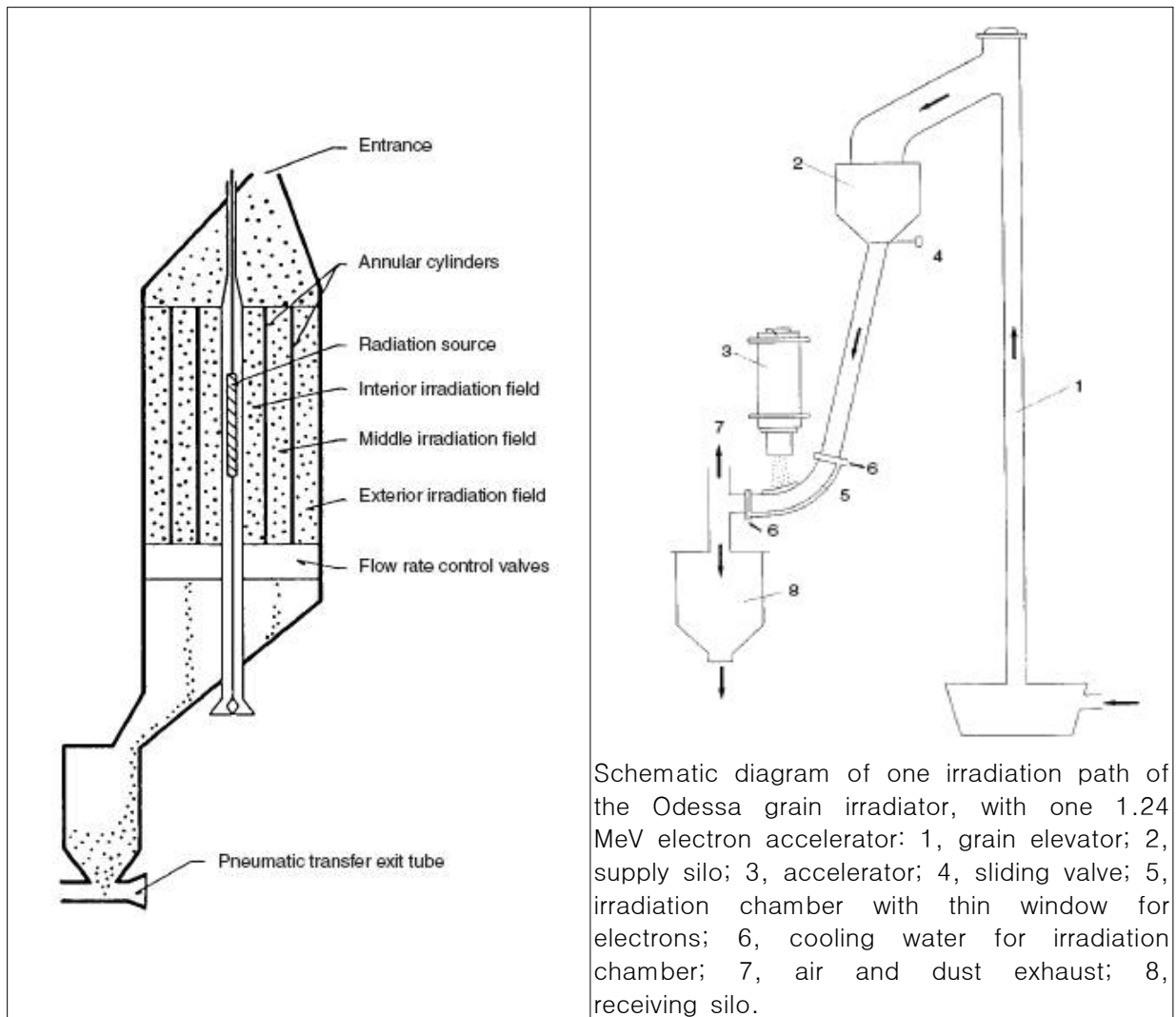


그림 3. ^{60}Co 감마선을 이용한 곡류 방사선조사시설 예시

2001년 기준으로 전세계 연구용 감마선 조사시설은 207기, 상업용 감마선 조사시설은 52개국에서 234기가 가동되고 있으며, 수십 기의 감마선 조사시설이 건설되고 있다.

표 3. 국가별 상업용 감마선 조사시설 보유 현황(2001년 기준)

No.	국가명	시설수	No.	국가명	시설수	No.	국가명	시설수
1	미국	55	16	캐나다	3	31	이집트	1
2	중국	54	17	호주	2	32	크로아티아	1
3	일본	16	18	벨기에	2	33	오스트리아	1
4	독일	11	19	인도네시아	2	34	아르헨티나	1
5	영국	7	20	이스라엘	2	35	칠레	1
6	러시아	7	21	헝가리	2	36	네덜란드	1
7	프랑스	6	22	멕시코	2	37	그리스	1
8	이탈리아	6	23	스리랑카	2	38	이란	1
9	남아프리카	5	24	스위스	2	39	스코틀랜드	1
10	말레이시아	5	25	태국	2	40	사우디아라비아	1
11	브라질	5	26	싱가포르	2	41	노르웨이	1
12	인도	4	27	한국	2	42	파키스탄	1
13	아일랜드	4	28	불가리아	1	43	스페인	1
14	덴마크	3	29	체코	1	44	페루	1
15	스웨덴	3	30	방글데시	1	45	대만	1

3. 식품방사선조사의 이용분야

식품산업에서 방사선 조사기술은 크게 세 가지 부분에 이용된다.

첫째는 해충 및 부패유기체의 생육억제로 식량자원의 장기 안전저장이 가능하다. 따라서 방사선을 이용하여 식량의 저장방법을 개선함으로써 10~30% 이상의 간접증산의 효과를 얻을 수 있다.

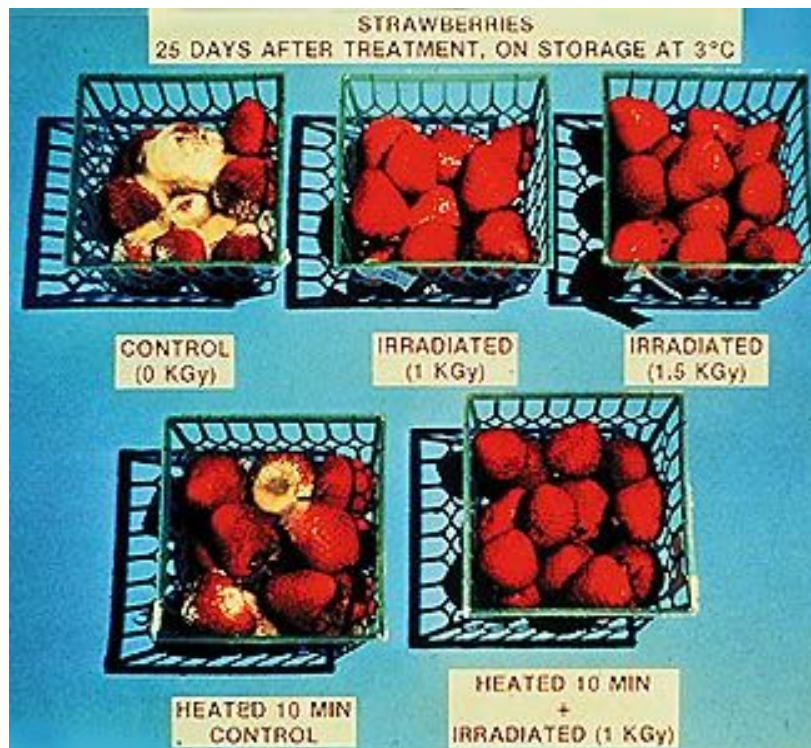


그림 4. 딸기의 저장성에 대한 방사선조사의 효과

둘째로 병원성 미생물 사멸로 더욱 안전한 식품생산과 식품 매개성 질병예방에 기여한다. 식품에서의 E. coli O157:H7, Listeria, Salmonella 등의 병원성 세균과 Toxoplasma, Trichinella 등과 같은 기생충의 오염은 인류건강에 가장 큰 위협 가운데 하나로 작용하며 식품의 방사선 조사는 원료식품에 광범위하고 필연적으로 오염되어 있는 병원성 유기체를 사멸시키므로 식품의 안전성 확보에 가장 중요한 이익을 가져다주는 방법으로 평가되고 있다.

표 4. 식품에 존재하는 기생충 사멸을 위한 방사선조사선량

학 명	일 반 명	적용선량(kGy)
<i>Toxoplasma gondii</i>	톡소포자충	0.25
<i>Trichinella spiralis</i>	선모충	0.30
<i>Cysticercus bovis</i>	무구낭미충	0.4 ~ 0.6
<i>Cysticercus</i>	낭미충	0.4 ~ 0.6

표 5. 선량별 방사선조사 대상식품 및 조사효과

	조사목적	조사선량 (kGy)	대상식품	조사효과
저 선 량 조 사	발아/발근억제	0.05~0.15 (0.25)	감자, 양파, 고구마, 파, 마늘, 생강, (밤) 등	저장기간 연장, 공급 안정화
	해충/기생충 방제	0.15~1.0	곡류, 콩류, 신선 과채류, 건조과일, 건조생선, 건조육, 돼지고기, 대추, 야자, 카카오, 육류 등	저장기간 연장, 위생화, 유통 확대
	숙도지연	0.5~2.0	바나나, 파파야, 망고 등 신선 과일, 채소, 버섯 등	유통확대, 저장기간 연장
중 선 량 조 사	부패균/병원균 살균	1.0~10.0	생선, 딸기, 수산가공품, 육류가공품, 냉동새우 등 생선, 냉동 개구리 다리, 가금육 등	위생화, 저장기간 연장
	식품특성 개선	1.0~10.0	건조곡류, 야채, 위스키, 포도주스 등	가공에너지 절약, 생산성 향상
고 선 량 조 사	식품소재/첨가물 살균	3.0~50.0	향신료, 건조채소류, 효소제제, 천연검 등	위생화, 저장기간 연장
	살균	3.0~50.0	육류, 가금육, 수산가공품, 환자식, 우주식 등	위생화, 저장기간 연장

셋째로 식품의 방사선 조사는 세계적으로 인체에 미치는 유해성으로 사용이 금지되고 있는 보존제나 훈증처리와 같은 화학약품처리의 대체방법으로 식량

자원의 해충사멸 및 공중보건상 국제식량교역에서 선진 검역 관리기술로써 매우 효과적인 방법으로 이용되고 있다.

표 6. 검역관리시 해충별 방사선조사선량

학 명	일 반 명	적용선량(kGy)
<i>Bactrocera dorsalis</i>	Oriental fruit fly	0.25
<i>Ceratitis capitata</i>	Mediterranean fruit fly	0.23
<i>Bactrocera cucurbitae</i>	Melon fly	0.21
<i>Anastrepha suspense</i>	Caribbean fruit fly	0.15
<i>Anastrepha ludens</i>	Mexican fruit fly	0.15
<i>Anastrepha oblique</i>	West Indian fruit fly	0.15
<i>Anastrepha serpentina</i>	Sapote fruit fly	0.15
<i>Bactrocera tyroni</i>	Queensland fruit fly	0.15
<i>Bactrocera jarvisi</i>	(No common name)	0.15
<i>Bactrocera latrifons</i>	Malaysian fruit fly	0.15

4. 식품방사선조사의 안전성

가. 방사선조사의 안전성

방사선 조사 식품의 안전은 세계보건기구(WHO), 국제식량농업기구(FAO), 미국농무성(USDA), 미국 식품의약품청(FDA), 국제원자력기구(IAEA), 국제식품안전센터(NCFS) 등의 국제기구에서 50년 이상의 세계 각국의 수많은 연구자들의 검증결과, 안전성이 입증되었다.

1980년 세계보건기구, 국제식량농업기구 그리고 국제원자력기구 공동의 국제식품조사 공동자문위원회에서는 “법적 규제치 이하의 방사선 처리 식품은 독성학적 장애를 일으키지 않으며, 더 이상의 독성실험은 필요치 않다”는 결론을 내린 바 있다.

또 1992년 세계보건기구와 세계소비자연맹(IOC) 공동으로 방사선 조사 식품의 안전성을 재확인하였으며 1997년 FAO/IAEA/WHO 공동주최로 개최된 방사선 조사식품의 안전성에 관한 전문가회의에서는 “기존 허용기준보다 10배 이상의 선량에서도 건강상의 위험은 없다”는 결론을 내렸다.

나. 방사선조사식품의 안전성에 대한 Q&A

IAEA 자료를 근거로 방사선조사 식품의 안전성에 대해 Q&A 형식으로 알아보자.

Q : 방사선조사 결과 식품이 방사능을 갖게 하는가?

A : 그렇지 않다. 방사선조사는 식품이 방사능을 띠게 만들지 않는다. 식품을 비롯하여 우리 환경에 있는 모든 것이 미량의 방사능을 가지고 있다. 이 미량의 천연 방사능(150~200 becquerels/kg)이 우리의 식이에서 피할 수 없는 부분이다. 식품 방사선조사를 허용한 국가는 방사선조사의 종류와 그 에너지량을 규제되고 관리한다. 방사선조사는 식품을 방사선 필드에 일정한 속도로 통과시켜 식품에 흡수되는 에너지량이나 방사선량을 조절한다. 식품 자체는 방사선원에 절대로 직접 접촉되지 않는다. 전자선 및 X-선을 이용한 방사선조사 기기에 허용된 최대 에너지량은 각각 10MeV

와 5MeV이다. 식품이 이들 기기로부터 매우 높은 양의 방사선에 노출된다 하여도 최대 방사능 수준은 식품 1kg 당 0.001 becquerel에 불과하다. 이 양은 식품에 자연적으로 존재하는 방사능 수준보다 20만 배나 적은 양이다. 방사선조사 식품은 공항의 X-선 스캐너를 통과하는 화물이나 X-선 촬영을 한 치아보다도 더 적은 양의 방사능을 이용하는 것이다.

Q : “방사선조사식품”과 “방사능오염식품”의 차이는 무엇인가?

A : 방사선조사식품은 특정한 방사선 에너지에 의도적으로 노출시켜 식중독균을 사멸시키거나 발아를 억제하는 등의 목적하는 특성을 얻고자 하는 것인데 반해, 방사능 식품은 무기 실험이나 핵반응기 사고로 인해 비의도적으로 방사능물질에 오염된 식품을 말한다. 이런 종류의 오염은 보존 또는 기타 목적을 위해 조사된 방사선조사식품과는 전혀 다른 것이다.

Q : 방사선조사식품이 유독할 수도 있는가?

A : 1940년대 후반 방사선조사가 식품제조공정에 적용되기 이전에 방사선조사식품에 대한 독성학적 조사의 필요성이 제기되었다. 사실상 1926년의 독일에서 수행한 연구에서 방사선조사가 동물 식이에서 독성 요인을 생성하지 않는다는 결론을 내린 바 있었다. 이를 검증하기 위한 표준 절차는 실험동물에게 테스트 식품을 섭취시키고 수명, 생식력, 암 발생, 기타 동물 보건 지표 등에 미치는 영향을 조사하였다.

지난 40여년 간 실험동물을 대상으로 수백 건의 독성학적 연구가 실시되었다. 지난 50여년 간 중국, 독일, 인도, 일본, 태국, 영국, 미국 등지에서 다양한 방사선조사식품의 동물 섭취 연구가 실시되었다. FAO, IAEA, WHO는 1964, 1969, 1976, 1980년에 방사선조사식품의 건전성에 대한 합동 전문가 위원회를 개최하여 방사선조사식품 섭취의 안전성을 평가하였다. 덴마크, 프랑스, 네덜란드, 일본, 영국, 미국 등의 국가에서는 자국의 전문가 그룹이 독립적으로 이러한 평가를 실시하여 방사선조사식품의 섭취 결과 독성 영향을 나타내지 않음을 증명하였다. 1992년 또 다른 전문가 협의회가 WHO를 위하여 1980년 이후 이용가능한 모든 문헌과 데이터를 평가하기도 하였다. 그 결과 기존의 연구 결과가 재확인되었다. 1997년 9월에 WHO, FAO, IAEA가 합동으로 연구 그룹 회의를 개최하여 고선량 방사선조사를 한 식품의 건전성을 평가하였다. 이 그룹의 전

문가들은 10kGy 이하의 선량을 조사한 식품에 대해 “독성학적 관점에서 이러한 식품의 섭취가 인체 건강에 부정적 영향을 나타내지 않을 것이다”라는 결론을 내렸다.

방사선조사식품에 대한 수많은 연구 가운데 미국의 Raltech 연구소가 실시한 연구들은 통계학적으로 가장 훌륭한 연구로 꼽힌다. 이 연구 중 코발트-60이나 electron machine을 이용하여 닭고기에 58kGy까지 방사선조사를 한 연구도 있었다. 닭고기의 고선량 방사선조사와 고열멸균처리 효과를 비교하기 위해 약 134톤의 계육 또는 25만 마리의 닭이 사용되었다. 이 연구는 쥐와 개를 대상으로 장기 섭취 연구, 최기형성 연구, 돌연변이성 테스트 등을 포함하고 있다. 1980년대 중반 닭고기에 대한 저선량 방사선조사 허가 신청이 접수된 시점에 미국 FDA의 과학자들은 포괄적인 리뷰 결과, 고선량 방사선조사를 실시한 닭고기를 섭취하였을 때의 부작용은 없다고 밝혔다. 제대로 설계된 수많은 연구들에서 방사선조사 처리 관련 영향이 없었다는 점은 방사선조사 식품의 섭취가 위해를 나타내지 않음을 추가로 보장하는 것이었다.

다양한 종류의 포괄적 식이 테스트도 실시되었다. 지난 20여년간 수백만 마리의 마우스, 랫트, 기타 실험동물들이 사육되었고 방사선조사식품만을 섭취시켰다. 호주, 오스트리아, 캐나다, 프랑스, 독일, 일본, 스위스, 영국, 미국 등의 연구기관에서 실시한 연구에서 25~50kGy 선량으로 처리한 식이를 섭취시켰다. 방사선조사 식이 섭취로 인한 어떠한 유전적 결함(최기형성 또는 암발생 요인)도 관찰되지 않았다.

Q : 방사선조사식품 섭취가 염색체 이상을 유발하는가?

A : 방사선조사식품 섭취로 인한 염색체 이상 문제는 다른 어느 것보다도 민감한 문제였다. 이 주장은 방사선조사 직후 밀로 만든 제품을 섭취한 결과 “염색체 배수화(polyplidy)”를 유발하는가에 초점이 맞춰졌다. 배수화는 세포 내에 두 배 이상의 염색체가 발생함을 의미한다. 인체의 세포는 보통 46개의 염색체를 가진다. 만약 배수화가 유발될 경우 92개 또는 138개의 염색체가 생긴다. 배수화 세포의 발생은 자연적으로도 발생하며, 개인별로 다르며, 심지어 한 사람에게서 날마다 달라지기도 한다. 한 개인의 기관마다 다를 수도 있다. 배수화의 생물학적 중요성은 알려지지

않았다. 배수화에 관한 연구 수행시 방사선조사처리 영향을 조사하기 위해 수 천 개의 세포들이 카운트되었다. 배수화 세포가 드물기 때문에 정확한 결론이 도출되기 전에 충분한 세포를 관찰하는 것이 필수적이다. 배수화 세포를 확인하는 것은 극히 어렵다. 현미경 슬라이드에 정상 세포가 포개져 있을 경우에는 배수화 세포처럼 보이기 십상이다.

1970년대 중반 인도의 Hyderabad의 국립영양연구소(NIN)의 연구진이 실시한 연구에서는 영양결핍 어린이, 랫트, 마우스, 원숭이에게 0.75kGy 방사선조사 직후의 밀로 만든 식품 섭취시 배수화 세포 빈도가 증가한다고 보고하였다. 그러나 이 보고서를 자세히 조사한 결과 각 그룹의 다섯 어린이 각자에서 100개의 세포만을 카운트하여 결론에 대한 신뢰성이 없었다. 또한 각 그룹의 결과를 평균치로 밝혀 각 어린이의 실제 발생수를 확인할 수 없었다. 밀을 방사선조사하여 섭취 전 12주간 보관하였을 때는 배수화가 전혀 나타나지 않았다.

많은 연구소에서 인도 국립영양연구소(NIN)의 연구 결과를 재현해 보기 위해 노력하였다. 일부에서는 45kGy의 고선량 조사를 하기도 하였다. 예를 들어 갓 조사한 밀을 이용하여 인도 Mumbai의 Bhabha 원자 연구센터(BARC)에서 수행된 랫트 식이 연구에서 각 동물의 세포 3000개를 카운트하여 배수화 발생을 조사하였으나 방사선조사 밀 섭취로 인한 영향은 없었다.

NIN에서 발표한 연구와 유사한 결과가 나온 연구는 어디에도 없었다.

Q : 동물실험 외에 인체 식이 연구도 있었나?

A : 1980년대 초반 방사선조사 밀을 포함, 여러 방사선조사식품을 이용한 8건의 식이섭취 연구가 중국에서 실시되었다. 400명 이상의 지원자가 7~15주간 엄격한 조건 하에서 방사선조사식품을 섭취하였다. 8건의 실험 중 7건은 382명에서 염색체 이상 가능성 조사를 포함하였다. 어느 시험에서도 대조군과 테스트그룹의 염색체 이상 간의 유의한 차이는 없었다.

방사선조사식품의 안전성 테스트를 목적으로 하지는 않으나 방사선조사된 밀가루식이 환자식으로 사용되는 점은 주목할 만하다. 미국과 영국의

많은 병원에서 완전하게 멸균된 환경에 있는 환자들을 위해 방사선조사 식품이 이용된다. 항암치료를 받거나 장기이식을 하여 면역억제 치료를 받는 환자들은 수 주 또는 수 개월간 멸균된 식품만을 섭취할 수도 있다.

Q : 방사선조사 식품은 ‘방사선 분해산물(radiolytic product)’ 생성 등 유해한 화학 변화가 있는가?

A : 방사선조사식품 중 ‘radiolytic product’는 포도당, 포름산, 아세트알데히드, 이산화탄소 등의 식품에 천연적으로 존재하거나 가열과정에서 생성되는 물질과 유사한 것으로 증명되었다. 이들 radiolytic product의 안전성은 매우 엄격하게 조사되었으며, 그 유해성의 증거는 발견되지 않았다.

미국 FDA는 식품을 1kGy로 조사하였을 때 생성되는 비검지 radiolytic product 총량이 식품 1kg 당 3mg 이하 또는 3ppm 이하일 것으로 예측하였다.

Q : 방사선조사 과정에서 생성된 자유라디칼이 식품의 안전성에 영향을 미치는가?

A : 방사선조사가 자유라디칼¹⁾을 생성하고, 건조식품에 안정적으로 존재한다는 것이 방사선조사 건조식품의 주요 우려 이유로 언급되고 있다. 그러나 자유라디칼은 빵을 굽거나 튀기거나 건조하거나 보통의 식품 산화과정 같은 다른 식품 처리과정에서도 생성된다. 자유라디칼은 매우 반응성이 크며, 불안정한 구조로서 지속적으로 다른 물질과 반응하여 안정화된다. 자유라디칼은 입 속의 침 같은 액체가 있을 때 서로 반응하여 사라진다. 결과적으로 자유라디칼의 섭취가 인체에 독성학적 또는 다른 해로운 영향을 발생시키지 않는다.

이 사실은 독일 Karlsruhe의 연방영양연구센터에서 수행된 장기식이 연구에서 확인되었다. 이 연구는 고농도의 자유라디칼을 함유하는 식이의 영향을 조사하기 위한 것이었다. 동물들에게 45kGy의 전자로 조사한 분유를 섭취시킨 결과 돌연변이나 종양이 발생하지 않았다. 9세대의 랫트에게 이 식이를 지속적으로 섭취시켰으나 독성 효과는 보이지 않았다.

1) 짝짓지 않은 전자[不對電子]를 가지는 원자단.

방사선조사하지 않은 토스트 빵 한 조각이 방사선조사 건조식품보다 더 많은 자유라디칼을 가지고 있으나 무해한 것으로 여겨지고 있다.

Q : 식품의 방사선조사가 보툴리즘 위험을 증가시키는가?

A : 우수제조규범(GMPs)에 따라 방사선조사된 동물성 식품은 저온살균 같은 식품 공정보다 보툴리즘 발생 위험이 높지 않다. 고선량 방사선조사 (30~60kGy)는 식품 중에 존재하는 *Clostridium botulinum* 포자를 파괴할 수 있다. *Clostridium botulinum* 같은 세균 포자가 저선량 방사선 조사 등의 처리에 저항성이 있는 것은 사실이다. 그러나 이런 포자는 상대적으로 그 수가 매우 적으며, 멸균 이하 선량의 방사선조사에서 살아남는다 하여도 다른 미생물들 또한 살아남아 증식하고 부패를 유발하며 *Clostridium botulinum* 증식을 억제할 수 있다. 그러므로 포자가 살아남는다 해서 저온살균이나 조리된 식품 등의 멸균 이하의 열처리된 식품보다 방사선조사식품에서 추가적으로 위험요소가 되지는 않는다.

Q : 이미 미생물 독소나 바이러스가 존재하는 식품이 방사선조사에 적합한가?

A : 위생적으로 우수한 식품만이 방사선조사 대상이 되어야 한다. 이런 관점에서 방사선조사는 저온살균, 냉동 또는 기타 식품처리공정과 다르지 않다. 이들 공정은 세균은 파괴할 수 있으나 이미 생성된 독소나 바이러스를 파괴할 수는 없다. 가공을 위한 식품은 각국 또는 국제기관에서 설정한 GMP에 따라 취급 또는 준비되어야 한다. 식품생산 및 취급시 어떠한 식품가공법도 GMP를 대체할 수 없다.

5. 방사선조사식품의 영양적 품질

방사선조사가 같은 목적을 달성하기 위한 다른 식품가공법 및 보존법보다 더 많은 영양적 손실을 가져오는 것은 아니다. 방사선 조사는 “cold process” 즉, 실질적으로 식품의 온도를 올리지 않기 때문에 영양 손실이 적고 통조림, 건조, 저온살균 등의 다른 보존법으로 인한 손실보다 영양 손실이 적다.

방사선조사에 관한 초기 작업은 대부분 멸균선량으로 처리된 식품을 조사하였으나 최근에는 10kGy 이하의 선량을 적용하여 실제 상업적으로 이루어지는 방사선조사와 같은 선량을 이용하여 실시된 실험 결과에 기반하여 방사선조사식품의 영양적 적정성의 평가가 이루어지고 있다. 방사선조사에 의한 영양가 변화는 식품에 노출되는 방사선량, 식품의 종류, 포장, 방사선조사 중의 온도 같은 가공 조건, 저장 기간 등의 다양한 요인의 영향을 받는다.

탄수화물, 단백질, 지방은 식품의 주요 구성성분이다. 이들 대량 영양소는 에너지를 제공하고, 체구성 및 유지 기능을 한다. 수많은 연구 결과 탄수화물, 단백질, 지방은 10kGy 이상의 선량에서도 거의 변화가 없었다. 필수아미노산, 무기질, 미량원소, 비타민 등도 손실이 크지 않았다.

다양한 종류의 비타민의 방사선조사에 대한 민감성은 제각각이다. 방사선조사에 대한 비타민의 민감성은 식품시스템의 복잡성, 수용성 또는 지용성 등에 따라 다르다. 순수한 비타민 용액의 방사선조사 결과 이들 화합물의 파괴가 상당하여 일부 문헌에서는 그 손실이 과대평가되었다. 예를 들어 수용성의 비타민 B₁(티아민)은 0.5kGy의 방사선조사 후 50%가 손실되었으나 건조된 전란(Whole egg)의 방사선조사에서는 비타민 B₁의 손실량이 5% 이하였다. 냉동상태의 식품 또는 질소 충전 등의 포장을 한 식품을 조사(照射)함으로써 비타민 손실을 최소화할 수 있다.

비타민 중에서도 특히 B₁, C(아스코르브산), A, E(α -토코페롤) 등 4종의 비타민이 방사선조사에 민감하다. 그러나 B₁은 방사선조사 보다 열에 더 민감하다. 방사선 조사된 돼지고기와 쇠고기가 멸균 열처리된 통조림의 고기보다 비타민 B₁이 더 많이 함유되어 있음이 증명되었다.

비타민 E와 A의 방사선조사로 인한 손실의 중요성은 그다지 크지 않다. 이들 비타민의 주요 공급원은 버터나 우유 같은 것이며, 이들 식품은 방사선조사에 적합하지 않기 때문이다. 방사선조사는 비타민 A의 전구체인 베타카로틴과 기타 카로티노이드의 수준에 거의 영향을 미치지 않는다.

전반적으로 식품의 영양가에 대한 방사선조사의 영향은 아주 적으며, 이 사실은 방사선조사식품의 건전성을 입증하기 위한 많은 식이 연구 결과에서 증명되었다. 방사선조사식품은 혼합식이의 일부로 섭취될 것이며, 그러므로 방사선 조사가 특정 영양소의 총 섭취량에 거의 영향을 미치지 않는다는 점을 기억해야 한다.

FAO, WHO, 국제원자력기구(IAEA)의 합동 전문가 위원회는 이러한 이슈를 조사하고 1980년에 방사선조사가 식품에 특정 영양적 문제를 일으키지 않는다고 결론지었다. 또 1997년 스위스 제네바에서 개최된 FAO, IAEA, WHO 전문가 회의에서 고선량 방사선조사의 영향을 조사한 후, 10kGy 이상의 선량(dose)이 개인이나 집단의 영양상태에 부정적 영향을 나타낼 정도로 영양적 손실을 일으키지는 않을 것"이라고 결론지었다.

6. 방사선조사식품의 포장

감자나 양파의 발아 억제, 벌크 곡류의 해충 방제, 과일의 숙성 지연 등에 적용하는 것을 제외하고는 식품의 방사선조사는 보통 포장된 식품에 실시된다. 그 이유는 미생물 재오염 또는 해충 노출 방지, 수분 손실 방지, 산소 배출, 운송시 기계적 손상 방지, 취급 및 판매 향상 등을 위해서이다. 사용되는 포장재는 방사선 반응 제품이나 식품 첨가물을 배출시켜서는 안되며, 기술적 강도, 밀봉 안정성, 수분 불투과성 등의 기능성 품질이 손상되어서도 안된다.

플라스틱이나 다른 포장재에 접촉한 방사선조사식품의 위해는 없다. 폭넓은 연구 결과 흔히 사용되는 대부분의 식품포장재는 멸균 처리 등 식품에 적용될 수 있는 어느 선량에서도 안정하였다. 다만 방사선조사 포장 식품에 사용될 수 있도록 허가된 포장재만을 사용하여야 한다.

다양한 종류의 포장재가 방사선조사 식품용으로 승인되어 있다. 방사선조사 식품에 대한 사용 적정성 연구가 캐나다, 영국, 미국 등에서 이루어졌다. 미국 FDA에서 다양한 종류의 식품포장재를 방사선식품용으로 승인한 지 20년 이상이 경과하였다. 최근 캐나다, 인도, 폴란드가 방사선조사 포장식품에 사용해도 안전한 다층폴리에틸렌 필름 등의 추가 물질을 승인하였다.

플라스틱과 다양한 종류의 포장재에 대한 방사선조사의 영향을 평가하기 위해 정교한 테스트들이 실시된다. 과학자들은 방사선조사 실시 후 안정성, 기계적 강도, 수분 및 가스 투과성, 플라스틱, 첨가물, 접착제 등의 추출가능성 등을 조사하였다.

방사선조사된 물질이 식품 포장에 사용되기도 한다. 알루미늄 호일이 라미네이트된 플라스틱 필름은 제조 공정의 일환으로 방사선조사를 통해 멸균화된다. 이런 제품은 토마토 페이스트, 과일 주스, 와인 같은 밀봉된 “상자내 봉투(bag-in-a-box)” 제품에 사용된다.

기타 무균 포장재, 유제품포장재, 1회용 포장재, 와인병 코르크 등도 오염을 막기 위해 충전 및 밀봉 전에 방사선조사로 멸균화하기도 한다.

7. 식품 방사선조사 비용

통조림화, 냉동, 저온살균, 냉장, 훈증, 방사선 조사 등의 비용은 제품값에 부가된다. 이런 처리과정은 이용성, 질, 저장수명, 편의성, 위생 향상 등의 차원에서 소비자에게 이득이 된다.

코발트-60을 이용하여 식품에 방사선조사를 실시할 때 경제성에 영향을 미치는 주요 요인으로서는 적용 선량, 제품의 적재 밀도, 취급 조건(건조상태인가, 상하기 쉬운 제품인가 등), 선의 균일성 등의 방사선조사 설계 파라미터, 방사선조사기, 방사선원, 선형 가속기의 예비부품, 창고 용량 등의 비용, 급여, 유틸리티, 코발트-60의 재충진 등의 비용 등이 있다.

방사선조사 비용은 저선량 적용시(토마토와 감자의 발아 억제 등) 톤당 10~15달러 가량이 소요되며, 고선량 적용시(향신료의 위생적 품질 확보) 톤당 100~250달러 가량이 소요된다. 이들 비용은 대체 처리방법에 비해 경쟁력이 있다. 일부 경우 방사선조사가 훨씬 비용이 덜 들기도 한다. 수입국의 검역요건을 만족시키기 위한 과일의 해충방제에 있어 방사선조사의 비용은 훈증제 처리 비용의 10~20% 가량 소요되기도 한다.

전자빔 방사선조사기는 작업처리량이 크고, 처리되는 입자 크기와 제품의 두께가 작으며, 방사선처리기를 생산라인과 통합시켜 지속적인 처리를 가능케 함으로써 감마 방사선기보다 경제적으로 우수할 수 있다. 그 결과 다량의 국내 또는 수입 곡류를 처리하는데 감마선 조사시설보다 효과적일 수 있다. 또한 방사능물질이 아닌 전자 가속기에 근거한 기계 타입의 방사선 조사기는 허가 등의 규제가 비교적 간단할 수 있다.

코발트-60 식품방사선조사시설을 설치하는 비용은 규모나 가공 용량, 기타 요인 등에 따라 다르기는 하지만 대략 300만~500만 달러 정도가 소요된다.

미국 환경보호국(EPA)의 자료에 따르면 딸기와 파파야, 망고 등에 대해 훈증제인 메틸브로마이드를 사용할 때와 방사선조사(감마선 조사시설 이용)를 할 때 파운드 당 소요 비용은 방사선조사의 경우가 3~10배 가량 높다. 그러나 방사선조사 비용이 더 비싸기만 과일과 야채에 대한 손상이 적고, 유통기한

이 길기 때문에 그 비용을 상쇄할 수 있으며, 향후 상업적 방사선조사 시설이 증가함에 따라 방사선조사비용이 감소하고 방사선조사처리 식품량은 증가할 것으로 예측하였다.

표 7. 일부 작물의 수확후 처리 비용 비교

작물	메틸브로마이드 (파운드당 센트)	방사선조사 (파운드당 센트)
딸기	0.88~0.94	2.5~8.1
파파야	0.88~0.94	0.9~4.2
망고	0.88~0.94	자료 없음

(출처 : US EPA)

우리나라의 경우 향신료 등 식품에 대한 조사비용은 1kg 당 300원 정도로 알려져 있다. 식품조사의 가격보다는 조사시설까지의 물류 수송비가 더 많이 소요된다.

8. 방사선조사식품의 교역

향신료나 건조 채소 시즈닝, 기계적으로 탈골한 가금육 등의 식재료 등의 일부 방사선조사 식품등이 국제적으로 거래되고 있다. 방사선조사된 향신료의 거래량은 1990년에 5천톤, 1994년에 3만톤, 1997년에 6만톤 등으로 크게 증가하고 있다. 1997년 미국에서만 방사선조사 향신료와 건조 야채 시즈닝이 약 3만톤 가량 생산되었다.

Estimated quantities of irradiated spices and dried vegetable seasonings

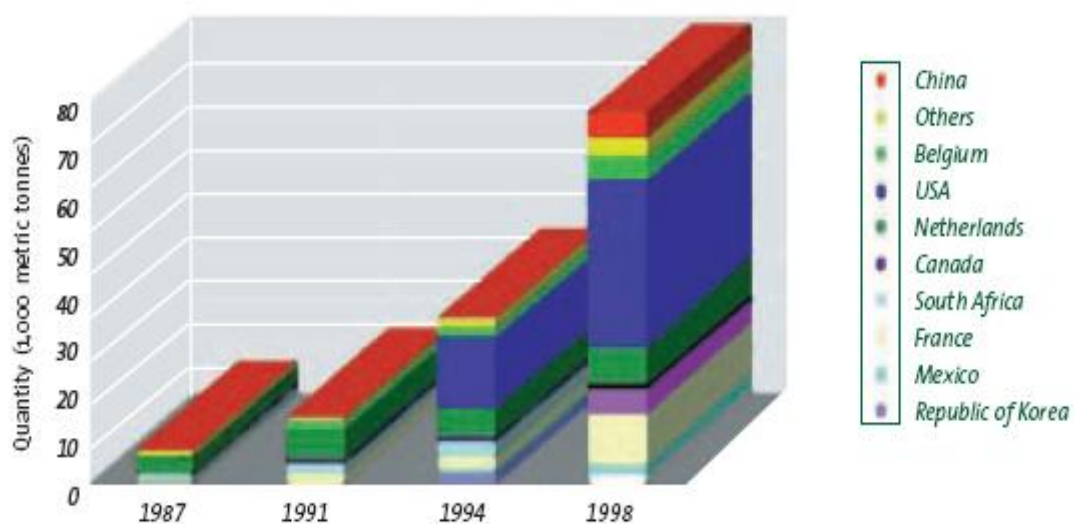


그림 5. 방사선조사 향신료 및 건조 야채 시즈닝 추정량

생과채류는 과실파리가 검역 장벽으로 작용하는 것을 막기 위해 방사선조사 처리될 수 있다. 미국 농무성은 방사선조사를 과실파리에 대한 검역 처리의 일종으로 승인하였다.

방사선조사식품은 처리사실에 대해 표시를 하거나 국제 로고인 radura 심볼을 표시해야 한다. 표시는 소비자에게 선택의 기회를 준다. “미생물 관리를 위해 방사선조사” 또는 “포자 억제제를 위해 방사선조사” 등과 같이 라벨에 방사선조사 이유를 표시할 수도 있다.



국제 로고



미국 FDA 로고



로고 표시 사례

그림 6. Radura 로고

Radura 로고에서 가운데 점은 방사선원을 뜻하며, 두 개의 잎은 작업자와 환경을 보호하기 위한 생물학적 방어막을 의미한다. 바깥의 원은 운송시스템을 의미하며, 아래의 반원은 생물학적 방어막에 의해 방사선조사로부터 보호되며 위의 깨진 반원은 운송시스템에서 대상 제품에 조사되는 선을 상징한다.

국제식품규격위원회(CODEX)의 ‘포장식품의 표시에 관한 일반 규격 (GENERAL STANDARD FOR THE LABELLING OF PREPACKAGED FOODS)’에 따르면, 이온화 방사선 처리된 식품은 제품명 가까이 방사선처리되었음을 나타내는 표시를 하여야 하며, 식품방사선조사 국제 심볼을 사용하고자 하는 경우 제품명 가까이 표시하여야 한다. 또한 방사선조사된 제품이 다른 식품의 원료로 사용될 때, 원료 목록에 이 사실을 표시하여야 하며, 방사선조사된 단일원료를 이용하여 만든 제품에 대해서는 제품의 라벨에 방사선조사 처리되었음을 나타내는 표시를 하여야 한다.

5.2 IRRADIATED FOODS

5.2.1 The label of a food which has been treated with ionizing radiation shall carry a written statement indicating that treatment in close proximity to the name of the food. The use of the international food irradiation symbol, as shown below, is optional, but when it is used, it shall be in close proximity to the name of the food.



5.2.2 When an irradiated product is used as an ingredient in another food, this shall be so declared in the list of ingredients.

5.2.3 When a single ingredient product is prepared from a raw material which has been irradiated, the label of the product shall contain a statement indicating the treatment.

그림 7. Codex의 방사선조사식품의 표시 규정

과채류 벌크 컨테이너 같은 포장되지 않은 방사선조사 식품에 대해서는 일부 국가에서는 로고나 문구를 표시하도록 요구하기도 한다. 그러나 표시 규정은 국가마다 다르다. 예를 들어 미국에서는 식품 중 방사선조사처리 원료에 대해서가 아닌 방사선조사처리 식품에만 표시 요건을 적용하고 있다. EU에서는 식품 자체에는 방사선조사를 하지 않았다 하여도 향신료 같은 방사선조사처리 원료를 포함할 경우 조사된 원료의 함량과 무관하게 표시를 하여야 한다.

우리나라 식품 중 방사선조사와 관련하여 표시 위반으로 인해 유럽에서 제품이 판매금지 처분 받은 사례가 있었다.

2005년 6월 영국 식품기준청(FSA)은 한국의 스낵 등 제품 20종에 대해 식품경보(Food Alert)를 발동했다. 이 제품들은 방사선 처리를 한 원료들이 포함되어 있음에도 이를 포장지에 표시하지 않아 수입 및 판매 금지 처분을 받았다. FSA는 방사선 처리 자체가 식품 안전에 우려를 제기하는 것은 아니지만 관련 사실을 포장지에 표시하지 않았고 방사선 노출 양을 엄격히 제한하고 있는 인가 시설에서 처리가 되지 않았기 때문에 식품 경보를 발동했다고 설명했다.

또한 2006년에는 아일랜드 식품기준청(FSAI)이 한국산 라면 등 일부 제품에 대해 방사선 처리 표시를 하지 않았다는 이유로 한때 판매 금지 처분을 내리기도 하였다. FSAI는 라면제품 3개가 원료에 방사선 처리를 했으나 제품 포장에 이를 표기하지 않아 유럽연합(EU)의 식품 표기 규정을 위반했다고 밝혔다.

9. 식품방사선조사의 국제적 이용 현황

가. 전세계 식품방사선조사 허용 현황

2006년 기준으로 전세계 약 60개국에서 230종 이상의 식품에 대해 방사선조사가 허용하였으며, 연간 50만톤 이상의 식품들이 방사선조사되고 있는 것으로 추정되고 있다. 전세계적으로 코발트-60과 세슘-137을 이용하는 감마선 조사시설이 대략 180기 이상 존재하며, 전자빔 조사시설 또한 12기 이상이다.

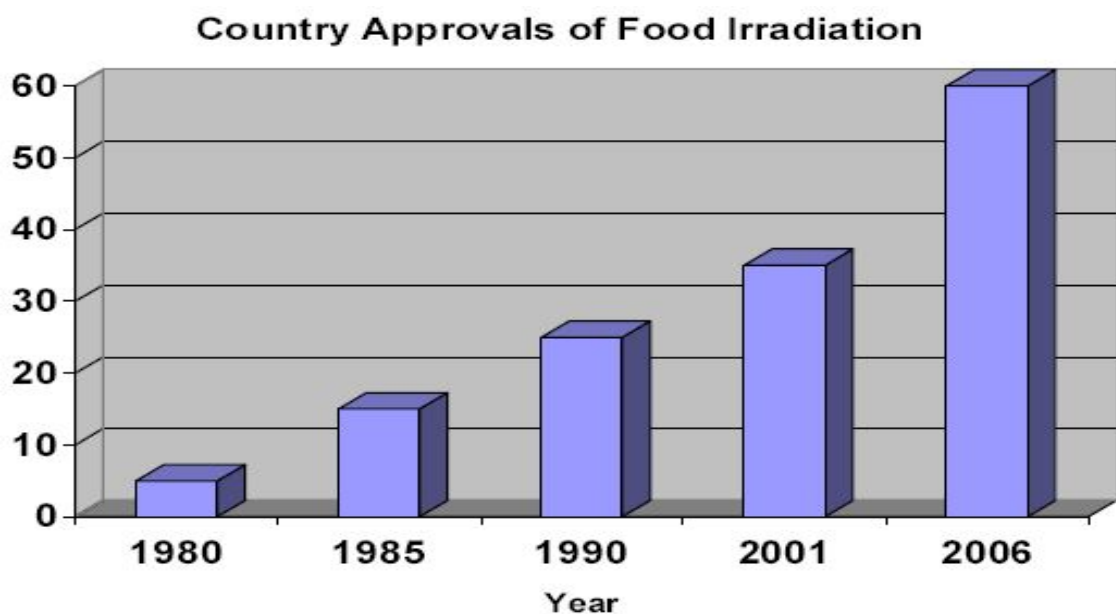


그림 8. 전세계 식품방사선조사 허용 국가수

세계보건기구(WHO), 유엔 식량농업기구(FAO), 국제원자력기구(IAEA) 뿐 아니라 국제식품규격위원회(Codex)에서는 이미 모든 식품에 대해 방사선조사가 허용되었으며, 국제식품규격위원회(Codex)의 감마선 조사기준이 권고에 머무르지 않고, OECD 가입국에 대해서는 강제적으로 시행이 되고 있다.

식품에 대한 방사선조사 허용국가와 허가품목수는 다음과 같다.

표 8. 식품 방사선조사 허용국가 및 허가품목수(2005년 기준)

허용국가	허가 품목수	허용국가	허가 품목수	허용국가	허가 품목수
아르헨티나	13	인도네시아	22	시리아	20
방글라데시	21	이란	1	태국	25
벨기에	11	이스라엘	47	터키	92
브라질	27	이탈리아	6	영국	51
이집트	4	코스타리카	12	우루과이	1
캐나다	7	크로아티아	72	미국	55
칠레	20	호주	3	베트남	8
중국	23	멕시코	8	유고	23
쿠바	18	네덜란드	20	일본	1
체코	2	노르웨이	3	한국	20
덴마크	2	파키스탄	87	러시아	52
핀란드	2	필리핀	3	우크라이나	47
프랑스	41	폴란드	5	가나	172
헝가리	13	남아프리카	89	뉴질랜드	3
인도	23	스페인	2		

1991년 국제원자력기구(IAEA)의 공식 집계에 따르면 해마다 전세계적으로 50만톤 이상의 식품이 방사선조사 처리를 하고 있으나, 보고되는 수준이 낮다는 점을 감안하면 실제 처리되는 방사선조사식품은 수백만 톤에 이를 것으로 추정되고 있다.

1999년 기준 주요 국가의 상업적 목적의 식품방사선조사량은 아래 표와 같다.

표 9. 주요 국가의 상업적 식품방사선조사량(1999년 기준)

국가명	품목	연간 조사량(톤)
아르헨티나	향신료, 야채류(건조) 등	650
벨기에	향신료, 냉동생선류가공품	19,000
캐나다	향신료 등	5,000
칠레	향신료 등	450
체코	향신료 등	1,200
중국	마늘, 향신료 등	80,000
프랑스	향신료, 야채류(건조), 닭고기 등	20,000
헝가리	향신료 등	1,000
인도네시아	향신료 등	500
이스라엘	향신료 등	1,200
일본	감자	15,000
한국	향신료, 야채류(건조) 등	3,000
네덜란드	향신료, 냉동생선류가공품, 치즈	20,000
멕시코	향신료 등	2,000
폴란드	향신료 등	400
남아프리카	향신료, 마늘 등	12,600
태국	발효소세지, 향신료 등	1,000
우크라이나	곡물류	100,000
미국	향신료, 과일, 닭고기, 소고기 등	50,000

나. 국가별 식품방사선조사 이용 현황

○ 우리나라

- 2002년부터 2006년까지 식품의약품안전청에서 집계한 우리나라 연간 방사선조사식품의 생산현황 및 출하현황은 아래 표와 같다.

표 10. 최근 식품조사처리업 생산현황 및 출하현황(2002~2006)

연도	생 산 현 황			출 하 현 황			
	생산능력(T)	생산량(T)	생산액(천원)	출하량(T)	출하액(천원)	수출량(T)	수출액(\$)
2002년	22,445	4,769	1,742,926	989	389,249	3,782	1,128,066
2003년	52,970	5,360	1,756,539	1,781	665,974	3,579	913,940
2004년	66,530	5,934	1,979,952	2,041	792,300	3,892	1,193,772
2005년	84,399	5,397	2,104,467	1,690	587,114	3,708	1,180,150
2006년	45,204	4,124	1,506,184	1,522	513,199	2,603	785,736

- 2002년부터 2006년까지 방사선조사식품의 생산량과 생산액을 도표화한 것은 아래와 같다. 도표를 보면 연도에 따라 방사선조사식품의 생산량 및 생산액이 크게 증가하고 있지 않으며 최근에는 오히려 감소하는 경향을 보인다.

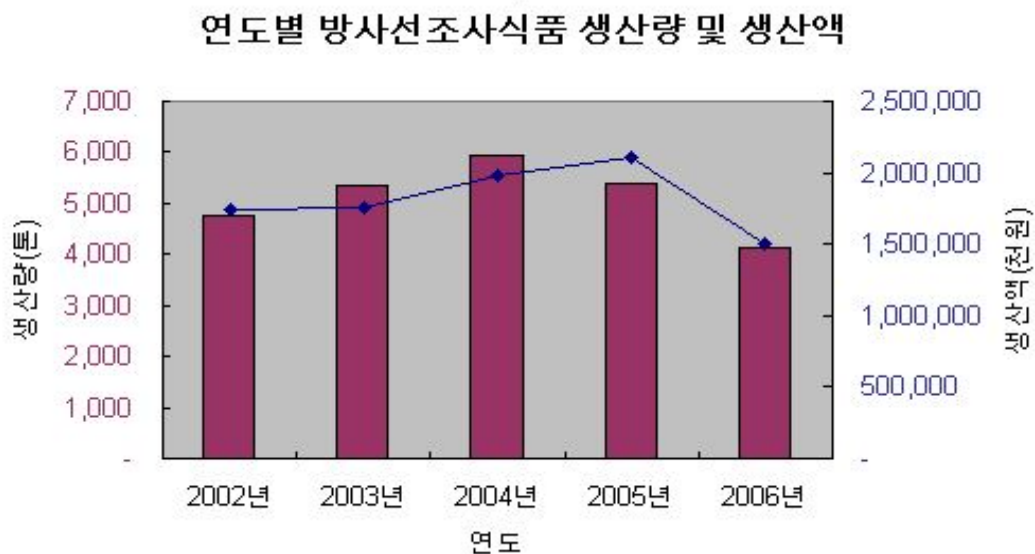


그림 9. 연도별 방사선조사식품 생산량 및 생산액(2002~2006)

- 아래의 표는 2002년부터 2006년까지 우리나라에서 방사선조사가 허용된 품목별 방사선조사 처리물량을 나타내었다. 방사선조사가 허용된 품목에 비해 실제로 방사선조사가 실시되는 품목은 그 수가 적었으며, 처리물량 또한 인삼제품류를 제외하고는 최근들어 그 처리물량이 감소하는 것을 볼 수 있다.

표 11. 우리나라 방사선조사식품처리량(2002~2006)

품목	처리물량(톤)				
	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년
버섯류(신선, 건조)	75	20	24	47	4
건조 향신료	2,024	2,370	2,626	2,138	1,767
어패류 분말	422	523	380	419	96
된장 분말				1	
간장 분말	43	92	93	8	1
전분	9	24	29	25	25
건조채소류	2,109	2,205	2,601	1,967	1,710
곡류, 두류 및 그 분말					135
효소 및 효모제품	12	30	30	38	31
알로에 분말	20	27	34	70	43
인삼 제품류	55	69	67	146	142
소스류					2
복합조미식품					155
기타			50	538	13
계	4,769	5,360	5,934	5,397	4,124

○ 미국

- 미국에서 식품조사기술은 이미 1960년대부터 군 비축식량 및 우주계획의 우주인 식사 등 정부 특수 프로그램에 이용되었으며, 그 후 감자, 양파 등 구근류와 과일, 버섯 등의 장기 저장과 향신료 및 육류 등의 위생화 및 식품의 검역기술로 이용되어왔다.

1998년 미국에서 방사선 처리된 총 식품은 약 50,000톤으로 추정되며, 그 대부분이 향신료인 것으로 나타나고 있다. 육류의 경우 1990년대 살모넬라균이 많은 닭고기의 위생화를 목적으로 가축육류의 방사선처리가 허가되었으며 특히 1997년 햄버거에 들어가는 쇠고기가 원인이 된 병원성대장균 O157:H7 오염으로 대규모의 식중독사고가 발생하여, 1999년 2월에 쇠

고기 돼지고기, 양고기의 붉은고기(red meat)의 방사선처리가 정식으로 허가되어 식중독 대책으로 육류의 방사선 처리가 시작되었다.

미국정부는 방사선 조사가 학교급식의 안전성을 보장할 수 있는 중요한 기술로 인정하여 미국 농림부는 2003년 5월 국립학교 점심 프로그램으로 매일 2,500만 명 이상의 어린이들에게 저비용 또는 무료로 제공하고 있는 급식지원프로그램에 방사선 조사된 쇠고기(햄버거 포함)의 공급을 허가하였다. 이에 따라 2004년 1월부터 미국 고등학교 학생들에게 방사선처리 쇠고기를 포함한 햄버거를 급식으로 공급하고 있다.

2002년 12월 기준으로 미국 전역의 수퍼마켓 5천여 점포에서 방사선조사 식품이 판매되고 있으며, 2002년도에 분쇄우육 제품의 경우 8천톤이 방사선조사되었고, 총 10만톤 이상의 식품에 대해 방사선조사가 이루어지고 있다.

○ 중국

- 중국의 방사선조사 시장은 급격히 증가하고 있다. 첫 번째 식품 방사선조사시설은 1987년에 건설되었다. 2003년에는 중국에 7기의 설비가 있었으나 2006년 4월에는 78기로 증가하였으며, 그 중 50기는 식품가공용이다. 감마선 조사시설과 전자빔 시설이 모두 사용되고 있다.

대부분의 방사선조사시설은 중국 회사에서 설계 및 건설하고 있으며, 상하이, 베이징, 양쯔강 주변의 공장 클러스터에 많이 건설되었다.

중국회사인 JPY는 중국에서 세 번째로 큰 감마선 조사시설을 가동하고 있다. 그 중 1987년에 건설된 선전의 시설(^{60}Co , 260만 Ci 규모)이 가장 크며, 2003년 건설된 상하이의 시설(^{60}Co , 200만 Ci 규모)이 두 번째 규모이며, 세 번째는 천진에 있는 시설(^{60}Co , 70만 Ci 규모)이다.

2005년에는 14만톤의 식품이 방사선조사되었다. 2001년 8만톤이 조사된 것에 비하여 엄청나게 증가한 수치이다. 방사선조사는 마늘의 발아억제를 막고 건조 채소, 향신료, 곡류, 약초 등의 세균 억제를 위한 것이었다.

○ 태국

- 2006년 2월 미국 농무성의 동식물보건검사국(Animal and Plant Health Inspection Service, APHIS)은 미국에 수출되는 과채류의 해충을 사멸시키기 위해 방사선조사 사용을 허용하는 협약을 태국과 체결하였다. 태국은 미국과 그러한 협약을 맺은 첫 번째 국가이다.

미국 APHIS는 태국의 망고, 망고스틴, 파인애플, 람부탄, 리찌, 용안 등의 6종의 방사선조사 과일 수입을 허가하였고, 태국은 미국으로부터 감귤류 등의 방사선조사 제품 수입을 허가할 예정이다.

○ 인도

- 인도는 많은 농산제품에 대해 방사선조사를 이용하며, 양파, 감자, 설롯, 쌀, 향신료, 건조해산물, 건포도, 무화과, date, 신선 해산물, 냉동 해산물, 육류제품, 망고 등에 대해 방사선조사를 허용하고 있다.

인도 정부는 방사선조사를 지원하며, 원자력부가 뭄바이 인근에 코발트-60 조사시설을 2기 건설하였다. Vashi, Navi Mumbai 설비는 향신료와 건조 야채를 매일 30톤 처리할 수 있는 고선량 시설이다. Lasalgaon에 있는 저선량 조사시설에서는 양파(일당 10톤), 씨리얼 등을 조사처리한다.

○ 일본

- 일본은 1991년 이후 발아 억제를 위해 매년 2만 파운드 이상의 감자를 방사선조사하고 있으며, 네덜란드는 매일 딸기, 향신료, 가금육, 건조 야채 등의 식품 1만 8천 파운드 이상을 방사선조사처리한다. 벨기에는 매년 8천톤 이상의 식품을 방사선조사하며, 캐나다는 감자, 밀가루, 생선 월레, 양념류, 시즈닝 등에 대해 방사선조사하고 있다.

○ 프랑스

- 프랑스는 냉동 허브, 마늘, 설롯, 카제인, 난백, 냉동 새우, 가금육, 냉동 개구리다리 등에 대해 방사선조사를 허용하고 있다.

○ 호주-뉴질랜드

- 허브, 향신료, 망고, 파파야, 리찌, 람부탄, 커스터드 애플, 용안, 카람볼라,

망고스틴, 뽕나무열매 등에 대해 방사선조사를 허용하였다. 식품으로 구분되지 않는 치료용 허브차, 기타 치료제, 동물사료 등에 대해서도 허용되었다. 그러나 방사선조사식품이 소비자에게 인기가 없는 편이다.

○ 남아프리카

- 남아프리카는 영국과 EU, 미국에 다량의 과일을 수출한다. 새로운 미국 규정에 따라 남아프리카는 방사선조사 레몬을 미국에 수출할 수 있다.

다. 실제 방사선조사식품 시판 사례

○ 과일

- 1992년 미국 플로리다의 멀베리에서 처음으로 상업적인 식품방사선조사가 시작된 이래 플로리다와 일리노이즈 주의 일부 소매점에서 방사선조사된 딸기, 토마토, 감귤류가 판매되고 있다. 미국 농무성은 1996년 숙주 제품에 관계없이 과실판리에 대한 생과외의 검역 처리법으로 방사선조사를 허용하였다. 파파야, 람부탄, 리찌, 체리모야 등 과실판리의 천연 숙주인 하와이의 과일들은 1995년부터 농무성의 특별 허가 하에 방사선조사 후 미국 몇몇 주의 소매점에서 판매되고 있다. 모든 방사선조사 제품은 방사선조사 로고를 표시하고 포장시점이나 판매시점에서 “방사선조사처리되었음”이라는 문구를 표시하였다. 미국에서는 연간 대략 1,000톤 가량의 방사선조사표시 과채류가 판매되고 있으며, 상하기 쉬운 블루베리, raspberry, 체리 등에 대한 방사선조사에 대한 관심이 증가하고 있다.

중국의 경우 1990년대 초반부터 상하이와 일부 도시에서 방사선조사 사과가 판매되고 있다.

○ 향료와 건조 야채 시즈닝

- 지난 10여년 간 남아프리카에서는 방사선조사 향신료와 건조 야채 시즈닝이 판매되고 있으며 그 양이 증가하고 있다. 실제로 방사선조사는 남아프리카의 향신료 교역에 의해 정기적으로 사용되었으며, 남아프리카에서는 훈증제나 가열 등 다른 방법으로 처리된 향신료는 찾기 어렵다. 소스, 샐러드 드레싱, 샌드위치 스프레드 등의 다양한 가공식품에도 방사선조사 향신료와 야채 시즈닝이 들어간다. 모든 방사선조사 식품에는 방사선조사

로고와 "Radurised"라는 문구가 표시된다. 1995년 이후 방사선조사 향신료과 건조 야채 시즈닝은 벨기에에서도 판매되고 있다. 중국에서는 방사선조사 향신료, 조미료, 시즈닝 등이 판매되고 있다.

○ 개구리 다리

- 프랑스의 엄격한 미생물학적 규격으로 인해 프랑스에서 판매되는 대부분의 개구리 다리는 방사선조사 처리 하여 위생적 품질을 확보한다. 이 제품은 "이온화처리되었음" 표시를 하고, 대부분의 프랑스 식품 마켓에서 판매된다.

○ 양파, 마늘

- Vidalia 양파는 발아를 막기 위해 플로리다에서 방사선조사되며, 1992년부터 시카고의 소매점에서 판매되고 있다. 방사선조사 마늘은 1990년대 초반 중국의 일부 도시에서 판매되고 있으며 그 양이 점차 증가하고 있다. 1995~1998년까지 약 16만 6천톤의 마늘이 방사선조사되어 중국에서 판매되었다. 모든 제품은 처리에 대한 표시를 하였다.

○ 닭고기

- 미국 식품의약품청(FDA)의 승인과 1993년의 방사선조사 가금류에 관한 품질관리프로그램에 따라 플로리다, 일리노이즈, 아이오와, 캔자스 주의 일부 소매점에서 소량의 방사선조사 닭고기가 판매되고 있다. 이 지역의 소비자들은 처음으로 살모넬라 같은 병원체가 없는 닭고기를 살 수 있는 기회를 얻었다.

○ 발효시킨 돼지고기 소시지

- 병원성 미생물과 기생충 관리를 위해 방사선 조사 처리한 발효 돼지고기 소시지(태국 고유의 음식 Nham, 대부분 날 것으로 섭취됨)는 1986년 처음으로 시판되어 인기를 얻었다. 1997년에 태국에서 약 80톤의 Nham이 방사선조사 처리되었다. 방콕의 슈퍼마켓에서는 방사선조사된 제품의 양이 지속적으로 증가하고 있다. 방사선조사 식품의 수요 증가는 살모넬라나 *Trichinella spiralis* 등의 감염 위험이 제거되었기 때문이다. 이들 제품에도 방사선조사 로고와 문구가 표시되어야 한다.

○ 기타 식품

- 1993년 방글라데시의 Chittagong의 방사선조사시설이 가동되기 시작하여 소량의 방사선조사 건어물(해충 관리용)이 방글라데시의 Chittagong과 다른 도시에서 판매되고 있다.

남아프리카에서는 저장성이 우수한 즉석섭취 식품도 방사선조사 처리를 하고 있다. 쇠고기 카레, 쇠고기 stroganoff, 치킨 카레, 라자냐, bobotie라고 불리는 말레이시아 요리 등 12개 식품이 존재한다. 이들 식품은 방사선조사 표시를 하고, 저장기간이 2년 이상이며, 야외 활동시 이용하기 편리하다.

10. 식품방사선조사의 규제 현황

가. 국내

우리나라는 식품위생법시행령 제7조제6호가목에 식품조사처리업이 규정되어 있으며, 식품조사처리업은 방사선을 쬔어 식품의 보존성을 물리적으로 높이는 것을 업으로 하는 영업이라고 명시되어 있다. 또한 식품위생법 제7조제1항에 의하여 식품공전에서 방사선조사 허용품목 및 조사기준을 관리하고 있다.

우리나라에서 식품에 사용가능한 방사선의 선원 및 선종은 ^{60}Co 의 감마선으로 제한되어 있으며, 식품의 발아억제, 살충, 살균 및 숙도조절의 목적에 한하여 사용할 수 있다. 한번 조사한 식품에 대해 다시 방사선조사를 해서는 안되며, 방사선조사 식품을 원료로 한 식품도 다시 조사를 해서는 안된다. 또한 방사선조사식품은 용기에 넣거나 포장 후 방사선조사 표시를 한 후에 판매할 수 있다.

현재 방사선조사가 허용된 식품은 총 26개 품목이며, 식품별로 흡수선량의 기준이 설정되어 있다.

허용대상 식품 및 흡수선량 기준은 다음과 같다.

표 12. 국내 방사선조사 허용식품 및 흡수선량 기준

허용식품	흡수선량
감자, 양파, 마늘	0.15 kGy 이하
밤	0.25 kGy 이하
생버섯, 건조버섯	1 kGy 이하
난분, 가공식품 제조원료용 곡류, 두류 및 그 분말, 조미식품 제조원료용 전분	5 kGy 이하
가공식품 제조원료용 건조식육 및 어패류분말, 된장분말, 고추장분말, 간장분말, 가공식품 제조원료용 건조채소류, 효모·효소식품, 조류식품, 알로에분말, 인삼(홍삼포함)제품류	7 kGy 이하
건조향신료 및 이들 조제품, 복합조미식품, 소스류, 침출차, 분말차, 2차살균이 필요한 환자식	10 kGy 이하

방사선조사 처리 식품의 경우 식품 등의 표시기준에 의하여 조사처리업소명, 전화번호, 조사년월일, 조사선량과 조사 처리된 식품임을 나타내는 표시를 하여야 하고, 조사도안을 소비자가 알아볼 수 있도록 표시하여야 한다. 방사선조사식품의 세부표시기준은 별첨 1과 같다.

나. 국제식품규격위원회(CODEX)

국제식품규격위원회(CODEX)는 식품 방사선조사와 관련하여 규격 및 실행규범을 설정하였다. 식품의 방사선조사 프로세스에 관한 국제 실행규범(RECOMMENDED INTERNATIONAL CODE OF PRACTICE FOR RADIATION PROCESSING OF FOOD, CAC/RCP 19-1979, Rev.1-2003)을 1979년 제정하고, 지난 2003년 개정하였다. 또한 방사선조사식품에 관한 일반규격(REVISED CODEX GENERAL STANDARD FOR IRRADIATED FOODS, CODEX STAN 106-1983, REV.1-2003)을 1983년에 제정하고, 2003년에 개정한 바 있다.

각각의 목차는 다음과 같다.

방사선조사식품에 관한 일반 규격

1. 범위
2. 일반 요건
 - 2.1 방사선원
 - 2.2 흡수선량
 - 2.3 시설 및 관리
3. 방사선조사식품의 위생
4. 기술적 요건
 - 4.1 일반 요건
 - 4.2 식품품질 및 포장요건
5. 방사선재조사
6. 방사선조사 사후 검증
7. 표시
 - 7.1 재고 관리
 - 7.2 직접 섭취용 포장식품
 - 7.3 벌크 컨테이너의 식품

식품의 방사선조사 프로세스에 관한 국제 실행규범

서론

1. 목적

2. 범위, 용도, 정의

2.1 범위

2.2 용도

2.3 정의

3. 방사선조사 전처리

3.1 1차 생산 및/또는 수확

3.2 취급, 저장, 운송

4. 포장

5. 시설 : 설계, 설비, 관리

5.1 설계 및 layout

5.2 방사선원

5.3 가동 관리

5.3.1 법령

5.3.2 직원 요건

5.3.3 프로세스 관리 요건

5.3.4 적용 선량 관리

5.3.5 제품 및 재고 관리

6. 방사선조사

6.1 일반

6.2 프로세스 확인

6.3 선량측정

6.4 선량측정 시스템

6.5 선량측정 및 프로세스 관리

6.6 방사선조사 기록

6.7 위해요소 관리

7. 방사선조사 사후 보관 및 취급

8. 표시

]다. 국제원자력기구(IAEA)

IAEA는 국제적으로 통일된 적절한 식품방사선조사를 위하여 해충방제가 목적인 곡류의 조사, 해충방제가 목적인 신선 과일의 식물방역 수단으로서 조사, 성숙지연에 의한 저장기간 연장 목적인 바나나, 망고, 파파야의 조사, 발아억제가 목적인 근경채소류의 조사, 살균을 목적으로 한 향신료의 조사, 살균이 목적인 생 또는 냉동 축육, 가금육의 조사, 살균이 목적인 냉장 신선 어류 및 냉동 개구리 다리, 새우의 조사, 살충이 목적인 건어물 및 염장어의 조사 등에 관한 가이드라인을 설정하고 있다.

11. 방사선조사식품의 검지방법

가. 국외

식품방사선조사가 상업화되고, 방사선조사식품의 국제 교역이 이루어지면서, 많은 국가들의 방사선조사 기술 사용에 관한 규정의 차이와 소비자의 명확한 표시 요구 증가로 인하여 식품이 방사선조사 되었는지 여부를 확인하기 위한 신뢰성 있는 테스트가 필요하다.

1980년대 중반 다양한 종류의 식품의 방사선조사 상태를 확인하기 위한 신뢰성있는 테스트들이 개발되었다. 이러한 방법들로는 ESR, TL, monitoring the formation of long-chain hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones 등이 있다. 1996년 5종의 테스트가 유럽 Normalistaion 위원회(CEN)에 의해 방사선조사 식품 검지를 위한 표준검사법으로 채택되었다. 이후 이 방법들은 독일, 영국 등의 여러 국가에서 채택되었다.

표 13. EU의 방사선조사식품 표준 검지방법

Standard No.	대상식품군	검사방법
EN 1784	가금육, 식육, 견과류	hydrocarbones의 GC/MS
EN 1785	식육 및 난류	2-alkelcyclobutanones의 GC/MS
EN 1786	배 함유 식품	ESR
EN 1787	섬유소 함유식품	ESR
EN 1788	광물질 부착식품	TL
prEN 13708	결정형 당 함유식품	ESR
prEN 13751	허브, 향신료 등	PL
prEN 13783	허브, 향신료 등	DEFT/APC
prEN 13784	가금육 및 식물종자	DNA comet assay

국제식품규격위원회(CODEX)는 화학분석법, TL법, ESR법 3종, DNA comet assay법, DEFT/APC법 등 9종 분석법을 CODEX 표준 분석법으로 채택하고 있다.

나. 국내

방사선 조사식품 검지법으로는 광자극발광법(Photostimulated Luminescence, PSL) 및 열발광법(ThermoLuminescence, TL)이 있다. 광자극발광법(Photostimulated Luminescence, PSL) 및 열발광법(ThermoLuminescence, TL)은 식품에 혼입된 이물질인 광물질의 발광 특성을 이용하는 방법으로서 광물질은 방사선 조사에 의하여 에너지가 저장되고 일정온도의 적외선이나 열에 노출되면 에너지를 방출하는데 이때 방출하는 빛의 양을 측정하여 방사선 조사여부를 판정하는 방법이다.

방사선 조사식품 검지법은 건조향신료 및 이들 조제품, 복합조미식품, 감자, 마늘, 생버섯, 건조버섯, 양파에 대한 2007년 4월 12일 신설·고시되었으며, 2010년 1월 1일부터 시행된다.

방사선 조사식품 검지법 세부 내용은 별첨 2와 같다.

참고자료

- 과학기술부, 2006, 방사선식품생명공학 기술개발
- 과학기술부, 2004, 방사선 조사된 식품 중 필수 미량 영양소의 영양학적 안정성 및 유전독성학적 안전성에 관한 연구
- 과학기술부, 2000, 방사선조사식품의 검지기술 개발
- 과학기술부, 1999, 방사선 식품·생명공학기술 개발
- 농림부, 2002, 방사선처리 농산물의 수입관리를 위한 다중검지기술 개발
- 한국식품공업협회, 식품위생법
- 식품의약품안전청, 식품의 기준 및 규격
- 식품의약품안전청, 방사선조사식품 리플렛
- 식품의약품안전청, 소비자와 함께하는 방사선을 쪼인 식품
- 식품의약품안전청, 2006, 방사선조사식품의 검지방법 확립 및 표준화(III)
- 식품의약품안전청, 2004, 방사선조사에 대한 국내외 관리동향
- 식품의약품안전청, 2002, 방사선조사로 기인하는 식품포장재의 유해물질 조사
- 식품의약품안전청, 1998, 방사선조사식품 알아봅시다.
- 인제대학교, 2005, 방사선조사식품의 표시제도에 대한 국내외 관리현황
- 김완희, 한국과학기술정보연구원, 2008, 식품방사선조사의 현황
- 김희선, 대한수의학회지, 2001, 제37권 제5호 447~456, 방사선 식품조사에 대하여
- 변명우, 육홍선, 한국식품저장유통학회지, 2003, 10권 1호, 106~123, 식품 및 공중보건산업에서 방사선 조사기술 이용 국내외 현황
- 변명우, 동위원소회보, 2004, 제19권 제1호, 농업식품생명공학 및 공중보건 분야에서 대단위 방사선 조사시설의 이용현황 및 전망
- 이주운, 식품산업과 영양, 2006, 11(3), 12~20, 식자재 안전공급을 위한 식품 방사선 조사 이용현황 및 전망
- IAEA, 1999, Facts about food irradiation
- IAEA, 2007, Food Irradiation : A powerful Nuclear Tool for Food Safety
- ICGFI, 1998, Irradiation and Trade in Food and Agricultural Products
- FSAI, 2006, Irradiated Food Leaflet
- J Am Diet Assoc. 2000; 100:246~253, Food irradiation. Position of ADA
- IAEA, 2002, Dosimetry for Food Irradiation

- www.iaea.org
- www.epa.gov
- www.codexalimentarius.net
- http://en.wikipedia.org/wiki/Food_irradiation

[별첨 1]

방사선조사식품의 세부표시기준

1. 표시대상

- 가. 법 제7조에 따라 방사선 조사가 허용된 식품에 방사선을 조사한 경우(완제품)
- 나. 가목의 식품 중 검지법이 고시된 식품을 원재료로 사용하여 식품을 제조·가공한 경우(방사선 조사한 원재료 사용 식품)

2. 표시방법

가. 활자크기 및 표시장소

- 1) 활자크기(공통사항) : 7포인트 이상으로 표시
- 2) 표시장소

가) 제1호 가목에 해당하는 완제품의 경우 소비자가 알아보기 쉬운 장소에 표시사항을 표시

나) 제1호 나목에 해당하는 방사선 조사한 원재료를 사용한 식품의 경우 “원재료명 및 함량”란에 그 조사한 내용을 표시

나. 표시사항

- 1) 제1호 가목에 해당하는 완제품의 경우 : 조사처리된 식품임을 나타내는 문구 및 조사도안



- 2) 제1호 나목에 해당하는 방사선 조사한 원재료를 사용한 식품의 경우

가) 개별 원재료명과 함께 표시 : 원재료명 및 함량 표시란에 해당 원재료명에 괄호로 “방사선조사”로 표시[예시: “양파(방사선조사)”, “방사선조사마늘” 등]

나) 방사선조사처리 원재료를 일괄표시

- (1) 방사선 조사처리한 복합원재료 표시 : 방사선조사한 복합원재료명과 그 원재료명 5개 이상 표시

[예시 : 방사선조사한 ○○복합원재료명(원재료명 5개 이상 표시)]

- (2) 방사선 조사처리한 식품을 일괄표시 : 방사선 조사한 원재료를 괄호로 하여 일괄표시

[예시 : 방사선 조사한 원재료(감자, 마늘, 양파 등)]

[별첨 2]

방사선 조사식품 검지법

광자극발광법(Photostimulated Luminescence, PSL) 및 열발광법(ThermoLuminescence, TL)은 식품에 혼입된 이물질인 광물질의 발광 특성을 이용하는 방법으로서 광물질은 방사선 조사에 의하여 에너지가 저장되고 일정온도의 적외선이나 열에 노출되면 에너지를 방출하는데 이때 방출하는 빛의 양을 측정하여 방사선 조사여부를 판정하는 방법이다.

1) 광자극발광법 (Photostimulated Luminescence, PSL)

(1) 장치 및 기구

- ① 광자극발광분석장치(PSL system) : 검체챔버, 광자극원 (Stimulation source), 광물질측정시스템으로 구성된다.
- ② 페트리디쉬 (플라스틱, 지름 50 mm)
- ③ 클린벤치

(2) 표준시료

- ① 조사시료 : 5~10kGy사이의 선량으로 방사선 조사된 파프리카분말 250 g
- ② 비조사시료 : 방사선 조사되지 않은 파프리카분말 250 g

(3) 대상시료 : 건조향신료 및 이들 조제품, 복합조미식품, 감자, 마늘, 생버섯, 건조버섯, 양파

(4) 검체조제

- ① 모든 검체조제는 차광조건으로 클린벤치에서 한다.
- ② 시료는 감자, 마늘, 생버섯, 건조버섯, 양파의 경우 껍질을 페트리디쉬에 담을 수 있는 크기로 절단하고, 분말시료 및 기타시료의 경우는 골고루 혼합하여 페트리디쉬에 바닥이 보이지 않도록 고르게 펼쳐 담는다. 각 시료에 대하여 2개의 검체를 조제한다.

(5) 시험조작

- ① 모든 시험조작은 차광조건에서 한다.
- ② 검체가 담긴 페트리디쉬를 PSL 기기에 넣어 60초 동안 방출되는 광자를 측정하며 2개 검체에 대한 측정값들을 최종 측정값으로 한다(예 : 400, 430). 다만, 2개의 측정값 간에 (6) 판정이 다를 때에는 4회 추가시험을 하여 총 6회 측정값 중 가장 높은 2회 측정값을 최종 측정값으로 한다.

(6) 판정

- ① 일반적으로 광자극발광법 (PSL)은 방사선조사 여부를 스크리닝할 때 사용하는 방법으로서 측정값이 $T_1(700 \text{ count}/60\text{초})$ 미만이면 음성시료(Negative, 방사선이 조사되지 않은 시료)로 판정하고, $T_2(5,000 \text{ count}/60\text{초})$ 초과이면 양성시료(Positive, 방사선이 조사된 시료)로 한다.
- ② 측정값이 $T_1 \sim T_2$ 의 값을 나타내면 중간시료(Intermediate, 방사선 조사여부를 판단할 수 없는 시료)로 한다.
- ③ 양성시료와 중간시료는 최종 확인시험으로 2) 열발광법에 따라 시험하여 그 결과의 판정에 따른다.

2) 열발광법 (Thermoluminescence, TL)

(1) 장치 및 기구

- ① 열발광분석장치 (Thermoluminescence detection system)
- ② 측정용기 : 검체측정용 컵(지름 9 mm~10 mm, 두께 0.25~0.5 mm 정도) 또는 스테인레스 스틸 디스크
- ③ 초음파교반기
- ④ 나일론 여과포 (pore size 125 μm 또는 250 μm)
- ⑤ 원심분리기
- ⑥ 건조기 : $50 \pm 5^\circ\text{C}$
- ⑦ 방사선 조사장치 (60°C)

(2) 용어의 정의

- ① TL 강도 : 주어진 온도상승률에 따라 온도범위에서 검출된 빛의 양
- ② 글로우곡선(Glow curve) : 온도에 따른 TL 강도의 변화
- ③ 글로우 1(Glow 1) : 광물질로부터 측정한 글로우곡선
- ④ 글로우 2(Glow 2) : 글로우 1을 측정한 광물질에 조사할 선량(일반적으로 1 kGy, 저선량인 감자, 마늘, 양파의 경우 0.25kGy의 선량을 이용함)으로 재조사(re-irradiation)하고 동일한 조건으로 측정한 글로우곡선
- ⑤ TL 비(TL ratio) : 주어진 온도범위에서 글로우 2의 TL 강도 면적값에 대한 글로우 1의 TL 강도 면적값의 비(글로우 1의 TL 강도 면적값 / 글로우 2의 TL 강도 면적값) 일반적으로 온도범위는 $150 \sim 250^\circ\text{C}$ 범위가 적용되나, 기기가 바뀌거나 명확하지 않을 경우 표준광물질을 사용하여 글로우곡선을 측정하여 온도범위를 설정할 수 있음

- ⑥ 공시험 : 시료없이 검체조제 과정과 시험조작 과정을 행하는 것
- ⑦ 최저검출한계(Minimum Detectable Integrated TL-intensity Level, MDL) :
공시험 글로우 1의 평균값+(표준편차×3)

(3) 시약 및 시액

- ① 폴리텡스텐나트륨(Sodium polytungstate) 용액($\text{Na}_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}] \cdot \text{H}_2\text{O}$) : 폴리텡스텐나트륨 용액에 증류수를 혼합하여 밀도를 2.0 g/mL로 한다.
- ② 실리콘스프레이
- ③ 1N 염산 : 염산 95 mL를 증류수로 희석하여 1,000 mL로 한다.
- ④ 4N 염산 : 염산 380 mL를 증류수로 희석하여 1,000 mL로 한다.
- ⑤ 1N 암모니아수 : 암모니아수(28%) 65 mL를 증류수로 희석하여 1,000 mL로 한다.
- ⑥ 아세톤 : 액체크로마토그래프용 또는 이와 동등한 것

(4) 대상시료 : 건조향신료 및 이들 조제품, 복합조미식품, 감자, 마늘, 생버섯, 건조버섯, 양파

(5) 검체조제 : 광물질(silicate minerals)의 분리

- ① 모든 검체조제는 차광조건에서 한다.
- ② 시료 일정량(시료에 혼입된 광물질의 양에 따라 결정(3~20 g)하며, 생버섯은 약 500 g)을 증류수 150~200 mL에 넣고 표면에 붙은 광물질이 분리되도록 5분간 초음파 처리한다.
- ③ 시료를 증류수와 함께 나일론 여과포로 500~1,000 mL의 비이커를 사용하여 여과하고, 여액을 5분 동안 방치하여 광물질을 침전 시킨 다음 물과 유기물을 제거한다(광물질과 소량의 유기물이 남을 때까지 이 과정을 반복한다).
침전물을 원심분리용기에 옮겨 실온에서 5분 동안 방치하거나, 1분 동안 원심분리 (1,000 G)하여 광물질을 침전 시킨 다음 물을 제거한다.
- ④ 원심분리용기에 남은 광물질에 폴리텡스텐나트륨 용액 5 mL를 넣어 혼합하고 초음파 처리한 후 2분 동안 원심분리 (1,000 G) 한다.
- ⑤ 증류수 5 mL를 조심스럽게 첨가하여 방치한 후 물과 유기물을 제거한다. 다시 폴리텡스텐나트륨 용액 5 mL를 넣어 혼합한 후 증류수 3~5 mL를 가하여 정치한 후 물을 제거한다.
- ⑥ 폴리텡스텐나트륨 용액을 따라 버리거나 진공펌프를 이용하여 흡입 제거한다.

- ⑦ 소량 남아 있는 폴리텡스텐나트륨용액을 제거하기 위하여 증류수 5 mL를 가하여 희석한 후 물을 제거한다. 이 과정을 2회 반복한다.
- ⑧ 1N 염산 2 mL를 가하고 10 분간 방치한다 (광물질의 함량이 많은 감자의 경우 4N 염산 5 mL이상을 사용할 수 있다).
- ⑨ 1N 암모니아수 2 mL를 가하여 혼합하고 10분간 방치한다.
- ⑩ 증류수 5 mL를 가하여 세척한 후 제거하는 과정을 2~3회 반복한다.
- ⑪ 아세톤 5 mL를 가하여 세척하고 제거하는 과정을 2~3회 반복한 후 측정 용기에 옮긴다.

(6) 시험조작

- ① 모든 시험조작은 차광조건에서 한다.
- ② 측정용기를 증류수로 세척하고 5분간 초음파 처리한 후, 아세톤으로 2~3회 세척하고 다시 5분간 초음파 처리하여 건조시킨 다음 먼지가 없는 곳에 보관한다.
- ③ (5)검체조제에서 조제된 광물질 0.1~5.0 mg을 측정용기에 옮기고 실리콘스 프레이를 사용하여 고정시킨 다음 50℃ 건조기에서 16시간 방치한다.
- ④ TL 측정 조건
 - ㉠ 초기온도 : 50℃
 - ㉡ 온도상승률 : 5℃/초
 - ㉢ 최종온도 : 350~500℃
 - ㉣ 질소 (99.99999% 이상)
- ⑤ 글로우 1을 측정하고, 1 kGy (혹은 0.25 kGy)로 재조사 (re-irradiation)를 실시한 후 글로우 1과 동일한 조건으로 글로우 2를 측정한 후 TL 비를 구한다.
- ⑥ 공시험의 글로우 1을 측정하여 최저검출한계를 구한다.
- ⑦ 글로우 2의 TL 강도 면적값이 최저검출한계의 10배 이상이어야 하며, 미만인 경우에는 시험을 다시 한다.

(7) 판정

- ① 글로우곡선의 모양, 글로우곡선이 나타나는 온도범위 및 TL 비로서 방사선 조사여부를 판정한다.
- ② 방사선 조사되지 않은 시료는 특징적인 글로우곡선을 나타내지 않거나 30 0℃ 이상에서 자연방사능에 의한 곡선을 나타낸다.
- ③ 방사선 조사된 시료는 150~250℃ 부근에서 최대강도를 보이는 글로우곡선을 나타낸다.

- ④ TL 비가 0.1이상인 것은 방사선 조사된 것으로, 0.1이하인 것은 방사선 조사되지 않은 것으로 판정한다. 다만, 여러 개의 원료로 혼합되어 있는 향신료조제품의 경우 함유되어 있는 한 개 이상의 원료들이 방사선 조사되었을 때 TL 비가 0.1이하를 나타낼 수 있으나, 글로우 1의 모양은 방사선 조사된 것으로 나타나므로 방사선 조사된 것으로 판정한다.

(8) 글로우곡선의 예

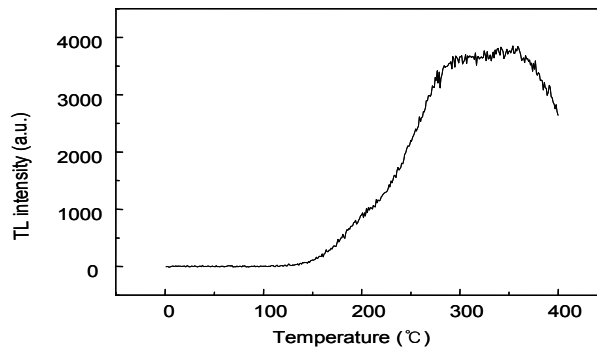


그림 1. 비조사된 시료의 글로우곡선

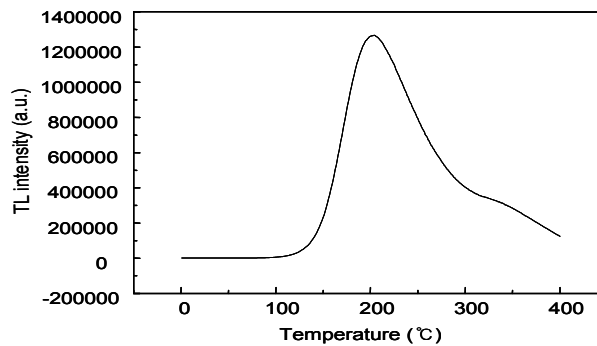


그림 2. 조사된 시료의 글로우곡선

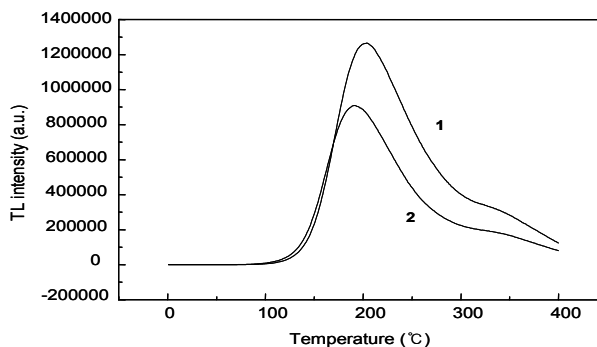


그림 3. 조사 및 재조사된 동일 시료의 글로우곡선
1 : 글로우 1, 2 : 글로우 2 (1kGy로 재조사)