

이온화 에너지를 이용한 식품가공

이주운 박사 / 한국원자력연구원 정음방사선과학연구소

식품산업의 고도화 및 국제화 시대를 맞아 고부가가치의 제품을 생산하기 위해서는 원료의 안정 공급, 위생적 생산, 효율적 제조공정, 안전저장 및 유통을 위한 기술이 확보되어야 하며, 시대의 흐름에 따라 가공·저장방법이 발전되어 왔다. 식품 가공의 목적 중 가장 중요한 것은 식품의 변패를 방지해서 보존성과 안전성이 높은 제품을 만드는데 있다. 그 중 미생물에 대한 변패를 방지하기 위한 대표적인 방법인 식품살균 방법에는 식품에 부착하는 미생물이나 취급 환경에 존재하는 유해 미생물을 단시간에 사멸시키는 수단으로 가열 또는 비가열 살균기술로 구분할 수 있다. 식품 가공 및 살균에 있어 가장 고려되어야 하는 점은 식품 고유의 맛과 영양을 손상시키지 않고 위생적으로 생산하는데 있다. 그러나, 가열 살균의 경우 열에 의한 영양성분의 파괴, 텍스처 및 색의 변화, 향기 성분의 손실등 품질 저하가 발생되며, 냉동이나 건조 방법은 장기간 저장할 경우 품질 및 소비자 기호도가 감소할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 비가열 살균기술을 이용한 식품이 점차 증가하고 있다. 현재 식품산업에서 이용되고 있는 대표적인 비가열 살균 기술은 이온화 에너지 조사, 초고압, 초음파, 고전압 펄스 전기장, 진동 자기장, 광 펄스와 같은 물리적 방법이 있다(그림 1).

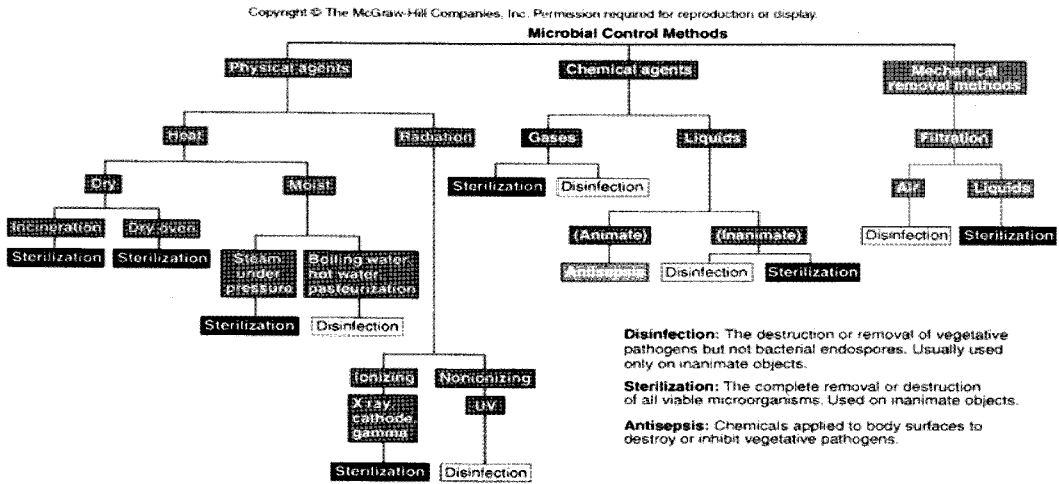


그림 1. 식품 가공 및 살균에 이용되는 기술 분류

한편, 이온화 에너지 조사(Ionizing Radiation)는 식품의 관능적 품질에 큰 변화를 일으키지 않으면서도 오염과 식품 유래 병원성 미생물, 유해 곤충을 제어하여 식품의 질과 안전성을 상승시키는 몇 가지 기술 중 하나이다. 방사선 조사기술은 크게 3가지의 목적으로 이용될 수 있다. 식품의 저장성 연장과 생물학적 식중독 예방, 가공공정 개선 및 품질개선, 그리고 국제 식량교역에서 검역관리에 활용할 수 있다. 특히, 이온화 에너지를 이용한 살균 방법은 식품을 포장한 상태로 연속처리가 가능하여 살균처리 후 재포장에 따른 2차 오염의 방지, 처리시 온도의 변화가 적어 냉장, 냉동식품에 대한 살균의 용이성, 화학 훈증 살충방법으로 인한 환경 파괴와 잔류 유해성분의 문제 해결과 함께 고 에너지 효율의 장점을 갖고 있으며, 국제기구(WHO /IAEA/FAO) 및 전문가들로부터 그 안전성과 건전성을 인정받아 2009년 현재 세계 56개국에서 식품에 대한 이온화 에너지 조사가 허가되어 사용되고 있다.

한편, 이온화 에너지 조사는 식품의 위생화를 위한 목적 이외에도 식품중 알레르기 물질과 나이트로소아민(N-nitrosamine) 및 바이오제닉 아민(biogenic amine)과 같은 발암성 물질 등 식품에 함유된 바람직하지 못한 독소 물질을 감소 또는 제거시키기 위한 방법으로 이용될 수 있을 뿐만 아니라 아질산염 함량을 감소시킨 육제품의 색도개선 및 한국 전통발효식품의 염농도 감소에도 이용될 수 있다. 또한, 오일 가공 중에 방사선을 조사하여 클로로필을 제거한 연구결과를 바탕으로 녹차잎 추출물의 색을 제거하는 데에도 응용을 하게 되었으며, 식품 또는 화장품 원료로 사용되고 있는 천연식품의 생물학적 활성에 변화 없이 색도를 개선시키는 데에도 방사선 조사가 산업적으로 이용되고 있다.

이와 같이 이온화 에너지 조사는 바람직하지 못한 불용성/독성 물질의 제거 및 기능성 식의약 소

재 개발 등 새로운 식품 가공기술로서 응용할 수 있는 커다란 잠재력이 있다. 따라서, 본보에서는 이온화 에너지 조사의 원리와 기술의 이용 현황 및 전망 등 이온화 에너지를 이용한 최근의 연구 결과를 소개하고자 한다.

1. 이온화 에너지(방사선) 조사 기술의 원리 및 이해

방사선은 방사성동위원소로부터 방출되는 α (알파), β (베타), γ (감마)선 외에도 기계적으로 발생되는 X선, 전자가속기에서 나오는 전자선(electrons), 원자로에서 만들 수 있는 중성자선 등이 있다. 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.

식품에 대한 방사선 조사는 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 전문적 의미에서 食品照射(Food Irradiation)란 초단파장의 감마선, 전자선, X-선을 이용한 식품처리를 말한다. 즉, 식품조사 기술이란 식품 또는 식품재료를 본래 상태에 가깝게 보존하거나 위생적 품질을 개선할 목적으로 특정 방사선 에너지를 피조사체 식품에 일정시간 노출시켜 살균, 살충, 생장조절, 물성개선 등의 효과를 거두는 기술이라고 할 수 있다.

방사선 에너지는 식품을 통과할 때 물질의 원자나 원자단, 분자 등을 전리시켜 이온을 생성하게 되며, 이러한 성질을 지닌 방사선을 전리방사선(ionizing radiation)이라 한다. 감마선, X-선, 전자선, 자외선(UV) 등이 전리방사선에 포함되며, 현재 관련 국제기구(FAO/WHO/IAEA)와 Codex 국제식품규격위원회에서 안전하게 식품조사에 이용될 수 있다고 밝힌 방사선은 감마선, 전자선 및 X-선이다.

식품조사에서 피조사체 식품에 대한 방사선 조사량은 국제단위계(SI)의 방사선 흡수선량(absorbed dose)으로 나타내며, 그 단위는 Gy(gray, 그레이)가 사용된다(1 Gy = 100 rad = 1 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.

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(그림 2). 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 발생효율이 낮아 실제적으로 이용률이 낮다.

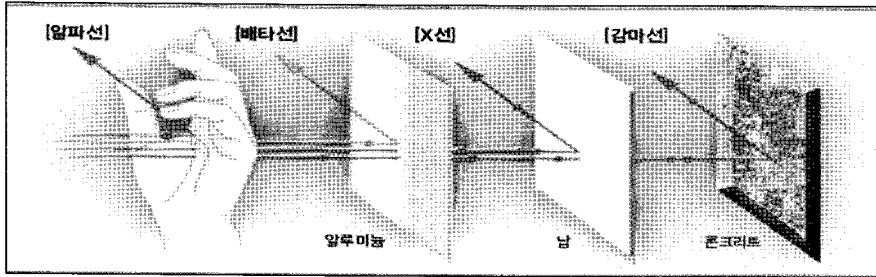


그림 2. 이온화 에너지 (방사선)의 투과도

2. 이온화 에너지 조사의 생물학적 작용

식품조사 기술은 방사선의 생물학적 작용으로 근채류 농산물(감자, 마늘, 양파, 밤 등)의 발아 및 발근 억제, 과일 등의 숙도 지연, 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.

또한, 방사선 식품조사는 에너지 소요량이 적은 장점을 가지고 있다. 즉, 2.5 kGy 조사시 21 kJ/kg의 에너지가 소요되는 반면, 가열살균, 조리(93°C), 냉동(-25°C, 3.5주) 및 냉장(0°C, 5.5일간) 가공은 각각 918 kJ/kg, 25,558 kJ/kg, 5,149 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°C 정도의 낮은 온도상승이 일어나 냉장, 냉동식품의 위생화 처리에도 아주 적합하다.

3. 이온화 에너지 조사의 활용분야

식품산업에서의 방사선조사기술은 병원성 미생물 및 유해 생물의 사멸에 의한 위생화, 식량자원의 장기보존 및 손실방지, 그리고 국가 간 식량교역에 따른 검역관리 기술로써 이용되고 있다. 각 식품에 대한 조사선량 범위와 주요 사용 목적을 표 1에 정리하였다. 방사선조사식품에 관한 초기연구는 주로 ① 농산물의 발아, 발근 억제(inhibition of sprouting), ② 농산물의 해충구제(insect

disinfestation), ③ 농축산물의 기생충 사멸(parasite disinfection), ④ 농산물의 속도조절(delay of physiological process), ⑤ 저장수명 연장 (extension of shelf-life) 등 농산물의 보존과 국제교역에서의 안전성 확보를 목적으로 이루어졌다.

표 1. 주요 식품군의 방사선 조사 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 별균처리 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

식자재의 저장 안정성 확보

식량자원은 수확 후 저장 및 유통과정에서 손실되는 양이 연간 10% 이상에 달하고 있으나, 직접적 증산방법에 의한 식량증가율은 연간 2.5% 정도에 그치고 있다. 이에 FAO 및 WHO 등 국제기구들은 약 20% 정도의 식량자원을 간접 증산시킬 수 있는 방사선 기술을 식량의 장기 안전저장방법으로 적극적으로 활용할 것을 권고하고 있다. 방사선 기술은 현재 56개국 250여 식품품목에 대해 발아/발근 억제, 속도지연, 해충 및 기생충 방제 및 부패/병원성 미생물의 살균 등 식품의 장기 안전저장 및 위생화에 사용되고 있다.

식중독 예방

방사선조사기술은 전자선 혹은 감마선을 식품에 쬐여 대장균 O157:H7, 살모넬라, 황색포도상구균 및 노로바이러스 등 식품에 존재하는 병원성 미생물을 효과적으로 사멸시킬 수 있는 식중독 예방기술로서 이용되고 있다. 특히, 미국 농무부(USDA)는 식중독 사고를 원천봉쇄하기 위해 2003년 5월 국립학교 점심 급식 프로그램에 방사선 조사된 쇠고기(햄버거 포함)의 공급을 승인, 2004년 1월부터 고등학교 학생들에게 방사선이 조사된 햄버거를 급식으로 공급하고 있다(그림 3). 본 연구팀도 방사선조사기술이 적용된 새로운 형태의 단체급식 관리체제인 RT-HACCP (Radiation Technology based

Hazard Analysis Critical Control Point, 방사선조사기술 기반 위해요소중점관리) 구축을 위한 연구를 진행 중에 있다.

식품교역에서 선진 검역처리기술

최근 국가간 농산물의 교역이 증가함에 따라 검역처리의 중요성은 점점 강조되고 있다. 그러나, 최근까지 농산물의 검역처리를 위해 사용되고 있는 화학훈증 처리 방법은 환경오염을 유발하며, 인체에 유독한 것으로 알려져 있어 세계적으로 점차 사용이 금지되고 있다. 방사선 기술은 지난 수십 년 동안 세계보건기구(WHO), 세계식량농업기구(FAO), 세계무역기구(WTO) 등의 국제기구 및 국제학회들을 통해 안전성이 입증되어 이러한 화학적 보존제 및 훈증제 등을 대체할 수 있는 가장 효과적인 기술로서 적극 권장되고 있다.

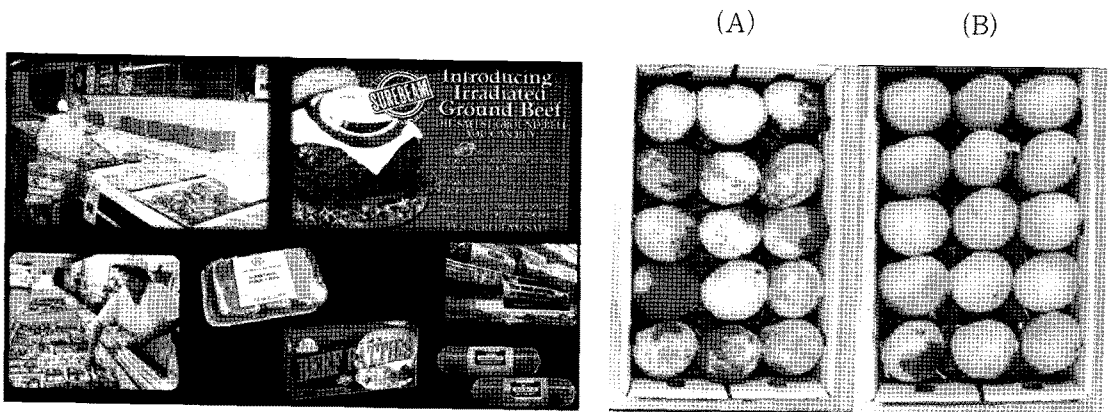


그림 3. 미국에서 판매되고 있는 방사선 조사 육제품 및 미국으로 수출되는 방사선 검역처리 망고 (A, 무처리; B, 방사선 조사)

특수목적 식품 개발

방사선 조사기술은 멸균환자식 뿐만 아니라 전투식량, 우주식품, 비상식량 및 즉석 편의식품 등 미래형 특수목적 식품의 생산에 이용된다. 이들 식품은 상온에서 장기간 보관이 용이해야 하며, 즉석에서 섭취할 수 있도록 안전하게 생산되어야 한다. 특히, 방사선 기술은 수분이 없는 건조상태의 식품 살균에 매우 적합하기 때문에 이들 식품 살균에 매우 유용하게 활용할 수 있다. 현재 네덜란드, 영국, 남아프리카공화국 등은 면역결핍 환자들을 위한 환자용 멸균식 생산을 위해 최대 75 kGy의 방사선조사를 허가 하였으며, 미국은 NASA와 미육군이 공동으로 44.5 kGy로 방사선 조사된 육가공품을 개발하여 우주식품 및 전투식량에 활용하고 있다. 한편, 우리나라도 방사선 조사 살균 처리된 김치, 라면, 생식바, 수정과를 개발하여 2008년 한국최초 우주인 이소연 박사에게 공급한 바 있으며, 현재 비빔밥, 불고기, 미역국, 참뽕(오디)음료를 우주식품으로 개발하기 위한 연구를 수행중에 있다 (그림 4).



그림 4. 방사선 조사된 한국형 우주식품
(라면, 김치, 비빔밥, 불고기, 미역국, 생식바, 참뽕음료, 수정과)

식품 가공공정 개선/신소재 개발

방사선 기술은 천연 식품자원의 산업적 활용을 극대화시킬 수 있는 식품가공 및 공정 개선 기술로도 활용된다. 식품 제조용 원료로 사용되는 천연 식품자원은 생리활성 등 기능성을 유지하면서도 제품 첨가시 제품의 특성에 영향을 미치지 않도록 무색, 무미, 무취의 상태로 정제하는 공정이 가장 중요한 요소인데, 일부 천연 식품자원은 이러한 문제로 인해 산업적 이용이 제한되고 있다. 방사선 조사기술은 천연화합물의 생리활성을 그대로 유지시키면서 불필요한 색소 및 잔류농약을 비롯한 불순물을 제거하여, 고순도, 고농도의 천연화합물을 제조하는 가공기술로서 이용되고 있다. 그 예로 녹차에 방사선을 조사하게 되면 녹차에 존재하는 불용성 색소성분은 제거되는 반면 녹차 고유의 생리활성은 변화가 없거나, 오히려 증진된다. 이러한 기술은 기능성 식의약 소재로서 아주 유용하게 활용될 수 있으며, 이미 방사선 조사기술을 이용한 제품을 개발하여 산업화에 성공한 바 있다(그림 5).

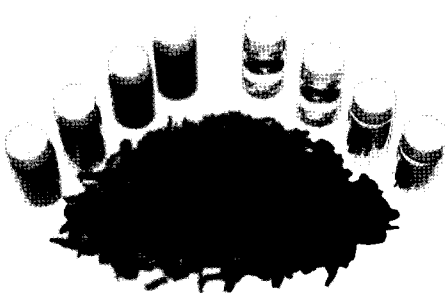


그림 5. 방사선 이용 천연소재의 불용성분 제거 기술과 산업화 사례

식품 유해물질 제거기술

방사선 기술의 산업적 이용 활성화를 위한 새로운 시도로 물리적 에너지인 방사선과 생명공학을 융합하여 식품내 알레르기 유발물질 및 독성 발암물질인 나이트로 자민류, 바이오제닉 아민류, 고시 폴, 에틸 카바마이트 등을 제거하는 기술을 세계최초로 개발한 바 있다. 이를 통해 방사선이 식품에 자연적으로 존재하는 알레르기 유발물질과 식품의 가공 및 저장 중 생성될 수 있는 독성물질은 방사선에 의해 제거됨이 과학적으로 증명되었고 방사선 식품이용의 일차적 목적인 식중독 미생물의 사멸과 함께 부차적으로 화학적 안전성 개선에도 큰 역할을 할 수 있음을 입증하였다.

4. 결 론

지난 반세기 동안 국제적으로 식품 및 공중보건관련 산업에서 방사선조사 기술을 이용한 위생화 연구결과는 종래에 사용되어 오던 타 방법의 많은 문제점을 보완하거나 해결하기 위한 대체방법으로서 그 안전성과 경제성이 인식되어 왔으며, 향후 세계 각 국에서는 자국내 보건 위생환경의 향상과 수출주도품목의 경제적인 장점과 이익에 관련된 중요한 식품산업기술로서 방사선 조사기술의 이용은 더욱 늘어날 전망이다. 그러나, 상기에서 언급한 바와같이 식품의 가공 살균기술에는 매우 다양한 방법이 사용될 수 있으므로, 식품산업에서 이용될 수 있는 식품 살균공정의 장단점을 충분히 이해하고 다양한 살균방법의 선택과 조합을 통해 제품에 따른 적합한 살균방식을 사용해야 할 것이다.

방사선은 향후 식품, 의약품 및 공중보건관련 산업을 획기적으로 발전시킬 수 있는 기술로 활용될 수 있다. 그러나, 방사선 식품조사 기술의 산업적 활용 증진을 위해서는 무엇보다 먼저 소비자의 이해가 선행되어야 하므로 사실에 입각하여 정확하게 홍보되어야 할 것이며, 기술의 사용을 위한 법적 근거가 마련되어야 한다. 또한 지금까지 본 기술의 연구는 정부주도 하에서 추진되었으나, 앞으로는 소비자나 기업에게 자유로운 기술선택의 기회를 제공하기 위한 공동참여 연구와 방사선조사 제품의 관리 및 적절한 홍보 등의 협력이 요구된다. 따라서 식품 및 공중보건관련 산업에서 방사선 기술의 이용은 이들 산업의 건전한 발전을 위해 보다 적극적이고 긍정적인 자세로서 연구개발과 산업화 기반을 다져 나감으로써, 소비자와 생산자의 안전과 이익 보장은 물론 국민보건과 국가경제 향상에도 크게 이바지할 수 있고 나아가 우리의 실정에 알맞은 새로운 기술의 정착을 기대할 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

- Canadian Food Inspection Agency. Recommended Canadian code of practice for food irradiation (2002).
- Cuero RG, Smith JE, Lacey J. Interaction of water activity, temperature and substrate on mycotoxin production by *Aspergillus flavus*, *Penicillium viridicatum* and *Fusarium graminearum* in irradiated grains. Trans. Brit. Mycol. Soc. 89: 221-226 (1987).
- European Commission, Statement of the Scientific Committee on Food on a Report on 2-alkylcyclobutanone (expressed on 3 July 2002), SCF/CS/NF/IRR/26 ADD 3 Final.

- FAO. Guidelines for the use of irradiation as a phytosanitary measures. International Plant Protection Convention, ISPM No. 18, Rome, Italy (2003).
- FAO/IAEA. Irradiation for food safety.
- Food Standards Agency-Irradiated food. Available at: http://www.food.gov.uk/safereating/rad__in__food/irradfoodqa/. Retrieved on 2008-01-26.
- Global Industry Analysts. Food Irradiation Trends. *A global Strategic Business Report*. Global Industry Analysts, Inc., San Jose, California, (2005)
- India seeks early breakthrough for mango exports to US, Japan. Available at: <http://webetc.info/TYNC/03-19-06.mango-irradiation.pdf>
- IPPC. International standards for phytosanitary measures (2008).
- Ito H, Islam MS. Effect of dose rate on inactivation of microorganisms in spices by electron-beams and gamma-rays irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* 43: 545-550 (1994).
- Jo C, Lee JI, Ahn DU. Lipid oxidation, color changes and volatiles production in irradiated pork sausage with different fat content and packaging during storage. *Meat Sci*, 51: 355-361 (1999).
- Kume T, Furuta M, Todoriki S, Uenoyama N, Kobayashi Y. Quantity and economic scale of food irradiation in the world. *Radioisotopes*. 58: 25-35 (2009).
- Kume T, Furuta M, Todoriki S, Uenoyama N, Kobayashi Y. Status of food irradiation in the world. *Radiation Physics and Chemistry*. 78: 222-226 (2009).
- Kim JK. Hepatoprotective effects of low molecular weight hyaluronic acid prepared by gamma irradiation. Ph.D dissertation. Korea University (2008).
- Lee, JW. Application and prospect of food irradiation for providing the safe food materials. *Food Industry and Nutrition*, 11(3), 12-20 (2006)
- Loaharanu P. Irradiation as a cold pasteurization process of food. *Vet. Parasitol.* 64: 71-98 (1996).
- Morris SC, Jessup AJ. Irradiation, pp. 163-190, In: Paull RE, Armstrong JW (ed) *Insect pests and fresh horticultural products: Treatments and responses*, CAB International, Wallingford, UK (1994).
- Thayer DW, Boydm G, Foxm JB, Lakritzm L, Hampton JW. Variations in radiation sensitivity of foodborne pathogens associated with the suspending meats. *J. Food Sci*, 60: 63-67 (1994).
- Website: www.sciencedirect.com
- WHO. 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, 1999.
- WHO. International consultative group on food irradiation. Available at: <http://www.afro.who.int/des/fos/links.html>
- WTO. Technical barriers to trade. Available at: http://www.wto.org/english/tratop__E/tbt__e/tbt__e.htm