

식품 및 공중보건산물의 방사선 살균기술

육흥선* · 김동호 · 조철훈 · 김영지** · 변명우

한국원자력연구소 방사선식품 · 생명공학연구팀

*충남대학교 식품영양학과 · **영남이공대학 식음료조리계열

Radiation Sterilization of Food and Hygienic Products

Hong-Sun Yook*, Dong-Ho Kim, Cheorun Jo, Young-Ji Kim** and Myung-Woo Byun

Department of Radiation Food Science and Biotechnology, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

*Department of Food and Nutrition, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**Division of Food Beverage and Culinary Arts, Yeungnam College of Science and Technology, Daegu 705-703, Korea

I. 머리말

미생물은 지구생태에서는 각종 유기물과 무기물의 순환에 기여하며 발효식품의 제조나 유용물질 생산의 도구로 이용되는 등 인류에게 유용한 측면이 크다. 그러나 다른 한편으로는 부패에 의하여 식량자원을 손상시키고 각종 위생상의 병해를 초래하는 심각한 유해성도 갖는다. 따라서 이러한 유해 미생물의 제어에 관한 기술이 여러 방법으로 개발되어 왔으며 특히 식품과 각종 보건 산물은 경구 섭취나 피부접촉 등의 경로를 통하여 사람에게 직접적인 미생물 오염원으로 작용하게 되므로 더욱 중요한 문제로 다루어져왔다. 그러나 미생물은 식품의 원료인 농·수·축산물이나 공업용원료, 생산과정에서의 혼입, 보존과정에서의 증식 등을 통하여 다양하게 유입되고 각 제품의 특성이나 오염미생물의 생리적 특성도 모두 달라 이를 효과적으로 제어하기가 어렵다. 아울러 제품의 고유특성(식품의 관능요소, 공중보건산물의 기능성 등)을 유지하고 미생물 이외의 안전성(주로 화학적 독성물질)까지도 고려하자면 gas살균, 화학보존료, 열살균, 수분활성도 조절, 저온유통 등의 기존 미생물 제어기술은 제한성을 가질 수밖에 없다. 이러한 제한적인 미생물 제어 기술을 보완·대체해줄 수 있는 새로운 방법으로 제시된 것이 바로 방사선 조사에 의한 미생물의 살균 기술이며 현재 식품 및 공중보건산물의 살균에 감마선 조사가 유용하게 사용되고 있다. 따라서 아래에서는 감마선 조사를 이용한 식품과 공중보건산물의 위생화에 관한 내용을 주로 다루고자 한다.

식품 및 공중보건산물의 방사선 조사 효과에 대한 연구는 크게 대상 물질의 물리·화학적 변환, 생화학적 활성 변화, 살충 또는 살균과 같은 생물학적 효과와 안정성의 분야에서 다양하게 진행되어 왔다. 전분의 물성개선이나 육류의 착색 효과, 유용물질의 활성 감소효과 등은 방사선 조사에 의한 식품의 물리·화학적 변환에 관한 연구의 예라 할 수 있다. 그러나 식품 및 공중보건산물의 방사선 조사 효과에 대한 연구의 대부분은 생물학적 효과, 특히 미생물의 살균에 그 초점이 맞추어져 있다. 한편, 수 년 간에 걸친 각 분야의 연구를 통하여 방사선 조사에 의한 미생물 살균의 효과, 안정성, 산업화 공정의 적합성 등은 이미 검증된 바 있으며 현재 세계 40여 개 국에서 무조건적, 또는 제한적 조건을 두고 100여가지 식품항목 및 대부분의 공중보건산물에 대하여 방사선 조사가 허용되고 있다. 우리나라에서도 1987년 6월 경기도 여주에 상업적 다목적용 방사선 조사시설을 준공하여 가동 중에 있으며 13개 식품품목군과 다양한 공중보건산물에 대한 상업적 방사선 조사가 실시되고 있으나 그 적용 범위는 아직도 제한적이다. 그러나 아직까지도 방사선 조사 기술은 일 반 국민의 심리적 거부감과 안정성에 대한 우려가 내재되어 있어 식품과 공중보건산물 산업 전반에 이를 적용하는 데에는 얼마간의 시간이 필요할 것으로 보이며 이러한 우려를 불식시키고 방사선 조사 기술을 확대하여 식품을 포함한 공중보건산물의 보존과 위생화, 식량자원의 안정적 공급, 품질향상에 기여하기 위해서는 이 분야의 지속적인 연구와 홍보가 필요하다.

따라서 본 발표에서는 방사선 조사를 이용한 미생물 살균 기술 적용의 확산 측면에서 그 제어 대상인 미생물에 초점을 맞추어

1) 미생물의 방사선에 대한 반응 및 살균기작

Corresponding author : Myung-Woo Byun, Department of Radiation Food Science and Biotechnology, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea
E-mail : mwbyun@kaeri.re.kr

- 2) 미생물의 종류에 따른 방사선 감수성 차이
- 3) 미생물의 방사선 감수성에 미치는 환경인자의 영향
- 4) 방사선 조사를 이용한 미생물 살균의 산업적 작용

등에 관한 내용을 살펴보고자 한다

II. 미생물의 방사선에 대한 반응 및 살균기작

식품 및 공중보건산물의 살균 대상인 미생물들은 크게 세균의 영양세포와 포자, 효모 및 사상 곰팡이, 그리고 바이러스로 구분할 수 있으며 이 생물들은 자기 특징적인 형태 또는 생리적 차이를 갖고 있어 방사선에 대한 반응과 살균 정도에 차이를 보인다. 그러나 어떤 경우이든 방사선에 대한 가장 직접적인 표적은 유전정보 물질인 DNA인 것으로 알려져 있다. DNA에 대한 방사선의 직접효과는 DNA 분자결합 자체의 파괴에 의하여 이루어지고 간접효과는 DNA의 주변환경을 이루는 물분자를 수소분자(H[·]), 수산radical(OH[·]), 수용성 전자(e⁻)와 같은 1차 radical로 전환시키는 작용에 의하여 이루어진다. 특히 OH[·] radical은 DNA분자의 수화 경계면에서 90%정도의 손상율을 차지함으로써 미생물의 방사선 감수성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 직접적인 DNA의 손상은 DNA의 구성요소인 purine과 pyrimidine 염기, 그리고 deoxyribose의 화학적 변환을 유도하여 DNA 단일사슬의 phosphodiester 결합이나 DNA의 이중나선 결합구조를 파괴함으로써 나타난다. 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 알려져 있다. 한편, 방사선은 DNA 이외에도 세포막 등에 작용하여 미생물의 방사선에 의한 감수성과 저항성에 부가적 영향을 준다. 아래에 방사선에 의한 미생물의 반응 기작을 정리해 보았다.

1. 방사선의 표적이론

생물세포의 표적이론은 어떤 자극에 대하여 세포의 생존에 중요한 분자나 세포구조가 타격을 받거나 불활성화 되어 세포가 사멸된다는 것을 가정한 것이다. 그러나 사실 생물세포 같은 복잡한 체계에는 특정한 표적 이외에도 여러 요소가 복합적으로 작용하므로 하나의 표적만이 그대로 작용하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 방사선에 의해 불활성화 되는 미생물이나 바이러스의 가장 중요한 표적은 DNA(또는 바이러스의 RNA)인 것으로 규정되고 있다. 역사적으로, 표적이론은 Dessauer(1923년), Lea(1946년) 등에 의하여 주장되었으며 실제로 DNA가 방사선에 대한 표적이라는 사실은

DNA의 구조와 기능에 대한 이론이 이해되기 시작한 1960년대 이후부터 확립되었다.

2. 방사선에 의한 DNA의 손상

방사선에 의한 DNA의 손상은 직접적인 작용과 간접적인 작용의 복합적 요소에 의하여 유발된다. 직접적인 작용이란 DNA의 single strand나 double strand의 절단, 결실, 전환과 같이 DNA의 분자구조가 방사선 에너지에 의하여 직접적으로 파괴되는 것이며 간접적인 작용이란 방사선에 의하여 생성된 라디칼 등의 화학적 작용에 의하여 매개되는 반응이다. 방사선에 의한 DNA의 절단현상은 1960년대 중반 sucrose gradient sedimentation velocity method를 통하여 확인되었으나 그 정확한 메카니즘은 아직도 명확하지 못하다. 다만 공유결합과 같은 DNA의 물리적 결합구조나 DNA의 구성요소인 purine 및 pyrimidine 염기의 손상에 의하여 DNA의 구조가 변화되고 궁극적으로 DNA 복제와 같은 생명현상을 저해함으로써 미생물의 사멸이 이루어지는 것으로 생각된다. 라디칼에 의한 간접작용은 주로 염기의 구조를 변화시켜 DNA 염기서열에 변화를 일으키는 것으로 화학적 돌연변이와 비슷한 점이 많다.

3. DNA의 복구

DNA가 방사선의 직접적인 표적이라는 것이 사실이라면 방사선에 대한 각 미생물의 감수성은 큰 차이가 없어야 하나 실제로는 그렇지 않다. 초기의 방사선 멸균에 관한 연구에서는 각 미생물간의 방사선 감수성 차이에 대한 많은 의문점이 있었다. 그러나 손상된 DNA는 세포에서 스스로 복구되며 이 복구능력이 각 미생물에 따라 다르다는 사실이 밝혀지면서 그 의문점은 해소되었다. 손상된 DNA의 복구는 그 원인에 따라 다양한 기작으로 수행되는데 여기에는 nuclease, ligase, glycosidase 등의 효소, 각종 cofactor, ion 등이 복잡하게 관여한다. 그러나 DNA의 복구에는 한계가 있어 5'DNA의 탈인산화와 같은 비가역적 변화에 이르게 되면 복구는 불가능해진다.

4. 세포막

위에서 언급한 바와 같이 방사선에 대한 미생물이나 바이러스의 가장 중요한 표적은 DNA(또는 바이러스의 RNA)이다. 그러나 부가적으로 DNA 이외의 세포구조들도 방사선에 의하여 불활성화 되어 미생물의 사멸에 상승작용을 나타내는 것으로 알려져 있다. 세포구조의 손상이 DNA이 손상과 다른 점은 DNA는 주로 방사선의 직접효과에 의하여 손상을 받으나 세포구조는 주로 radical에 의한 간접작용에 의하여 손상을 받는다는 점이다. 이들 중 지금까지 가장 흥미로운 결과를 나타낸 것은 세포질막이다. 세포질막은 미생물의 세포질과 외부환경을 구획하는 1차적인 기능 이외에도 물질

의 수송, 신호의 전달, 대사과정의 수행과 같은 다양한 기능을 갖는다. 특히 원핵세포는 단위막으로 구분된 세포소기관(소포체, 미토콘드리아 등)이 없어 대부분의 대사과정이 세포질막에서 이루어지므로 세포막의 손상이 세포의 사멸에 미치는 영향이 크다. 또한 진핵세포는 DNA가 핵막에 둘러싸여 핵이라는 하나의 밀집된 구조를 형성하는데 비하여 원핵세포인 세균은 핵이 없어 DNA가 세포질내에 분산되어 있으므로 동일한 방사선에 의한 DNA의 손상이 상대적으로 적다. 따라서 방사선에 의한 세포막의 손상여부가 더욱 중요한 의미를 갖는다. 미생물이 방사선 조사에 의하여 DNA에 손상을 받으면 즉시 DNA의 복구가 시작되는데 이 DNA의 복구에 관여하는 효소도 역시 미생물의 세포질막에 존재한다. 따라서 방사선 조사에 의하여 세포막에 손상을 입게 되면 방사선의 직접작용에 의하여 손상된 DNA의 복구 시스템이 작동하지 않아 결국 DNA의 손상을 고착화하여 미생물의 사멸을 초래하게 된다. 이런 관점에서 본다면 세포질막은 DNA에 이어 방사선의 미생물에 대한 두 번째 표적으로 보는 것이 합당하다. 물론 세포질막 이외의 세포 내 다른 구조물들도 방사선의 표적이 되지만 지금까지의 실험적 증거들은 DNA와 세포질막이 가장 민감한 방사선 표적임을 증명하고 있다.

5. 방사선 감수성의 표시

방사선 조사에 의한 미생물의 반응은 조사선량에 대한 생존 미생물의 수를 log값으로 나타낸다. 일반적으로 이 그래프는 역치 이하에서는 'shoulder'가 특징적으로 나타나고 유효 선량의 범위에서는 semi-log의 직선이 얻어지는데 이 직선에서 미생물의 개체수를 1/10로 줄이는데 필요한 방사선량을 D_{10} -value로 하여 그 감수성과 저항성을 표시할 수 있다.(Fig. 1). 이 값은 아래와 같이 조사선량과 미생물 생존율의 반비례적 직선관계로 나타낼 수 있다.

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

여기서 N_0 는 미생물의 초기균수이고 N 은 방사선 조사 후 생존한 미생물의 수이다. 미생물의 생존곡선은 shoulder를 갖게되므로 방사선에 대한 미생물의 반응은 이 shoulder의 길이(L-값)와 생존곡선의 지수적 변화인 D_{10} -값으로 나타내는 것이 유효하다. 때로는 log 생존곡선으로부터 미생물의 완전사멸선량을 계산하여 나타내기도 하는데 일반적으로 10^{12} cell/g 수준의 초기미생물을 완전 사멸할 수 있는 방사선의 선량(12D)을 표시한다. 한편, 식품이나 공중보건산물과 같이 여러 종의 미생물집단이 혼재되어 있을 경우에는 단일 종과는 다른 다양한 곡선이 얻어질 수 있는데 이 경우에는 가장 방사선 저항성이 큰 종을 기준으로 살균 선량을 설정하는 것이 바람직하다.

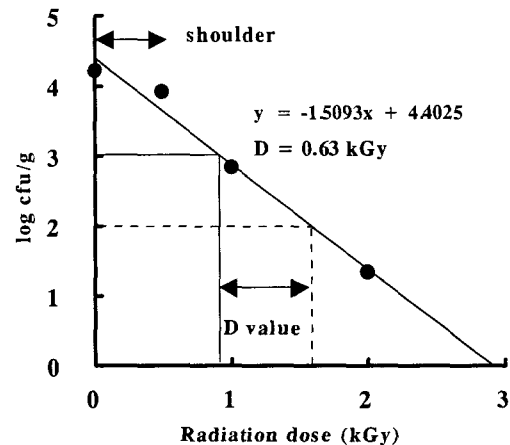


Fig. 1. Survival curves of general microorganisms and D_{10} value.

III. 미생물의 종류에 따른 방사선 감수량의 차이

미생물은 각 분류군에 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 성장 상태는 영양세포의 성장단계와 포자로 구분하는 것이 보통이다. 일반적으로는 고등 미생물일수록 방사선에 민감하며 포자는 영양세포에 비하여 방사선 저항성이 큰 것이 보통이다. 그러나 때로 방사선에 매우 민감한 포자가 있기도 하고 그 반대로 저항성이 매우 강한 영양세포도 보고되고 있어 미생물의 종에 따라 많은 예외가 있기도 하다.

식품 및 공중보건산물에서 방사선 살균의 관심 대상이 되는 미생물들은 기존의 살균방식으로 제어하기가 어려운 부패성 미생물이나 공중보건에 위험을 초래할 수 있는 병원성 미생물인 경우가 많다. 일반적으로 식품의 방사성 살균은 살균정도, 대상 미생물, 조사선량 등에 따라 방사선 완전살균, 방사선 병원성 미생물 살균, 방사선 부분 살균의 세단계로 구분한다. 방사선 완전살균은 세균포자를 비롯한 모든 미생물의 사멸을 목적으로 하며 통조림 식품, 환자용 무균 식품, 의약품, 식품의 포장지 등이 그 대상이고 이때 필요한 조사선량은 3.0~50 kGy에 이른다. 방사선 병원성 미생물 살균은 주로 식품과 공중보건산물에 오염된 병원성 미생물의 살균을 목적으로 1.0~10 kGy의 선량으로 조사하며 냉동 어패류, 육류, 향신료, 건조 채소류 등을 대상으로 한다. 방사선 부분살균은 대상 제품의 일반 오염 미생물의 생존수를 감소시켜 보존기간 또는 냉장기간을 연장시키는 처리로서 0.5~10 kGy의 방사선 조사선량이 요구된다. 그러나 식품이나 공

중보건산물에 분포하는 미생물들은 원료, 제조공정 등에 따라 각기 다른 microflora를 구성하고 있으며 방사선에 대한 감수성도 미생물에 따라 다르므로 일괄적으로 살균기준을 정하기는 어렵다. 즉, 식품과 공중위생산물의 미생물 살균에는 해당 제품의 미생물 분포와 살균 대상 미생물의 방사선 감수성의 사전조사가 적정 조사선량의 결정에 중요한 자료가 된다. 따라서 아래에 각 미생물의 방사선에 대한 감수성 및 저항성 차이와 그 반응 기작을 살펴보기로 한다.

1. 세포구조와 방사선 감수성

바이러스, 세균의 영양세포, 포자, 효모 및 사상곰팡이 등은 매우 다른 형태적 차이를 갖고 있으며 특히 1) 세포질의 수분함량, 2) target 염색체 DNA의 크기, 3) 복구 효소 및 DNA 분해 nuclease의 구조 4) genome물질의 다양성 등에 따라 방사선에 대한 반응이 달라진다(Table 1). 가장 단순한 형태의 생명체인 바이러스는 생물학적 관점에서 보면 실제 세포구조를 갖고 있지 않다. 물론 어떤 바이러스의 경우에는 상당히 복잡한 구조를 갖고 있기는 하지만 대사에 필요한 모든 필수요소를 갖고 있진 않다. 바이러스는 capsid라는 단백질막에 싸여진 DNA 또는 RNA의 nucleic acid genome으로 구성되어 있다. 특히 바이러스는 대부분 수분이 낮은 결정형의 구조를 하고 있으므로 방사선에 대한 저항성이 상당히 크다. 세균의 포자도 세포질내에 자유수가 거의 없거나 아주 없는 휴지 상태의 경우이다. 바이러스와의 특징적인 차이점은 그 핵심부위안에 초기성장과 독립적인 대사를 발달시킬 수 있는 필수 세포효소와 세포 부분들을 가지고 있다는 것이다. 포자의 핵심 부위의 효소나 DNA는 상대적으로 고화된 "spore element"가 있는데 이는 다소 뼈조각과 유사함을 갖는다. 포자내의 모든 대사작용은 단순한 몇 가지의 효소작용을 제외하고는 제어된다. 세균성 포자의 피막은 다층의 비투과성 보호막으로 되어있으며 이 보호막이 방사선 조사에 의하여 생성된 외부환경의 radical과 독소를 차단하여 높은 방사선 저항성을 나타낸다. 세균의 영양 세포는 바이러스보다 100배 또는 1,000배 이상 큰 genome을 가지며 포자와는 달리 70~80%의 수분함량을 갖는 세포질에 genome이 떠있는 상태이다. 영양세포의 높은 수분함량은 세포질내에서의 radical 형성을 용이하게 하여 방사선 감수성을 증대시킨다. 이러한 특성에 따라 영양세포는 포자에 비하여 20배 이상의 높은 방사선 감수성을 갖는다. 그러나 *M. radiodurans*와 같이 DNA의 복구기작이 우수한 미생물들은 영양세포라도 포자보다 큰 방사선 저항성을 갖는 경우도 있다.

진핵세포인 효모나 곰팡이류는 세균보다 더 큰 genome을 가지고 있으며 DNA가 핵막에 둘러싸여 염색체 상태로 존재하므로 방사선에 대하여 보다 직접적인 표적이 된다. 따라서 효모나 곰팡이는 일반적으로 원핵세포보다 방사선감수성이 크다. 그러나 예외적으로 각 세포마다 100개 정도의

핵을 갖는 다핵성 곰팡이와 같이 방사선에 높은 생존율을 나타내는 경우도 있다.

Table 1. Characteristics and radio-resistance of some microbial groups

Microbial group	water content	genome (relative)	DNA	radio-resistance		
Virus	low	1	dispersed	resistant		
Bacteria	vegetative	general	high	100~1,000	dispersed	sensitive
		resistant	high	100~1,000	dispersed	resistant
	spore		low	100~1,000	dispersed	resistant
Fungi	filamentous		high	>1,000	condensed	sensitive
	spore		low	>1,000	condensed	moderate
Yeast	vegetative		high	>1,000	condensed	sensitive

2. 세균의 방사선 감수성

세균의 방사선에 대한 반응은 영양세포와 포자에서 큰 차이를 나타낸다. 일반적으로 포자를 형성하지 않은 세균의 경우 D₁₀ 값은 0.5 kGy 내외인 것이 보통이다(Table 2). 따라서 *E. coli*, *Salmonella* 등의 병원성 세균 살균을 목적으로 한 경우에는 3 kGy 내외의 저선량 조사로도 충분한 효과를 기대할 수 있다.

세균의 포자, 특히 방사선 저항성이 큰 *Clostridium*과 *Bacillus* 속의 세균 포자는 열살균과 같은 식품의 일반 살균뿐 아니라 방사선을 이용한 살균에서도 매우 중요하다. 따라서 통조림의 열살균과 마찬가지로 방사선을 이용한 식품의 살균에서도 이들 세균포자를 살균의 지표로 하는 경우가 많다. 예를 들면 식육의 방사선 멸균에서 *C. botulinum* type A와 B를, 어류의 방사선 살균에서는 *C. botulinum* type E를, 의료가기의 멸균에는 *C. tetani*, *C. perfringens*, *C. septicum* 등의 완전 살균을 목표로 하는 것이다. Table 3과 아래에 몇 가지 대표적인 포자 형성균들의 특징과 방사선 저항성을 간단히 설명하였다.

Clostridium botulinum : *C. botulinum*은 독소를 생산하여 신경증상의 botulinum식중독을 일으키는 것으로 잘 알려진 미생물로 때로 상처의 전염이나 장내 독성전염의 원인이 되기도 한다. *C. botulinum*은 항체 반응으로 식별되는 A, B, C, D, E 그리고 F 형의 6가지의 군으로 나뉘어진다. 이 중 특히 type E는 상대적으로 저항성이 약하다. 또한 이미 생성된 Botulinum toxin은 열에 의해서는 상당부분 불활성화 되지만 방사선에는 매우 저항성이 강하여 Botulinum toxin의 활성을 1/10 정도로 감소시키려면 100 kGy 이상의 고선량 조사가 필요하다. 일반적으로 식품의 살균에 사용되는 방사선의 조사선량이 10 kGy 내외인 점을 감안하면 방사선 조사를 통하여 이미 생성된 Botulinum toxin을 파괴한다는 것은 어렵다는 것을 알 수 있다.

*Clostridium botulinum*은 혐기성 미생물로 비닐포장이나 밀

봉한 통조림에서도 생존하며 채소류, 육류, 과일 등 여러 식품에서 검출된다. 어류에서 주로 관찰되는 *C. botulinum* type E 포자는 상대적으로 방사선에 민감하지만 type A나 B와는 달리 냉장상태에서도 성장하여 toxin을 생산한다. 특히 *C. botulinum* type A, B, F는 단백질을 분해하여 부패시 불쾌취를 감지할 수 있는데 비하여 type E는 단백질 분해 균주가 아니기 때문에 아무 불쾌치도 느낄 수 없으므로 관능적으로 식별이 어려운 문제점이 있다.

Table 2. D₁₀ value of selected nonsporogenic bacteria

Bacterium	Medium	Radiation Temp.	D ₁₀ (kGy)
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	homog, fish	ambient	0.03~0.06
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	low-fat ground beef	ambient	0.12
<i>Pseudomonas putida</i>	poultry meat	10°C	0.08
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	water	ambient	0.12~0.14
<i>Campylobacter jejuni</i>	ground beef	ambient	0.14~0.16
<i>Aeromonas hydrophila</i>	ground beef	2°C	0.14~0.19
<i>Proteus vulgaris</i>	homog, oyster	5°C	0.20
<i>Yersinia enterocolytica</i>	ground beef	ambient	0.1~0.21
<i>Shigella dysenteriae</i>	homog, shrimp	frozen	0.22
<i>Shigella dysenteriae</i>	homog, shrimp	frozen	0.41
<i>Brucella abortus</i>	ground beef	ambient	0.34
<i>Listeria monocytogenes</i>	poultry meat	12°C	0.49
<i>Listeria monocytogenes</i>	phosphate butter	0°C	0.18
<i>Listeria monocytogenes</i>	tripticase soybroth	0°C	0.21
<i>Listeria monocytogenes</i>	Chicken feed powder	0°C	0.44
<i>Escherichia coli</i>	low fat ground beef	ambient	0.43
<i>Escherichia coli</i>	mech. deboned chicken	-5°C	0.42
<i>Escherichia coli</i>	mech. deboned chicken	5°C	0.28
<i>Escherichia coli</i>	mech. deboned chicken	10°C	0.23
<i>Salmonella anatum</i>	ground beef	ambient	0.67
<i>Salmonella enteritidis</i>	low fat ground beef	ambient	0.70
<i>Salmonella enteritidis</i>	mech. deboned chicken	10°C	0.62
<i>Salmonella newport</i>	liquid whole egg	0°C	0.32
<i>Salmonella oranienburg</i>	liquid whole egg	0°C	0.32
<i>Salmonella panama</i>	ground beef	ambient	0.66
<i>Salmonella paratyphi</i>	homog, oyster	5°C	0.75
<i>Salmonella paratyphi</i>	homog, oyster	5°C	0.85
<i>Salmonella stanley</i>	ground beef	ambient	0.78
<i>Salmonella typhimurium</i>	ground beef	ambient	0.55
<i>Salmonella typhimurium</i>	mech. deboned chicken	-30°C	0.90
<i>Salmonella typhimurium</i>	mech. deboned chicken	0°C	0.45
<i>Salmonella typhimurium</i>	mech. deboned chicken	10°C	0.39
<i>Salmonella typhosa</i>	homog, oyster	5°C	0.75
<i>Staphylococcus aureus</i>	low fat ground beef	ambient 0°C	0.58
<i>Staphylococcus aureus</i>	mech. deboned chicken	0°C	0.47
<i>Lactobacillus sp.</i>	ground beef	ambient	0.30~0.88
<i>Streptococcus faecalis</i>	homog, shrimp	5°C	0.75
<i>Streptococcus faecalis</i>	butter	5°C	0.90

Clostridium perfringens: *C. perfringens*은 의료 또는 수술 용 기구의 방사선 조사에서 중요한 지표균주이다. *C. perfringens* 식중독은 복통, 설사, 어지럼증, 그리고 드물게도 구토를 일으키는데 이 역시 독소를 생산하며 생산되는 독소의 종류에 따라 다섯 개의 type(A~F)으로 구분된다. Type A

는 일반적 식중독을 유발하며 type C는 심각한 소장 내 염증을 유발하는 장염 증세를 나타낸다. *Clostridium perfringens*은 자연에 보편적으로 분포하여 토양, 먼지 물 또는 우유에 아주 오랜 기간동안 생존하며 사람이나 가축의 배설물, 신선육, 가공육, 그리고 건조제품에서도 발견된다. 그리고 건조제품에서도 발견된다. 포자류는 요리시에도 생존할 수 있으며 그 후 냉장 또는 저장(15~50°C) 기간에 증식한다.

Table 3. D₁₀ values of radio-resistant sporogenic bacteria important in food and medical sterilization application

Organisms	D ₁₀ (kGy)	Presence of a "shoulder" (kGy)	Irradiation menstruum	Importance ^a
Anaerobic Spore Formers				
<i>Clostridium botulinum</i> type A				
Resistant strains				
33	3.4	3.5	Butter	FS; MS
62	2.7	3.5	Butter	FS; MS
Medium resistant strains				
37	2.0	0.7	Butter	FS; MS
36	1.9	0.7	Butter	FS; MS
Sensitive strains				
1192y	1.4	0-10	Water	FS; MS
NCTC7272	1.2	9-10	Water	FS; MS
<i>Clostridium botulinum</i> type B				
Resistant strains				
53	3.3	4.0	Butter	FS; MS
41	2.1	1.6	Butter	FS; MS
Medium resistant strains				
9	1.6	1.8	Butter	FS; MS
Sensitive strains				
213	1.1	9-10	Water	FS; MS
51B	1.2	0	Butter	FS; MS
<i>Clostridium botulinum</i> type E				
Medium resistant strains				
Beluga	1.9	1.5	Butter	FP
Alaska	1.7	2.1	Butter	FP
1304	1.7	0	Water	FP
Sensitive strains				
Beluga	0.8	0.7	Water	FP
V.H.	1.3	1.4	Butter	FP
Minneapolis	0.8	2.0	Butter	FP
<i>Clostridium botulinum</i> type D				
<i>Clostridium botulinum</i> type F				
<i>C. botulinum</i> type A:NCTC8798	3.7	3.2	Reduced butter	FP
<i>C. tetani</i>	2.4	2.5-3.5	Water	MS
<i>C. sporogens</i>				
PA3679/S ₂	2.2	2.5-3.5	Water	HR
NCTC532	1.6	2.5-3.5	Water	HR
Aerobic spore formers				
<i>Bacillus brevis</i>	0.5		Butter	MS
<i>B. Subtilis</i>	0.6		Salin+5%Gelatin	MS
<i>B. cereus</i> T	2.8	0	Butter	MS
<i>B. cereus</i> C1/1-18	6.0	0	Dry	I
<i>B. sphaericus</i> C ₁ A	10.0	0	Dry	I
<i>B. anthracis</i>	2.8	0	Butter	MS

^a Practical importance in FS = food sterilization, FP = food pasteurization; MS = medical and surgical sterilization; I = indicator for MS; HR = highly heat resistance spores.

Clostridium tetani : 파상풍을 일으키는 이 혐기성 포자형성균은 의료용 기구나 수술용 도구, 특히 깊은 상처와 접촉하게 되는 기구의 방사선 멸균에 매우 중요하나 식품의 방사선 조사에는 그리 중요하지 않다. 이 미생물은 잠재적 경련을 일으키는 신경독소, tetanospasmin을 생산하는데 사람이나 동물의 조직에서 발생되거나 주입되었을 때는 심각한 독성을 나타내지만 음식과 함께 소화되는 경우에는 독성이 없다.

Bacillus anthracis : 이 포자형성균은 동물이나 사람에 탄저병(anthrax)을 유발하는 원인균으로 잘 알려져 있다. 특히 동물의 털에서 포자가 생성되어 전염되는 경우가 많아 카펫 공장이나 천 공장에서의 집단발병이 보고된 예도 있으며 호주에서는 양털로부터 anthrax 포자들은 *C. botulinum*의 포장 정도의 방사선 저항성을 갖는 것으로 보고되었다.

Clostridium sporogenes : *C. sporogenes*는 통조림가공에서 가열공정이 적절한지를 판정하는 시험균주로 주로 쓰인다. 이 미생물의 내열성은 매우 높지만 방사선 저항성은 *C. botulinum*보다 낮다. 이처럼 세균포자의 열저항성과 방사선 저항성간에는 유의적인 상관관계가 관찰되지 않는다. 열 저항성이 높은 *B. stercorophilus* 포자는 실제로는 가장 방사선에 예민한 포자 ($D=1$ kGy)들이다.

그러나 세균포자의 D_{10} 값은 실제로 같은 종이라 하더라도 미생물 자체의 특성, 환경요인 등에 따라 각 strain 간의 변이는 매우 크다. 따라서 이러한 환경요인을 방사선 조사와 병용하여 처리함으로써 보다 완벽한 살균효과를 얻으려는 연구가 시행되고 있다. 이러한 연구의 가장 대표적인 예가 방사선과 열처리의 병용에 관한 것이다. 방사선 처리와 열처리의 병행에 관한 연구 결과는 이미 1954년에 보고된 바 있다. 이 연구는 방사선 조사가 효소의 활성을 제어하지는 못하므로 방사선을 조사한 후에 단백질분해 효소를 불활성하기 위한 열처리를 시행한 것으로 효소활성이 제품의 품질에 영향을 주는 식품에서는 매우 중요한 의의를 갖는다. 방사선과 열처리의 선후 순서는 포자의 불활성화 정도를 결정하는 중요한 변수로 알려져 있다. 보고에 의하면 포자를 열처리 한 후 방사선을 조사하면 방사선 저항성은 큰 차이가 없으나 10 kGy 이하의 저선량에 포자를 조사한 후 열처리할 경우 포자의 열저항성은 급격히 감소한다. 그러나 오히려 낮은 열과 방사선 처리가 동시에 된 경우 그 미생물은 매우 높은 저항성을 보이기도 한다. 이러한 열과 방사선간의 상호 보완적 역할은 박테리아 포자에만 국한되지 않고 질신별레, 종자, 핵산단백질, 쥐, 암세포 등의 다양한 시스템에서 발견된다. 일반적으로 방사선 조사는 생존한 포자들의 열저항성을 8에서 13배정도 줄여준다.

3. 방사선 저항성 세균

방사선 저항성 세균이란 영양세포의 상태에서도 방사선에 대하여 매우 높은 저항성을 갖는 미생물들이다. 그러나 다

행스럽게도 현재까지 알려진 방사선 저항성 세균들은 대부분 비 병원성이며, 다른 균주에 비해 영양 요구성이 매우 까다롭고, 열에 대한 저항성이 없으며, 대부분 열에 민감하고, 식품의 microflora에서 상대적으로 적은 부분을 차지하므로 세균포자에 비하여 식품 위생학적 위험성은 낮다고 볼 수 있다. 따라서 방사선 저항성 세균은 식품학적 관점보다는 생태학, 분자생물학적 관점에서 보다 더 큰 관심을 끌고 있다.

가장 대표적인 방사선 저항성 세균인 *Micrococcus radiodurans*는 미국 Oregon주의 한 정육공장의 방사선 조사 육제품에서 분리되었다. *M. radiodurans*는 이온화 방사선뿐만 아니라 자외선 조사에도 강한 저항성을 보였고, 몇몇 화학적 처리에도 저항성을 나타낸다. 이처럼 자연계에 강한 방사선 저항성을 나타내는 세균이 존재한다는 것은 식품에서도 또 다른 방사선 저항성 균주들이 존재할 수 있음을 시사한다. *Micrococcus radiophilus*는 10~20 kGy의 선량으로 방사선을 조사한 어류(인도산 바다물고기인 물천구, Bombay duck, *Harpodon nehereus*)에서 분리되었으며 쌀에서는 상당히 방사선 저항성을 나타내는 *Pseudomonas* 균주를 분리하였다. 이외에도 효모 *Trichosporon oryzae*, 가금류로부터 분리된 *Pseudomonas* 와 *Alcaligenes* 등, 마쇄육에서 분리된 *Moraxella-Acinetobacter* 드이 방사선 저항성 미생물로 알려져 있으며 *Streptococcus faecium*(돼지분변), *Arthrobacter radiotolerans*(라듐성분 함유 온천)등이 자연상태에서 분리 되었다. 특히 자연 상태에서 분리된 방사선 저항성 미생물들은 방사능이 있는 온천지역, 늪 및 우라늄 광산에서 발견되고 있어 천연 방사능을 지닌 환경에서의 선택적 변이가 이루어졌음을 가정할 수 있다.

자연환경이 아닌 인위적인 조건에서도 방사선 저항성 균주를 얻을 수 있다. 이중 가장 일반적인 방법은 조사선량을 높여가며 반복 조사하는 것이며 Davies와 Sinskey는 여러 번 반복된 방사선 조사에 의해 *M. radiotolerans*와 비슷한 저항성을 나타내는 *S. typhimurium* LT2 변이주를 발견하였다. 가장 저항성이 강한 균주는 D21R6008로서 84번의 반복된 조사로서 얻어졌으며 1.50 kGy의 D_{10} value를 나타내었다.

Table 4와 아래에 대표적인 방사선 저항성 세균의 일반적 특성을 요약하였다.

Micrococcus radiodurans : *M. radiodurans*는 평균 $2\mu\text{m}(1\sim2\mu\text{m})$ 의 직경을 가지는 구균으로 붉은색의 색소를 형성하는 것을 특징으로 한다. 이 미생물은 세포 초기 단계에선 그람 양성이나, 후기에는 그람 염색성이 다양하게 나타나며, 통성 호기성, catalase 양성, 비병원성 등의 생리적 특성을 보인다. 이 균주의 방사선 저항성은 다른 세균들과 마찬가지로 배지, 성장 단계 및 조사조건 등에 의해 다양하게 변화한다. 전자현미경의 관찰에서 *M. radiodurans*는 특이한 다층의 세포벽을 갖는다는 것이 밝혀졌다. 또 다른 두 종의 방사선저

항성 구균(*M. radiophilus*, *M. radioproteolyticus*)에서도 이와 유사한 세포벽 구조가 관찰되었는데 이 다중층의 세포벽구조 기능과 *M. radiodurans*의 강한 방사선 저항성에 대한 상관관계는 아직 까지 명확하지 않다.

*M. radiodurans*의 강한 방사선 저항성과 관련하여 이 세균의 DNA에 관한 연구도 여러 분야에서 진행되었다. *M. radiodurans*의 DNA 양과 염기조성은 GC 함량이 66~68%로 다소 높았으나 특별한 유의성은 없었으며 특히 *M. radiodurans* DNA의 높은 GC 함량은 GC 함량이 낮을 경우 방사선 저항성이 높아진다는 가설을 반박하고 있다. UV 및 이온화 방사선 조사에 대한 *M. radiodurans*의 강한 저항성은 주로 DNA double-strand 단편을 재결합시키는 효과적인 복구 체계에서 기인하는 것으로 알려져 있다.

Table 4. D₁₀ value of radio-resistant nonsporogenic bacteria important in food and medical sterilization

Bacterium	Medium	Radiation Temp.	D ₁₀ (kGy)
<i>Deinococcus radiodurans</i>	nutrient broth	ambient	3.5
<i>Moraxella-Acinetobacter</i>	from marine fish	ambient	0.95~0.19
<i>Moraxella-Acinetobacter</i>	from beef	ambient	4.7
<i>Micrococcus radiodurans</i>		ambient	2.0~5.0
<i>Pseudomonas radioltra</i>	rice	ambient	1.40
<i>Micrococcus sp. B12</i>	butter	ambient	6.4
<i>Salmonella. typhimurium</i> LT2	butter	ambient	1.50

***Micrococcus radiophilus* :** *M. radiophilus*는 어류에서 분리된 비병원성 구균으로 주홍색의 색소를 형성하며 UV 및 이온화 방사선 조사에 대해서는 *M. radiodurans*보다 저항성이 더 강하다. *M. radiophilus*는 *M. radiodurans*와 형태학적으로 유사하나 세포크기, 내염성, 성장특성, 낮은 전분 가수분해성 및 UV와 방사선에 대한 저항성 측정면에서 차이가 나타난다.

***Micrococcus radioproteolyticus* :** *M. radioproteolyticus*는 동물의 분변에서 분리된 방사선 저해성 세균으로 건조상태에서의 방사선 저항성이 수용성 상태일 때 보다 2배 가량 높아진다.

***Arthrobacter radiotolerans* strain P-1 :** *Arthrobacter radiotolerans* strain P-1은 일본의 Misasa 지방 온천 근처 물 및 이끼류에서 분리되었다. 이 균주는 호기성의 그람양성을 나타내며, 붉은색 색소를 형성하고, catalase 양성반응을 보이며 포자형성을 하지 않는 것을 특징으로 한다. 방사선 조사에 의한 사멸 곡선은 sigmoid 형태를 나타낸다. 호기적 조건하에서 대수기 세포에 대한 생존감소 지점의 선량은 7.3 kGy로 나타나고 있는 반면에 D₁₀ 값은 이 균주의 강한 방사선 저항성 때문에 불확실한 상태이다.

***Micrococcus sp. B12* :** *Micrococcus sp. B12*는 방사능을 지닌 지역으로부터 분리된 방사선 저항성 균주들 중에서 방사선 저항성이 가장 높은 종으로 호기적 조건하에서의 방사선 조사시 이 균주의 D₁₀ 값은 6.4 kGy 수준이다.

***Pseudomonas radioltra* :** *Pseudomonas radioltra*는 쌀에서 분리된 방사선 저항성 세균으로 붉은색을 나타내므로 red *Pseudomonas*로도 불린다. 이균주의 D₁₀ 값은 호기적 조건에서 방사선 조사시 1.40 kGy이다.

***Salmonella. typhimurium* LT2 D21R6008 :** *S. typhimurium* LT2는 연속적인 방사선 조사에 의하여 이온화 방사선 및 UV 조사에 대한 저항성이 증가하는 균주의 대표적인 예이다. Strain D21R6008은 분리된 균주 중 가장 저항성이 큰 것으로 84번의 반복된 조사에 의한 변이주로서 분리되었으며 wild type보다 20배나 강한 방사선 저항성을 보였다. 방사선 유도균주는 wild type보다 DNA손상에 대한 복구 능력이 높아 손상된 DNA에 대한 복구능력 향상이 방사선 저항성을 높이는 요인인 것으로 보여진다.

***Moraxella-Acinetobacter* :** *Moraxella-Acinetobacter*는 냉동상태의 우육, 돈육 및 계육에 10 kGy의 방사선을 조사한 후 생존한 미생물로부터 분리하였다. 이 균주의 D₁₀ 값은 최고 6.8 kGy에 이른다. 이균주들의 방사선 저항성은 냉동상태에서는 유효하지만 30℃이상의 온도에서는 감소한다.

지금까지 몇 가지 미생물의 방사선 저항성에 관한 일반적 내용을 살펴보았다. 이런 미생물들은 몇 가지의 공통적인 세포구조 및 생리적 특성을 나타내는데 이러한 특성들이 방사선 저항성에 관계되는 것으로 보여진다. 방사선 저항성 세균의 특징은 1) DNA의 방어 및 복구능력 2) 방사선에 의한 손상에 대응하는 독특한 형태학적, 화학적 특징(다층의 세포구조 등) 3) 특징적인 에너지 전달 기작 4) 색소 형성 등을 들 수 있다. 여기서 DNA에 관한 내용은 DNA가 방사선의 가장 중요한 표적이라는 점에 비추어 당연한 결과라 할 수 있으나 색소의 형성은 매우 흥미로운 내용이다. 그러나 아직까지 방사선 저항성 세균의 방사선 저항성에 관한 메카니즘은 불충분한 실정이다.

4. 바이러스의 방사선 생물학

바이러스는 식품의 부패와 유의성 있는 연관관계가 없어 최근까지도 식품보존의 관점에서는 논의의 주요 대상이 아니었다. 그러나 사람 또는 가축의 바이러스성 질환의 증가로 인하여 식품 위생 관점에서의 바이러스 제어가 관심을 끌게 되었다. 방사선 식품 조사에 있어 바이러스 문제가 부각된 것은 1960년대 중반부터이며 이후의 연구결과 방사선 조사는 바이러스의 유입을 줄일 수 있는 것으로 확인되었다.

의학적으로 바이러스 감염에 대한 예방과 치료는 거의 무방비에 가까운 실정이다. 바이러스는 그 구조적 단순성에도 불구하고 생존에 필요한 모든 필수 요소를 갖고 있으며 대부분의 물리·화학적 처리에 저항성이 크고 숙주세포와 분리된 자연상태에서는 무생물에 가까운 결정형으로 잠복하므로 제어가 매우 어렵다. 식품과 공중보건산물의 바이러스

Table 5. Viruses which may be associated with foods

Viral disease	Symptoms	Transmission in food
Primarily infectious to man		
Infectious hepatitis (virus not identified)	식용감퇴, 발열, (38~39℃), 메스꺼움, 복부 불쾌, 호흡기 influenzadb사 증세; 황색피부, 짙은 갈색소변, 퇴변; 간과 비장의 확대	오염된 물의 조개, 우유, 그리고 아주 다양한 종류의 다른 식품들; 분변섭취 전염
Poliomyelitis(enteroviruses)	증상은 (1) 무마비성의 전혀 아무 징후없이 나타내며; (2) 무증상 두통, 인후통, 구토, 설사, 변비, 그리고 (3) 노인 이나 어린이에게 근육의 완전 이완	생우유(가장빈번), 크림 밀가루반죽, lemonade, 구강배설물 및 분변, 하수로 관계하여 재배된 채소
Primarily infectious to animals		
Foot-and-mouth disease (rhinoviruses)	동문-접촉성 전염: 구강점막, 발의 피부, 유방등의 수포 발진; 대규모 사망, 우유와 체중의 감소, 간헐적 유산; 인간: 손, 안면부의 수포	질병이 있던 동물의 고기: 소, 돼지, 양, 염소;; 인간에게로의 전염은 드물
Ptentialli infectious		
Echovirus-picornavirus (enteric cytopathogenic human orphan α virus)	설사(특히 소아); 산발성 그리고 유행성 뇌막염	전염 우유, 하수오물, 소량의 소변, 분변, 타액 등
Reovirus(respiratory enteric orphan α virus)	Colorado tick fever, 경미한 기관지 감염, 설사, 장염, 뇌염, 간염, 소아들에게 많이나타남	넓은 숙주 범위; 소, 쥐, 개, 인간
Parainfluenza	소아들의 급성 기관지 질병, 발열, 기관지염, 폐렴, 비염, 인두염, 어른에게는 해롭지 않은 "보통감기"	우유에 오염된; 소량의 전염물; 돼지(parainfluenza type 1, sendai); 소(parainfluenza type 3, SF-4); 인간(parainfluenza type 3, HA-1)
Coxsackie virus(resemble polioviruses, picomaviruses)	소아들의 뇌막염, herpetic 후두염, meningocencephalitis, 심근염 인간의 유사 Influenza 감염	하수, 분변, 소변으로 오염된 관개로부터 재배된 식품, 채소
Vesicular stomatitis Rift Valley fever	고기 취급자의 유사 Influenza 감염 회복기나 뇌막염에 유사Influenza증상이 수반된다.	소량의 감염물, 소, 말, 인간 소량의 감염물, 소, 양, 인간
Lymphocytic choriomeningitis	중추신경계의 열병, 간헐적이고 약한 마비성; 전염	소량의 감염물; 소변, 분변, 타액을 통한 쥐나 돼지로부터 오염된 식품에 의해 옮겨진다.
Encephalomyocarditis (picornavirus)	전세계적으로 발생하는 중추신경계의 질병 그룹	분변과 타액을 통한 설치동물로부터 오염된 식품에 의해 옮겨지는 것으로 보임 식품에 의해 옮겨지는 것으로 추정되고 있다.
Arbovirus(equine encephalitis yellow fever, tick borne encephalitis, etc.) Machupo virus	Bolivian hemorrhagic fever	설치 동물의 만성적 전염물로부터, 식품을 통한 감염, 물 는 공기, 오염된 우유, 설치동물의 소변또

*Orphan mean lack of an associated disease when these viruses were first identified

오염은 원료 자체에서부터 식품가공 공정 중의 모든 주변요소를 통하여 다양하게 이루어진다. 특히 인간, 동물, 또는 곤충 등을 매개로 한 오염은 한 오염은 직접적인 질병을 유발할 수 있다. 아데노바이러스는 감염된 환자의 배설물에서 8주 이상 동안 영향을 받을 수 있다. 동물 전염 매개체 가운데, 쥐는 소아마비, 임파구 맥락막수막염, 볼리비안 출혈열바이러스를 곡물과 다른 식품에 오염시키는 것으로 보고되고 있으며 곤충 전염 매개체 가운데, 파리나 바퀴벌레는

소아마비바이러스 등의 전염 매개체로 작용한다고 알려져 있다. 전염성 간염과 소아마비 바이러스는 사람에게 있어 식품 감염 위험이 큰 대표적인 바이러스이다. 동물에게 전염성이 큰 바이러스들 가운데 가장 중요한 것은 냉동 도살동물의 국제무역에서 심각한 문제가 되는 foot-and-mouth 바이러스(FMDV)이며 이외에도 돼지 콜레라 바이러스, 아프리카 돼지 열병 바이러스, bovine picornavirus, adenovirus, Newcastle disease virus 등도 동물 사료를 통하여 전염될 수 있다.

Table 6. Gamma radiation resistance at 0.5°C of viruses suspended in eagle's minimal essential medium and distilled water

Virus	Nucleic acid		D-Value (kGy) ^b	
	Type	Strands ^a	MEM [®]	Distilled water
Adenovirus	DNA	D		-
2			41	-
3			49	-
5			44	-
12			46	-
Simian virus 40	DNA	D	45	-
Herpes simplex virus	DNA	D	43	-
Reovirus 1	DNA	D	44	-
Poliovirus	DNA	S		
1			49	-
2			50	-
3			48	1.1
Influenza virus A	DNA	S	46	1.0
Coxsackievirus	DNA	S		
A-9			46	1.2
A-11			48	-
B-1			41	-
B-2			45	1.4
B-3			43	-
B-4			50	-
B-5			41	-
Echovirus	DNA	S		
4			46	-
5			49	-
6			51	-
7			55	-
9			50	-
11			43	1.4
12			50	-
18			44	-
Newcastle disease virus	DNA	S	5.1	-

^aDouble (D) or single strand (S)

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

^cMEM[®]-minimal essential medium containing 2% fetal bovine serum (pH 7)

식품 생산물 중의 바이러스는 전통적인 가열공정에 의해 비교적 쉽게 불활성화 되어진다. 그러므로, 식품유래 바이러스의 감염 위험은 가열공정 처리로 부분적으로 없앨 수 있다. 그러나, 바이러스의 방사선 저항성은 상당히 높아 방사선에 의한 바이러스의 불활성화에는 많은 변수가 작용한다. 바이러스 그룹간의 방사선 저항성은 상당한 차이를 나타내는데, 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. 또한 바이러스의 방사선 저항성은 세균이나 곰팡이에 비하여 주변 환경에 더 크게 영향을 받는다. Bacteriophage T7은 0.4~6.4% 범위의 nutrient broth 농도에서 저항성이 10배정도 증가하며 마쇄육의 경우 일반적

으로 실험실에서 사용하는 배지에서보다 바이러스의 방사선 저항성이 증가한다. Coxsackievirus B-2의 경우, MEM에서의 D₁₀값은 4.5 kGy인 반면에, 마쇄육의 존재시에는 7.0 kGy이다.

5. 곰팡이와 효모

곰팡이의 균사는 연결된 다핵상으로 되어 있으므로 방사선 조사에 의한 D₁₀값을 설정하기가 어렵다. 따라서 생장이 정지되는 시점의 조사선량을 살균 기준으로 설정하며 D₁₀값은 단세포인 포자를 대상으로 계산한다. 곰팡이도 세균과 마찬가지로 조사 후의 식품의 화학성분이나 환경요소, 곰팡이의 성장상태 등에 의하여 크게 영향을 받는다. 일반적으로 곰팡이의 방사선 감수성은 세균 영양세포의 수준이나 *Alternaria alternata*와 같이 2.4 kGy에 이르는 것도 있다 (Table 7). 식품학적 관점에서의 곰팡이에 대한 방사선 조사는 곰팡이독을 형성하는 곰팡이의 살균을 용이하게 수행할 수 있다는 점에서 관심을 끈다. 특히 곡류의 저장 시 생성되는 곰팡이독은 식품위생 뿐 아니라 암의 유발과 같은 의학적인 문제를 야기한다고 보고되어 있으므로 중요하다. 곰팡이독을 형성하는 대표적인 미생물인 *Aspergillus*, *Penicillium* 속 곰팡이들의 방사선에 대한 D₁₀값은 0.2~0.4 kGy 범위로 방사선 조사에 의하여 비교적 쉽게 살균할 수 있는 수준이다.

일반적으로 식품의 발효나 부패에 관여하는 *Candida*, *Saccharomyces* 등의 효모도 0.3 kGy 내외의 D₁₀값을 가지나 *Trichosporon* 등과 같이 1.2~1.6 kGy의 D₁₀값을 갖는 방사선 저항성 효모도 관찰된다 (Table 8). 그러나 대부분의 효모는 세균에 비하여 방사선에 대한 감수성이 커 1 kGy 내외의 저선량 조사에도 쉽게 살균할 수 있으므로 효모가 변패의 주요 요인인 당함유식품이나 발효식품 등은 방사선 살균이 유용한 방법이 된다.

Table 7. Comparison of D₁₀-value of mould spores in aqueous suspensions irradiated at ambient temperature

Mould	Gamma irradiated (kGy)	Electron irradiated (kGy)	Values not significantly different (P<0.005, student t-test)
<i>Aspergillus echinulatus</i>	0.319	0.241	
<i>A. fumigatus</i>	0.276	0.198	
<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. granolactum</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 alternata</i>	2.409	1.099	

Table 8. Radiation resistance of some yeasts in phosphate buffer(0.067 mol/L)

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

IV. 미생물의 방사선 감수성에 미치는 환경인자의 영향

방사선 조사에 의한 식품미생물의 저항성도 일반적인 미생물의 살균과정과 마찬가지로 1) 직접적인 상해요소인 방사선의 성질과 그 양 2) 방사선 유도성 화학물질의 수, 성질, 잔존성 3) 방사선에 대한 미생물 고유의 저항성이나 손상에 대한 복구 능력 4) 위와 같은 요소들에 대한 세포내·외 환경의 영향 등에 의하여 영향을 받으므로 미생물의 방사선 저항성에 대한 비교나 연구는 이와 관련된 모든 조건들이 명확히 규명되었을 때에 유의성을 갖는다. 특히 미생물들의 방사선 감수성에 대한 일련의 연구결과를 종합해보면 방사선 조사에 의한 미생물의 반응정도는 미생물 고유의 방사선 감수성뿐만 아니라 미생물의 생존에 영향을 주는 세포 내·외부환경에 의하여 크게 좌우된다는 것을 알 수 있다. 세포 내부의 환경에서 가장 현저한 결과는 미생물의 성장 단계에 따른 방사선 감수성의 차이이다(Fig. 2).

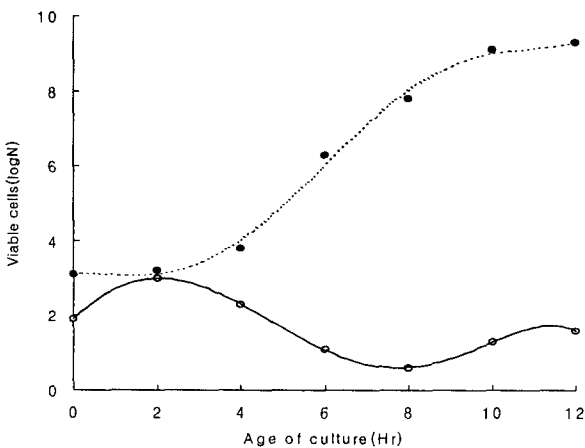


Fig. 2. Variation in radiosensitivity of *E. coli* during the growth phase.

● ; growth rate of *E. coli*,
○ ; surviving cells at 0.3 kGy from 10⁴ cells/ml of initial conc.

Fig. 2에서와 같이 일반적으로 미생물의 영양세포에서는 lag phase나 stationary phase에서는 방사선 저항성이 증가하고 log phase에서는 방사선 저항성이 낮아지는데 이는 방사선 에너지가 DNA와 각종 세포내 물질의 생리학적 활성도가 큰 세포에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

온도, 기체환경, 수분활성도, pH, 식품의 화학적 성분과 같은 외부환경도 미생물 세포의 물리·화학적 특성에 영향을 미쳐 방사선에 대한 미생물의 반응에 차이를 나타나게 한다. 특히 이러한 외부환경은 방사선조사를 이용한 식품 및 공중보건산물 살균의 산업적 적용에 중요한 요소가 되므로 많은 연구가 필요하다. 미생물의 방사선 감수성에 영향을 미치는 주요 환경인자를 살펴보면 다음과 같다.

1. 온도

일반미생물의 치사범위 이하인 45℃ 정도의 열처리만으로도 미생물에 대한 방사선 조사는 상당한 상승효과를 나타낸다(Fig. 3). 이는 DNA의 손상 등에 대한 미생물의 복구작용이 환경온도 이상에서는 작동하지 않기 때문이다. 100℃에서도 수 시간 이상 내열성을 갖고 방사선에 대해서도 상당한 저항성을 갖는 세균의 포자를 80℃ 정도의 온도로 처리하여 방사선을 조사하면 방사선 저항성은 급격히 감소한다. 반대로 미생물의 영양세포를 어느점 이하의 온도에서 방사선을 조사하면 상온에 비하여 방사선 저항성이 높아지는데 이는 어느점 이하에서 수분활성도가 감소하고 물의 동결에 따라 radical의 확산이 제한되기 때문이다. 한편, 세균의 포자는 냉동조건에서도 방사선 저항성에 대한 차이가 크지 않은데 이는 포자 자체의 수분이 이미 낮은 상태이므로 냉동에 따른 부가적인 radical의 확산억제 효과가 크지 않기 때문으로 해석된다.

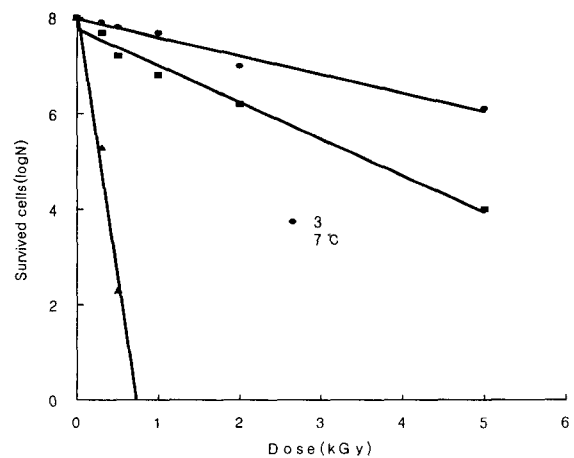


Fig. 3. Inactivation of Newcastle disease virus infectivity at various temperatures by gamma radiation.

● ; 37℃, ■ ; 50℃, ▲ ; 60℃

2. 기체환경

일반적으로 무산소의 조건보다는 유산소 조건에서 미생물에 대한 방사선의 살균효과는 증가한다(Table 9). 이는 산소의 유무에 따라 미생물의 생리적 대사과정과 radical의 생성 정도가 달라지기 때문이다. 실험결과 무산소 상태에서는 유산소계에 비하여 미생물 영양세포의 저항성이 2~5의 비율로 커진다고 알려져 있다.

Table 9. Influence of different media on D₁₀ values of *S. senftenberg*

Medium	D ₁₀ values (kGy)
Liquid whole egg	0.50
Desiccated coconut	1.34
Bone meal	0.56
Phosphate buffer	
aerated	0.13
anoxic	0.39
frozen	0.30

3. 수분활성도

미생물은 주변환경이 부분적으로, 또는 전체적으로 탈수되어 있는 상태보다는 수분이 높은 환경에서 방사선에 민감하다. 수분이 낮은 환경에서는 방사선 조사에 의하여 물에서 생성되는 radical의 생성율이 낮아지므로 DNA에 대한 간접효과의 정도도 낮아진다. 세균의 포자가 방사선에 대하여 강한 저항성을 갖는 것은 원형질체가 부분적으로 탈수된 것에 기인한다. 그러나 포자의 발아시에는 원형질체내의 수분활성도가 높아지므로 방사선 조사에 대한 저항성도 낮아진다. 위에서도 언급한 바와 같이 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. 한편, 식품의 수분활성도는 수분 자체뿐만 아니라 염, 당 등의 성분에 의해서도 변화하므로 식품의 화학적 조성도 중요하다.

4. 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(Table 9). 일반적으로 식품의 화학적 조성도 복잡할수록 방사선에 의하여 세포내부에서 생성되는 radical과의 경쟁이 커지게 되므로 저항성이 증가한다. 호기성 세균포자의 방사선 저항성은 pH 5~8에서는 큰 영향을 받지 않으나 pH 5이하에서는 감응도가 증가한다. 그러나 전자에 친화성을 갖는 일부 화학첨가물들은 오히려 방사선에 대한 감수성을 높이

는 작용을 하는 것으로 알려져 있다.

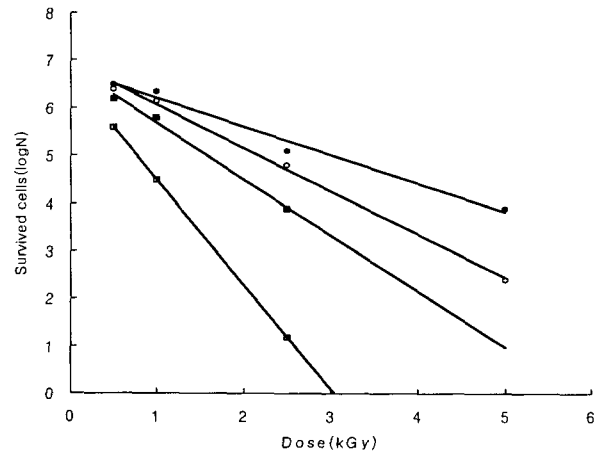


Fig. 4. Survival curves of *S. thompson* in sucrose solutions of different concentration after 10 MeV electrons at 0°C.

● ; Aw 0.87, ○ ; Aw 0.90, ■ ; Aw 0.95, □ ; Aw 0.99

5. 기타

열손상을 받은 세포와 마찬가지로, 방사선을 조사한 후에 생존한 미생물들은 정상세포에 비하여 환경조건에 보다 민감해진다. 따라서 보존 중에도 계속적인 사멸이 진행되는 post-irradiation effect가 관찰되면 미생물을 제어하는 첨가물 등을 병용하거나 식품 등의 특성에 영향을 주지 않은 수준의 열처리를 할 경우(Fig. 4) 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 같으며 많은 수의 미생물을 불활화시키기 위해서는 방사선의 조사선량을 높여야 한다.

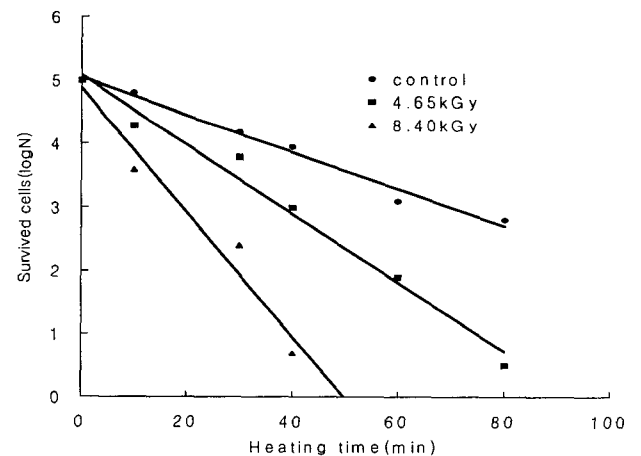


Fig. 5. Effect of pre-irradiation on the heat resistance of *Clostridium botulinum* spores.

V. 방사선 조사를 이용한 미생물 살균의 산업적 적용

방사선 조사를 이용한 미생물 살균은 분명 강력하고도 안전한 기술이지만 우리나라의 경우 방사선 조사가 허용된 식품과 공중보건 산물의 범위는 아직도 상당히 제한적이다. 그러나 그 동안의 국내·외 연구결과를 바탕으로 행정절차가 진행되면 점차 그 적용범위가 넓혀질 것으로 예상된다. 한편 식품 및 공중보건산물에 대한 방사선 조사의 허용범위가 확대된다 하더라도 이를 산업적으로 적용하는데는 각 제품의 특성과 살균 목적에 맞는 유효 조사선량, 포장방법 및 단위, 전·후처리 등을 결정할 수 있는 사전 검토가 필요하다. 일반적으로 어느 한 제품을 방사선 살균에 적용할 경우 고려되어야 할 사항은 1) 생물학적 요인 2) 화학적 요인 3) 산업적인 공정요인 등으로 구분하여 살펴볼 수 있다.

1. 생물학적 요인의 검토

식품이나 공중보건 산물에 분포하는 미생물의 종류는 각 제품에 따라 다르며 특히 식품의 경우에는 해당 식품원료의 기원, 영양성분, 수분활성도, 제조공정 등에 따라 독특한 미생물 분포를 가진다. 미생물들은 각 종에 따라, 또는 생장 단계에 따라 방사선에 대한 감수성과 저항성이 달라지므로 각 식품에 분포하는 미생물의 분포와 생리적 특성을 알아야만 적절한 살균 조사선량을 설정할 수가 있다. 또한 같은 제품이라 하더라도 살균목적에 따라 조사선량이 달라질 수도 있다. 즉, 장류제품의 경우 제품 자체의 보존성만을 목적으로 한다면 장류의 부패율이나 변패를 유도하는 효모와 산생성 세균을 살균하면 되므로 2~3 kGy의 감마선 조사로도 충분하지만 이를 식육가동 등에 첨가되는 소스로 사용할 경우에는 식육에의 2차오염을 유발할 수 있는 *Bacillus* 포자까지 살균해야 하므로 10 kGy 이상의 고선량 조사가 필요하게 된다.

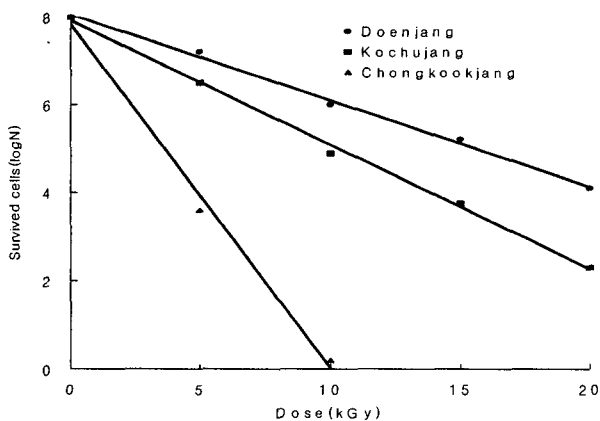


Fig. 6. Inactivation of *Bacillus* cells survived in Korean soybean fermented foods by gamma radiation.

이와 마찬가지로 다른 식품이나 공중보건 산물에 있어서도 살균의 최종목표를 병원성 세균으로 할 것인지 포자나 바이러스를 포함한 완전살균으로 할 것인지에 따라 조사선량이 조정될 수 있다. 한편, 앞에서도 언급한 바와 같이 미생물의 방사선 감수성은 환경에 따라 영향을 받으므로 같은 대상 미생물이라도 각 제품에 따라 서로 다른 조사선량을 필요로 하는 경우도 있다(Fig. 5). 따라서 어느 제품에 대하여 방사선 살균을 적용할 때에는 반드시 각각의 제품에 대한 미생물학적인 제반 기초자료가 필요하다.

2. 화학적 요인의 검토

식품 및 공중보건 산물의 방사선 조사에 의하여 독성물질이나 기타 위생상의 위해가 될 수 있는 물질이 생성되었다는 보고는 아직 없다. 그러나 감마선과 같은 방사선 에너지는 라디칼 생성 등의 화학적 반응을 매개하므로 이 라디칼의 2차 작용에 의하여 식품의 종류에 따라 비타민의 파괴, 색도의 변화, flavor의 생성, 산화의 유도와 같은 품질변화를 초래한다는 보고가 있다. 또한 공중보건 산물의 원료 또는 식품 포장재로 사용되는 폴리프로필렌 등은 방사선에 의하여 그 결합구조가 파괴되므로 방사선 살균을 목적으로 한 제품에는 사용할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 방사선 조사에 있어서 미생물적인 요인 이외에도 일부 식품의 관능의 변화, 산화와 같은 품질변화 여부, 포장재의 적합성, 식품첨가물의 화학반응성 등도 중요한 기초자료가 된다.

3. 산업적인 공정요인

공정요인 또한 공중보건 산물의 방사선 살균을 산업적으로 적용하는데 있어 중요한 요인의 하나이다. 식품과 공중보건 산물의 살균에 주로 이용되는 감마선은 알파선이나 베타선과는 달리 투과력이 우수하여 상당한 두께의 제품에도 유효하며 포장상태로 살균이 가능하나 제품의 성분, 수분, 밀도, 포장재의 종류 등에 따라 차폐효과가 나타나므로 이에 대한 보정이 필요하다. 또한 우리나라의 경우 현재 방사선 조사시설은 그 설치와 관리에 제한요소가 많고 투자비용이 커서 경기도 여주 소재 그린피아기술(주)의 1기만 가동되고 있으므로 특히 하절기의 제품 제조후 방사선 조사 전까지의 이동시간 동안 미생물의 증식이 우려되는 제품은 적용하는데 곤란한 문제점도 있다. 그러나 이러한 문제는 방사선 살균이 보편화되고 그 수요가 증가하여 대기업 또는 각 지역 거점의 대행업체가 늘어나면 차츰 해결될 수 있을 것으로 보인다.

VI. 맺음말

식품 및 공중보건 산물에 대한 방사선 조사 기술은 미생

물에 대하여 선택적으로 강력한 살균효과를 나타내면서도 제품의 생화학적 변화를 최소화하고 그 적용범위가 넓으며 위생학적 위해성도 나타내지 않아 매우 안전하면서도 유용한 살균방법으로 인정되고 있다. 따라서 식품의 부패방지와 보존, 공중보건산물의 위생화 등을 목적으로 한 방사선 조사기술은 이제 실용화 단계에 이르고 있으나 위에서 살펴본 바와 같이 대상 미생물의 종류와 식품의 수분, 온도, 화학적 조성 등에 따라 매우 다른 결과를 나타내므로 그 적용 영역을 넓히기 위해서는 아직도 많은 연구가 필요한 분야이다. 그러나 고선량의 방사선 조사는 위해성을 유발하지는 않지만 일부 제품의 품질변화를 초래할 수도 있고 효소 등에 의한 생화학적 변패에는 적용하기가 어려운 경우도 있다. 따라서 방사선 조사기술을 보다 효율적으로 적용하기 위해서는 처리하고자 하는 제품의 특성, 즉, 1) 대상제품의 미생물 분포와 미생물의 특성, 2) 대상제품의 화학적 성분과 이들 성분이 환경요소로 미생물에 미치는 영향, 3) 방사선 조사에 따른 대상제품의 성분변화 등에 관한 기초 연구가 뒷받침되어야 하며 이를 바탕으로 가장 효율적인 살균공정이 정립되어야 한다. 또한 방사선 조사만으로는 얻을 수 없는 효과에 대하여 이를 보완할 수 있는 다양한 병용처리 방법들도 개발되어야 한다. 한편, 현재 국내외적으로 이러한 연구들이 소기의 성과를 거두고 있으므로 조만간 식품 및 공중보건산물의 방사선 조사는 매우 효과적인 위생화 및 보존 기술로 자리잡을 것으로 기대된다.

V. 참고문헌

- Alur, M.D., Grecz, N., and Farkas, J. Synergism of the combined action of U.V. plus gamma radiation on DNA and viability of microorganism. *Stud. Biophysics.*, 50:175 (1975)
- Byun, M.W. Application and aspect of irradiation technology in food industry. *Food Sci. Ind.*, 30:89 (1997)
- Byun, M.W., Kwon, J.O., Yook, H.S. and Kim, K.S. Gamma irradiation and ozone treatment for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in culture media. *J. of Food Protection*, 61:728 (1998)
- Clavero, M.R.S., Monk, J.D., Beuchat, L.R., Doyle, M.P. and Brackett, R. E. : Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, and *Campylobacter jejuni* in raw groun beef by gamma radiation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60, 2069-2075 (1994)
- Clover, D.O., Transmission of viruses through foods. *Crit. Rev. Environ. Control.* 1:551 (1971)
- Colins C.I., Murano, E.A. and Wesley, I.V. Survival of *Arcobacter Butzleri* and *Campylobacter jejuni* after irradiation treatment in vacuum packaged ground pork. *J. of Food Protection*, 59:1164 (1996)
- Crone, A.V.J., Hamilton, J.T.G., Stevenson, M.H. : Detection of 2-dodecyl cyclobutanone in radiation-sterilized chicken meat stored for several years. *International Journal of Food Science & Technology* 27:691-696 (1992)
- Eon-Ho Choi, Hong-Lyour Kim and Su-Rae Lee : Radiation Sensitivity of Some Toxigenic Molds Isolated from Deteriorated Rice. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 7:148 (1975)
- Farkas, J. Microbiological safety of irradiated foods. *International J. of Food. Microbiol.*, 9:1 (1989)
- Grant, I.R. and Patterson, M.F. Sensitivity of foodborne pathogens to irradiation in the components of child ready meal. *Food Microbiol.*, 9:95(1992)
- Hamspon, J.W., fox, J.B., Lakritz, L. and Thayer, D.W. : Effect of low dose gamma irradiation on lipids in five different meats. *Meat Science*, 42:271 (1996)
- Loaharanu, P. Acceptance and trading on irradiated food : International developments of food irradiation and consumer acceptance of irradiated foods, 이철호 편저 연암신서 18, (1998)
- Loaharanu, P. and Murrell, D. : A role of irradiation in the control of food-borne parasites. *Trends in Food Sci. Technol.*, 5:190 (1994)
- Ma, K. and Maxcy. R.B. Factors influencing radiation resistance of vegetative bacteria and spores associated with radappertization of meat. *J. of Food Science*, 46:612 (1981)
- Matic, S., Mihokovic, V., Katusin-Razem, B., Razem, D. : The eradication of *Salmonella* in egg powder by gamma irradiation. *Journal of Food Protection* 53(2):111-114 (1990)
- Monk, J.D., Beuchat, L.R. and Doyle, M.P. : Irradiation inactivation of food-borne microorganisms. *J. Food Prot.*, 58:197(1995)
- Moseley, B.E.B. Ionizing radiation:action and repair. In:Gould G.W. ed. *Mechanisms of action of food preservation procedures.* London, Elsevier Applied Science, pp.43-70 (1989)
- Sweet, D.M. and Moseley, B.E.B. The resistance of *Micrococcus radiodurans* to killing and mutation by agents which damage DNA. *Mutat. Res.*, 34:175 (1976)
- Sweetier, R. kanatt, Pushpa Paul, S.F. D' souza and paul Thomas: Lipid peroxidation in chicken meat during chilled storage as affected by antioxidants combined with low-dose gamma irradiation. *J. Food Science*, 63:198-200 (1998)
- Thayer, D.W. Use of irradiation to kill enteric pathogens

- on meat and poultry. J. of Food Safety, 15:81 (1995)
21. Thayer, D.W. Wholesomeness of irradiated foods. Food Technol., 48(5):58-67 (1994)
 22. Turner, B.E., Foegeding, P.M., Larick, D.K. and Murphy, A.H.: Control of *Bacillus cereus* spore and spoilage microflora in sous vide chicken breast., J. Food Science 61:217-219 (1996)
 23. Worcel, A. and Burgi, E. Properties of a membrane-attached form of the folded Chromosome of *E. coli*. J. Mol. Biol., 82:91 (1974)
 24. Zerial, A., Gelman, I. and Firshein, W. Glycolipids stimulate DNA polymerase activity in a DNA membrane fraction and in a partially purified polymerase system extracted from Pneumococci J. Bacteriol., 135:78 (1978)
 25. 강일준, 광희진, 이병훈, 김광훈, 변명우, 육홍선 : 감마선 쇠고기의 유전 독성 및 급성 독성학적 안전성 평가. 한국식품과학회지, 30:775-780 (1998)
 26. 권오진, 변명우 : 식품 위생관계 미생물에 대한 가열 처리와 감마선 조사의 병용 효과. 한국식품영양과학회지 25:804-809 (1996)
 27. 권중호, 변명우, 최강주, 권대원, 조한욱 : 살균처리가 인삼엽록차의 화학성분에 미치는 영향. 한국식품과학회지, 24:65-60 (1992)
 28. 김미정, 김재훈, 육홍선 : 감마선을 이용한 녹즙의 위생화. 한국식품영양과학회지 28:378-382 (1998)
 29. 김성기, 이관영, 이서래 : 방사선 조사미의 안전성 연구 (제2보). - 시험동물의 증체량, 번식률, 사망률 및 이유시 생육상태. - 방사선 조사기준 및 규격개정 보건복지부 고시 제 1995-34호 (1995. 5. 19)
 30. 박창규, 김성기, 김홍열, 김형수 : 방사선 조사미의 안정성 연구 (제1보). - 시험동물의 사료섭취량, 증체량, 사료 효율 및 성장도에 관하여. - Korean J. Food Sci. Technol. 5:110 (1971)
 31. 변명우, 권중호, 이수정 : 염장미역의 미생물적, 관능적 품질에 대한 감마선 조사의 영향. 원자력연구소 연구논문집 19:608-614 (1992)
 32. 변명우, 권중호, 조한욱 : 방사선에 의한 양파 분말의 살균 및 저장. 한국식품과학회지, 16:47 (1984)
 33. 변명우, 이인숙, 이경행, 육홍선, 강근욱 : 방사선 조사, 가열 및 마이크로웨이브 처리에 따른 ascorbic acid의 함량 변화. 한국식품영양과학회지 28:954-957 (1999)
 34. 오덕환, 함승시, 이상영 : 감마선 조사 및 블렌칭처리에 의한 참나물 녹즙의 선도유지효과. 한국식품과학회지 139:333-340 (1998)
 35. 육홍선, 정영진, 김정옥 : 감마선과 오존처리가 알로에와 화분의 오염미생물 제거 및 지방산 조성에 미치는 영향. 한국식품과학회지 134:527-532 (1997)
 36. 이주은, 육홍선, 김재훈, 김경표, 이현자, 변명우 : 육제품의 품질 개선 및 저장성 확보를 위한 감마선 이용. 한국식품영양과학회지 28:858-864 (1999)
 37. 임성일, 육홍선, 윤혜현, 김영지, 변명우 : 난백 단백질에 대한 감마선 조사의 영향. 한국식품영양과학회지 27:291-295 (1998)
 38. 조한욱, 변명우, 권중호, 양재승, 이재원 : 방사선조사 및 E.O가스 처리된 건조 수산물(조개살, 홍합살)의 미생물 및 화학적 특성, 한국식품위생학회지, 1:39 (1986)
 39. 최언호, 양재승, 이서래 : *Salmonella*균의 방사선 감수성에 미치는 열처리의 영향. Korean J. Food Sic. Technol., 10:88-91 (1978)

(접수 2003년 9월 21일, 채택 2003년 11월 21일)