

▶ 특별강연-XII

방사선 기술을 이용한 한국형 우주식품개발현황 및 전망

이 주 운

한국원자력연구원 정음 방사선과학연구소 실장

한국 최초 우주인 탄생

드디어 지난 9월 우리나라도 한국 최초 우주비행사가 탄생되었다. 한국 최초 우주 비행사로 선정된 고산씨는 2008년 4월 러시아 소유즈호를 타고 국제우주정거장 (International Space Station)에 일주일간 생활하면서 우주과학 실험 등 우주임무를 수행하게 된다.

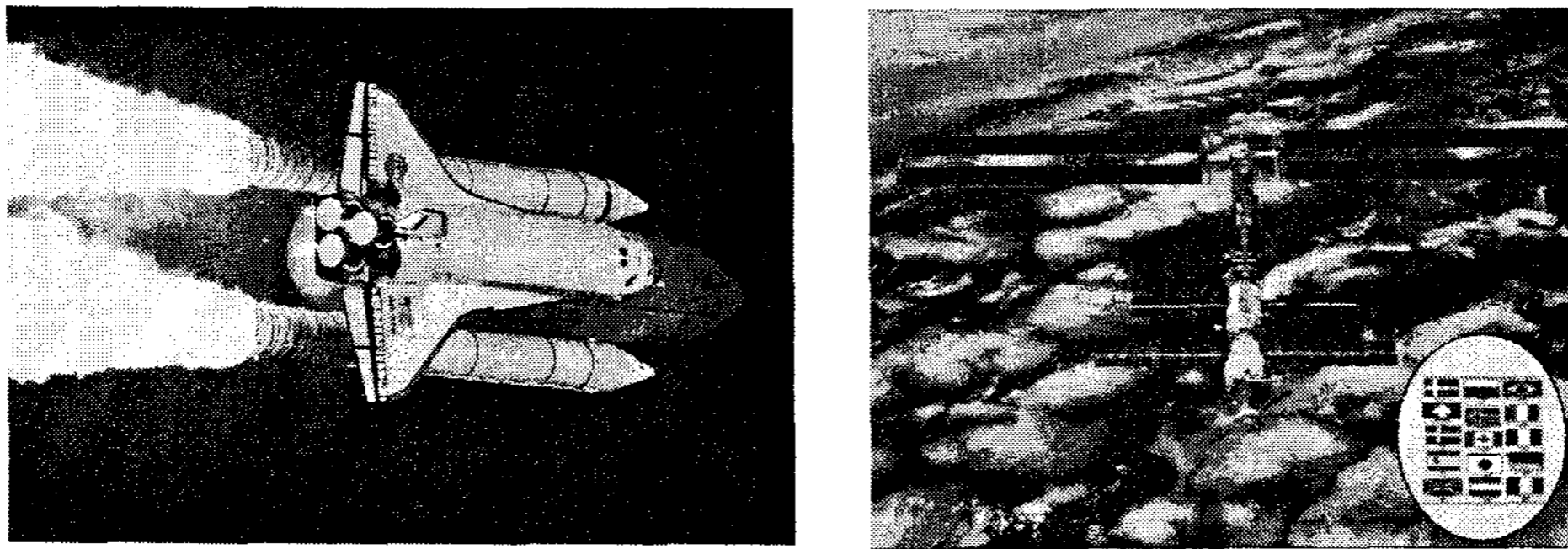


Fig 1. Space Shuttle and International Space Station.

우주는 지구와 어떻게 다를까?

우주공간이 우리들이 생활하고 있는 지구와 가장 큰 차이점은 바로 우주는 중력이 거의 없는 무중력 상태이며, 우주방사선이라 불리는 빛에너지가 존재한다는 것이다. 우리가 지상에서는 지구의 중력으로 인해 쉽게 활동할 수 있지만, 우주공간에서는 중력이 없어 마치 깊은 물속에 잠수한 것처럼 활동이 매우 불편할 수밖에 없다. 이로 인해 우주비행사는 식욕부진, 골밀도 및 근육 감소 등 생리적 문제가 발생된다(1). 또한, 지구의 대기권은 우주에서부터 오는 우주방사선으로부터 우리를 보호하고 있지만 우주공간은 그대로 우주방사선에 노출되어 있어 우주인의 건강을 위협하기 때문에 안전한 우주여행을 위해서는 무중력과 우주방사선으로부터 우주인을 보호해야하는 시스템이 마련되어야 한다(2).

우주인의 생활에 필요한 것은 무엇일까?

우주인을 무중력과 우주방사선으로 부터 보호하는 것 외에도 우주인의 생활에 필수적인 의식주 및 생활용품과 물, 산소공급, 우주에서 발생하는 우주폐기물 처리 등 우주에서도 지상에서와 같이 인간이 살아가는데 필요한 모든 조건들을 갖춰야 한다. 즉, 우주공간에서 우주인이 생활하는데 필수적인 우주식품, 우주복, 의약품 등의 생활용품 및 특수소재를 개발하고 공기정화, 우주폐기물 처리/재활용 방법 및 우주공간에서의 우주작물생산 연구 등 우주인이 지상에서와 같이 우주공간에서도 인간의 생활을 영위할 수 있도록 하는 “우주생활환경지원시스템 (Space Life Supporting System)”의 구축이 필수적이다(3).

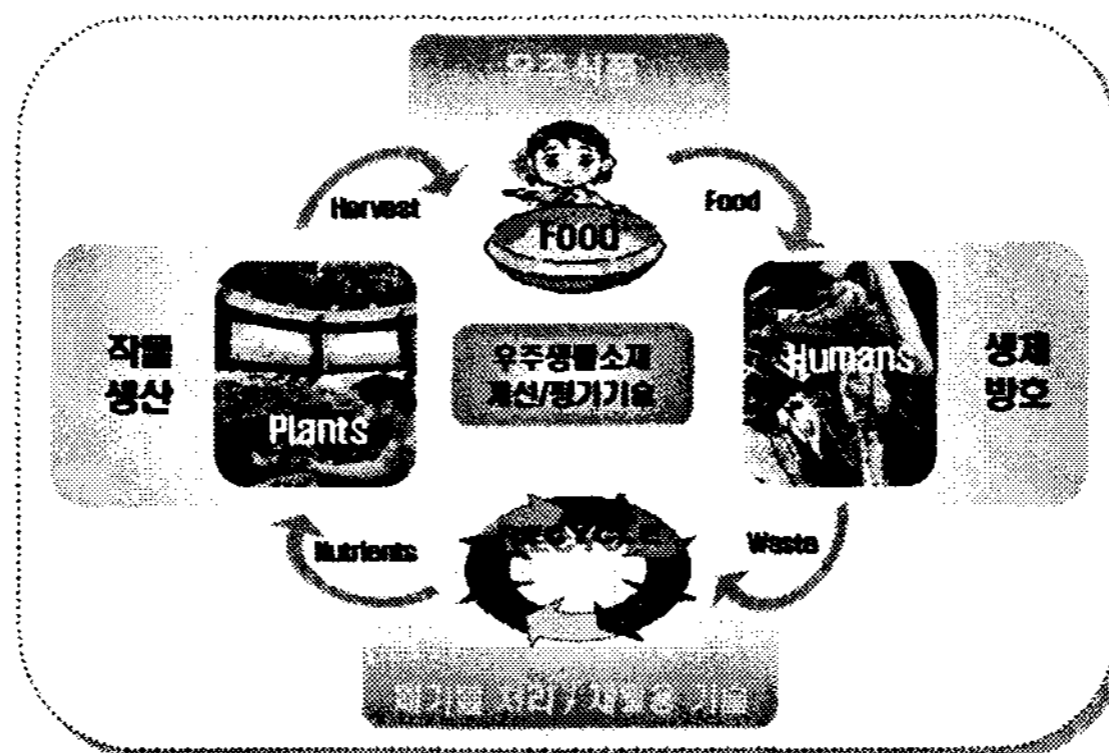


Fig. 2. Space Life Supporting System

우리나라 우주식품의 개발이 필요한 이유?

우주인의 생활을 위한 필수요건 중 가장 기본적인 것이 우주식품(Space Food)이다. 우주식품은 말 그대로 우주선, 우주정거장 및 달, 화성 등의 행성에 건설하게 될 우주기지 등 우주공간에서 우주인이 섭취할 수 있도록 만든 식품이다. 이미 미국과 러시아 등 우주개발 선진국에서는 다양한 종류의 우주식품을 개발하여 자국의 우주인에게 공급하고 있다. 그러나 지구에서도 각 나라마다 생활습관과 음식문화가 차이가 있듯이 우리나라도 한국인의 입맛에 적합한 우주식품이 반드시 필요하며, 이제 곧 우주여행을 하게 될 한국 최초 우주인과 향후 우리나라 우주인을 위해 공급되어질 한국형 우주식품을 준비해야 한다. 따라서 본 연구팀에서는 한국 우주인이 섭취하게 될 우주식품 개발을 위해 한국의 대표음식인 김치, 라면, 생식바, 수정과 등을 우주식품으로 개발하게 되었다.

우주식품이 갖춰야할 조건

우주식품은 집에서 먹는 일반음식과 큰 차이가 있다. 우주선을 우주로 발사하기 위해서는 우주선이 가벼워야 하기 때문에 우주식품의 무게도 가벼워야 한다. 현재까지 개발된 대부분의 우주식품은 우리가 집에서 먹는 컵라면과 같이 수분이 제거된 건조된 상태이며, 이러한 건조된 형태의 식품을 우주에서 섭취하기 위해서는 뜨거운 물을 부어 복원시켜 먹을 수가 있다. 그렇지만 우주공간에서 공급되는 뜨거운 물의 온도는 약 70℃ 정도로 지상에 비해 낮기 때문에 낮은 온도에서도 쉽게 복원되는 특성이 있어야 한다(4). 또한, 일반음식에는 식중독균, 발효균, 부패균 등 다양한 미생물이 존재하는데, 아무리 우리 몸에 이로운 젖산균이라 할지라도 우주공간에서는 위협적인 존재로 변화하여 우주인의 건강을 위협할 수 있기 때문에 우주식품은 완전 무균상태로 보관되어야 한다(5).



Fig. 3. Photographs of eating space foods in space.

Table 1. The microorganism limits in space foods

Food products	Microorganisms factor	Limits
Non-thermostabilized	Total aerobic count	< 20,000 CFU/g
	Coliform	< 10CFU/g
	Coagulase positive Stapylococci	0 CFU/g
	Salmonella	0 CFU/25g
	Yeasts and molds	< 50 CFU/g
	Escherichia coli	0 CFU/10g
	Bacillus cereus	< 10CFU/g
Commercial sterile products (thermostabilized and irradiated)	Sporogenic mesophilic bacilli	< 10 CFU/g
	Mesophilic anarobes	0 CFU/5g
	Yeasts, Fungi(in terms with pH<4.2)	0 CFU/2g

방사선 기술이란?

방사선 조사는 식품의 미생물학적 안전성 및 저장성을 증진시킬 수 있는 냉온살균가공법으로, 이미 국제보건기구에서 그 안전성이 입증되어 세계적으로 널리 이용되고 있으며, 특히 10 kGy 이상의 고선량 조사는 환자식이나 우주식품과 같은 완전 멸균이 필요한 특수식품을 제조하는데 유용한 기술이다(6). 그러나 고선량 조사는 식품 고유의 관능적 품질을 변화시키므로 그 적용에 있어 많은 제한이 따른다. 특히, 채소식품은 고선량의 방사선 조사에 의해서 연화 현상 또는 맛, 색, 풍미와 관련된 관능적 품질 변화가 발생하여 소비자 수용도가 저하되므로 이들 식품에 방사선 조사기술을 이용할 수 없는 경우가 많다(7). 따라서 이러한 방사선 조사에 의한 품

질 변화를 최소화하기 위해서는 방사선기술 기반 식품공학 융합기술의 개발이 요구되어 진다.

방사선 기술 이용 우주식품들

미우주항공국(NASA)의 경우, 미 육군 Natick 연구소와 공동으로 1960년대부터 우주식품과 군 전투식량 개발에서 방사선 조사기술을 핵심기술로 하여 다양한 연구를 수행 중에 있다. 특히 육가공제품은 그 특성상 식인성 병원균의 성장으로 식품의 안전성이 위협받을 수 있기 때문에, 미생물학적 안전성을 확보하기 위한 가공법으로 방사선 조사기술이 연구되고 있으며(8), 미생물 제어로 인한 위생 증진 효과 뿐 만 아니라 그 건전성 또한 입증되었다. 특히 40 - 50 kGy의 고선량 조사를 통한 멸균 즉석 육가공품 제조 등에서 실용화를 달성하고 있다.

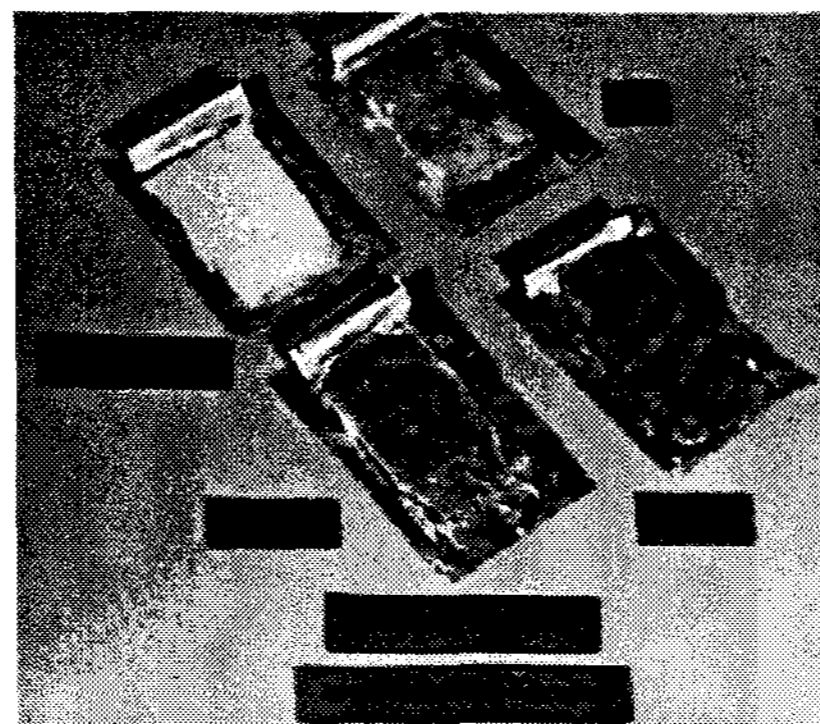


Fig. 4. Gamma-irradiated space foods (steak, barbecue, and ham)

방사선기술 이용 우주김치 개발

앞서 기술한 바와 같이 한국 최초 우주인에게 공급되어질 한국형 우주식품으로써 우리나라를 대표하고 한국인이 가장 즐겨하는 음식인 김치, 라면, 수정과, 생식바를 우주식품으로 개발하게 되었다. 김치를 우주식품으로 개발하기 위해서는 우리 몸에 좋은 것으로 알려진 젖산균이 오히려 문제가 되며, 건조를 하면 맛이 없어지기 때문에 특별한 기술이 필요하였는데, 이를 해결한 것이 바로 방사선 식품조사 (Food Irradiation) 기술이다. 방사선 식품조사 기술은 대표적인 비가열 살균처리 방법으로 김치와 같이 가열 및 건조 처리를 할 수 없는 식품의 살균에 매우

효과적인 기술이다. 세계 최초로 개발된 우주김치는 방사선 조사처리를 통해 집에서 먹는 김치와 같이 장기간 보관하여도 더 이상 쉬지 않고 신선한 상태로 보관이 가능하며 건조를 하지 않아 물을 붓지 않아도 즉석에서 섭취할 수 있도록 개발되었다.

그 과정은 다음과 같다.

1. 감마선 조사에 의한 김치의 미생물학적, 관능적 품질 변화

숙성 적기의 김치를 포장하여 감마선 조사를 실시하였다. 조사선량 변화에 따른 총균수 측정 및 관능평가를 실시한 결과 총미생물 수는 조사선량이 증가할수록 감소하였으며, 특히 25 kGy 이상 조사 시 검출한계 이하로 나타났다. 그러나 관능평가 결과 색, 조직, 맛, 향, 종합적 기호도는 조사선량이 증가할수록 감소하는 경향으로 25 kGy 조사구의 경우 이취 및 이미의 발생으로 인해 관능적으로 수용 불가능하다고 판단되었다. 따라서 이러한 관능적 품질저하를 최소화하기 위한 기타 식품가공기술과의 병용처리 기술 개발이 필요하였다.

2. 가열과 감마선 병용처리에 의한 효과

가열 처리된 김치의 저장안전성과 관능적 품질 평가를 실시하였다. 온도의 증가에 따라 총균수는 감소하였으나 관능적 품질은 저하되었다. 또한 미생물 살균 효과 및 관능적 품질 면에서 가장 적합한 가열조건은 60℃, 30분으로 판단되었다. 이 후 숙성된 포장 김치를 60℃에서 30분간 처리하여 감마선을 연속적으로 처리한 후 35℃에서 가속저장하면서 미생물 생육 및 관능적 품질을 평가하였다. 가열 후 감마선 조사는 미생물 증식과 저장 중 김치의 품질변화를 막는데 효과적이었다. 특히, 25 kGy의 감마선 조사와 가열을 병용처리하여 35℃에서 14일 저장 시 미생물은 검출되지 않았고 관능점수도 가장 높았으며 산도, pH의 변화 역시 거의 없었다. 그러므로 가열과 감마선 병용처리는 김치의 저장안정성을 개선하고 관능적 품질을 유지하는데 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

3. 질소치환포장, 가열 및 감마선 병용처리에 의한 효과

가열 및 감마선 조사 시 포장 내부에 있는 산소가 김치의 이화학적, 관능적 품질에 미치는 영향을 평가하기 위하여 김치를 합기포장 또는 질소치환포장을 한 후 60℃, 30분 가열하고 25 kGy의 선량으로 감마선 조사를 실시하였다. 실험결과 두 실험구 모두 젖산균을 포함한 세균들

이 검출되지 않았고, 김치의 산도 또한 저장 중 변화가 없었다. 그러나 질소치환포장 시 합기포장에 비해 김치의 경도 및 관능적 품질이 높게 평가되었으며 이는 가스치환포장 후 방사선 조사가 채소의 조직특성을 유지시켜 준다는 선행연구들과 일치하는 결과였다(9,10). 따라서 이후의 실험은 질소치환포장을 사용하여 진행되었다.

4. 온도에 따른 감마선 조사의 효과

질소치환포장 후 가열처리된 김치를 여러 온도에서 감마선 조사하여 미생물학적, 이화학적, 관능적 품질평가를 실시하였다. 김치 샘플은 질소치환포장과 60°C에서 가열 후 25°C, -20°C, -70°C, -178°C에서 각각 25 kGy의 선량으로 감마선 조사되었다. 온도별 감마선 처리구의 미생물, pH 및 산도측정 결과 조사온도에 상관없이 김치의 멸균이 확인되었으며, 관능검사 및 조직감 분석 결과 -70°C에서 감마선 조사 되었을 때 김치 조직의 경도 및 관능적 품질이 가장 높았다. 조사온도 감소에 따라 ESR signal 강도가 낮아지는 것을 확인하였으며 이는 온도감소에 따라 품질에 영향을 주는 자유라디칼의 생성이 줄어들어 관능품질의 저하가 완화된 것으로 판단되었다. 따라서 -70°C에서의 감마선 조사는 관능적 품질저하를 방지하는데 있어 효과적인 것으로 판단되었다.

5. 식품첨가물에 의한 관능적 품질 개선 효과

가. 비타민 C 첨가에 의한 효과

감마선 조사에 의한 김치의 조직연화 방지를 위해 비타민 C의 처리 효과를 평가하였다. 비타민 C가 0.3% 첨가되었을 때 관능적 선호도가 가장 높았으며 김치의 경도는 비조사구 > 비타민 C 첨가구 > 무첨가구 순으로 나타났다. 또한 30일간의 저장기간 후 비타민 C가 첨가되지 않은 김치의 경도는 급격히 감소함에 반해 비타민 C가 첨가된 김치의 경도변화는 적었다. 따라서 비타민 C의 첨가는 25 kGy로 감마선 조사된 김치의 경도변화 감소에 효과적이라고 판단되었다.

나. 칼슘염 첨가에 의한 효과

고선량 감마선 조사에 의한 김치의 조직연화를 방지하기 위해 여러 가지 칼슘염들의 첨가에 따른 처리 효과를 평가하였다. 첨가된 칼슘염들은 calcium lactate, calcium acetate, calcium chloride이었고, 각각 0.01% 농도로 첨가되었을 때 관능적 선호도가 가장 높았다. 비첨가구에 비

해 칼슘염들의 첨가는 조직의 경도를 증가시켰으며 각각의 칼슘염 첨가에 따른 김치의 경도는 calcium lactate 김치 > calcium chloride 김치 > calcium acetate 김치 순으로 나타났다. 조직, 맛, 풍미 및 종합적 기호도 역시 calcium lactate 김치 > calcium chloride 김치 > calcium acetate 김치 순으로 나타났다. 그리고 비타민 C 0.3% 와 calcium lactate 0.01%를 첨가한 다음 질소치환포장-가열-냉동-감마선 병용처리된 김치의 35℃에서 30일 저장 후 경도는 비조사구와 무첨가 병용처리구 보다 높게 나타났다. 따라서 비타민 C와 calcium lactate의 첨가는 김치의 연화현상을 지연시키는데 효과적인 것으로 판단되었다.

다. 파프리카색소와 김치향의 관능적 품질 개선 효과

고선량 감마선 조사에 의한 김치의 탈색 및 이미, 이취로 인해 저하된 관능적 품질을 개선하기 위해 파프리카색소와 김치향을 첨가한 후 관능적 품질평가를 실시하였다. 색도계를 통한 35℃, 30일 저장 후의 적색도 측정결과 파프리카색소 0.2% 첨가 시 비조사구와 유사한 수치를 보였으며 관능적 선호도도 가장 높았다. 또한 김치향 0.2% 첨가 시 맛, 풍미, 종합적 기호도에서 가장 높은 평점을 얻었다. 따라서 파프리카색소와 김치향의 첨가는 감마선 조사에 의해 저하된 김치의 관능품질을 개선하는데 효과적이었다.

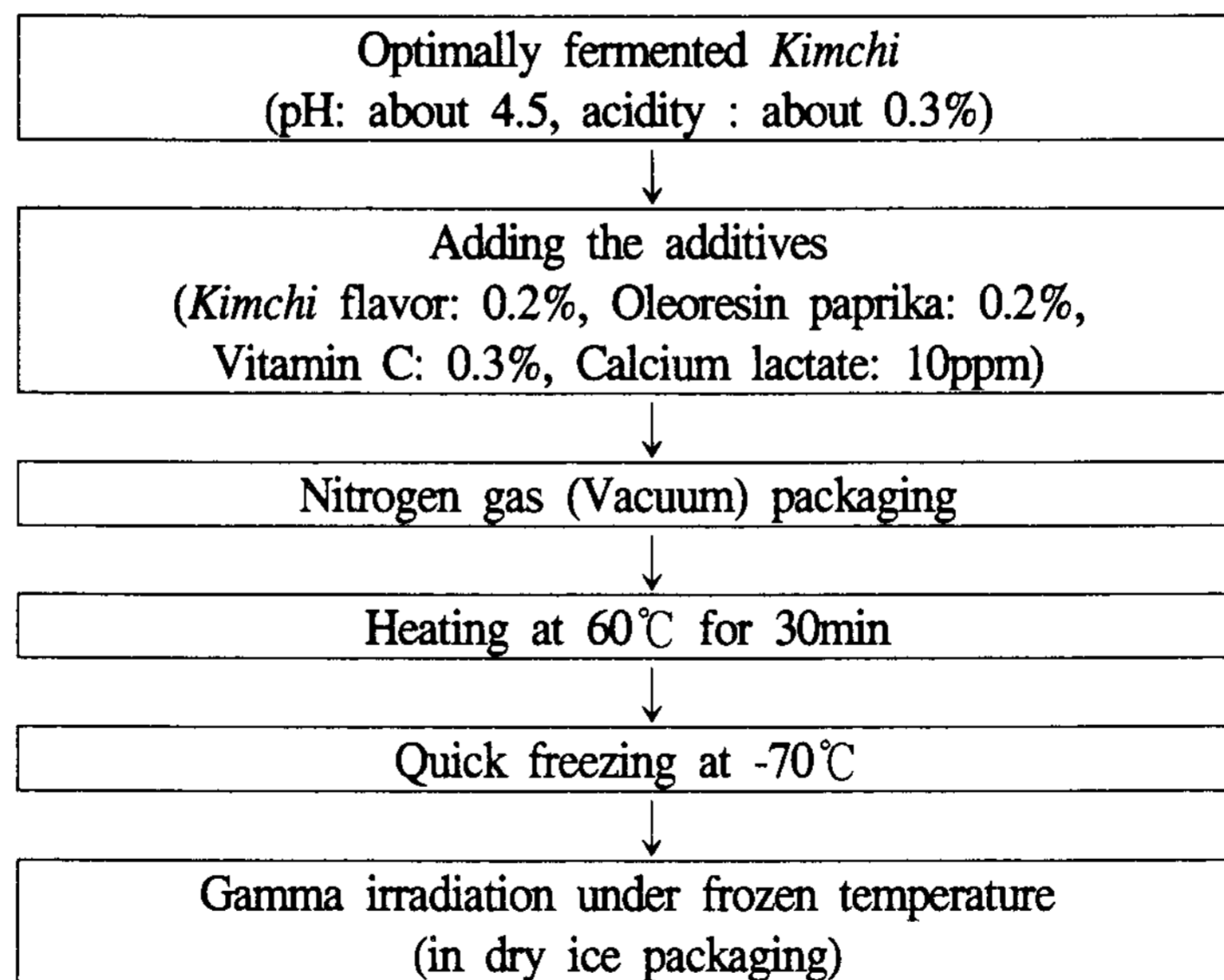


Fig. 5. Manufacturing processes of space *Kimchi*.

Table 2. Viable cell count¹⁾ of space *Kimchi* during the storage at 35°C

Storage day	0 kGy	15 kGy	20 kGy	25 kGy
0	2.3×10 ⁴	ND ¹⁾	ND	ND
5	9.6×10 ⁶	ND	ND	ND
10	8.2×10 ⁷	3.0×10 ²	ND	ND
20	2.3×10 ⁸	6.0×10 ²	ND	ND
30	1.6×10 ⁷	9.0×10 ²	ND	ND
60	2.0×10 ⁴	4.0×10 ³	ND	ND
90	1.2×10 ⁵	9.6×10 ⁴	ND	ND

¹⁾Total viable cells : plate count agar (Difco Lab., St. Louis, US) incubated at 35°C, 48 hr

²⁾ND : not detectable at detection limit less than 10²

방사선 기술 이용 우주라면 제조

우주라면은 우리가 집에서 먹는 컵라면처럼 물을 부어먹도록 개발되었으나, 일반라면과는 달리 국물이 없이 마치 스파게티와 같은 비빔면 형태이며, 한국 우주인의 식욕을 돋게 하기 위해 매콤한 맛이 나도록 개발되었다. 한국형 우주라면의 가장 큰 특징은 우주에서 공급되는 물의 온도인 70°C에서도 복원이 가능하도록 생산된 것이다. 또한, 우주인에게 한끼의 식사를 한국음식으로 공급하기 위해 라면과 김치 외에도 우리나라 전통식품인 수정과와 강정형태의 생식바를 개발하여 한국 최초 우주인에게 공급할 예정이다.

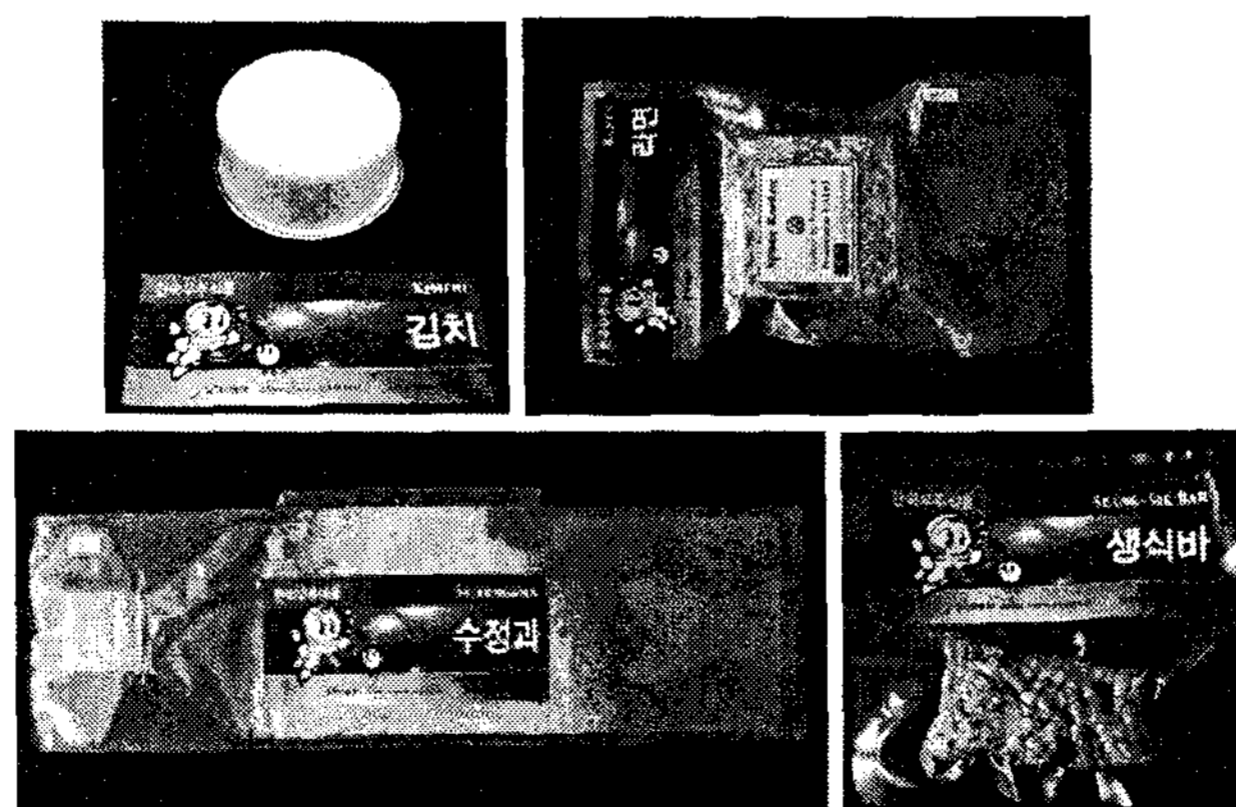


Fig. 6. Korean space foods to be supplied for the first Korean astronaut.

Table 3. Effects of irradiation on the growth of aerobic microbes and spores in the space *Ramen* (CFU/g)

Irradiation dose (kGy)	Total aerobic microbes	Bacterial spores	Fungi and yeast
0	7.6×10^2	2.0×10^1	ND ¹⁾
1	1.9×10^2	1.0×10^1	ND
2	1.4×10^2	ND	ND
3	8.0×10^1	ND	ND
4	7.0×10^1	ND	ND
5	5.0×10^1	ND	ND
6	4.0×10^1	ND	ND
7	3.4×10^1	ND	ND
8	2.0×10^1	ND	ND
9	1.0×10^1	ND	ND
10	ND	ND	ND

¹⁾ND: Not detectable at detection limit less than 10^1

Table 4. Viable cell count of total aerobic bacteria and bacterial spores on the irradiated space *Saengshik* bar (Log CFU/g)

Irradiation dose (kGy)	Total aerobic microbes ²⁾	Bacterial spores ³⁾
13	2.0×10^2	ND ¹⁾
15	7.0×10^1	ND
17	1.0×10^1	ND
20	ND	ND

¹⁾ND: Not detected within the detection limit less than 10^1

²⁾Total viable cells: plate count agar (Difco Lab., St. Louis, USA) incubated at 35°C, 48 hr

³⁾Bacteria spores: plate count agar (Difco Lab., St. Louis, USA) incubated at 35°C, 48 hr after heat treatment (98°C, 10 min),

미래우주식품의 연구개발

가까운 미래에는 3 가지 유형의 우주식품이 요구될 것이다. 첫째, 지구에서 화성까지 약 180 일 정도의 편도여행시간이 소요되는 화성왕복우주선의 우주식품이다. 이 시스템에서는 제1차

식품시스템은 포장식품이며, 샐러드와 같은 최소가공식품은 우주선 내에서 재배되어 공급되며, 물은 유일한 이용자원이다. 둘째, 화성표면착륙기지용 우주식품이다. 대략 600일 가량 정착하게 되며, 야채류 이상의 식물을 재배할 수 있는 식물재배공간이 필요하며, 재배된 식품들이 제1차 식품으로 이용될 수 있다. 셋째, 화성 기지용 우주식품으로서 임무시 대략 600일 가량 정착하며, 화성기지는 10년 이상 그 기능을 수행할 것이며, 임무는 거의 90 % 이상의 식품을 재배식물에서 얻게 된다. 또한 장기우주임무에는 이러한 미래우주식품 시스템 이외에도 ALS 시스템이 필요하다. 공기와 물을 재순환하여 사용하며, 곡류를 생산하여 저장가능한 형태의 식품으로 가공하고, 고형 폐기물들을 처리하는 것 등이 첨단생명지원시스템의 주요 기능이다. 첨단식품 시스템은 안전해야 하며, 영양학적, 정신학적, 그리고 우주인들의 기호도 등이 고려되어야 한다. 우주여행 및 탐험 임무에 이용될 3-5년의 저장기간을 가진 별도의 특수포장식품을 개발하여야 하며, 재배된 곡류를 원료와 제품으로 가공시킬 장치나 기계 등을 고안, 제조, 및 유지하여야 한다.

기대효과

향후 한국형 우주식품의 성공적인 공급으로 수행된다면 현재 우주기술 분야 기술선진국인 미국, 러시아, EU, 일본 등과 함께 우주개발 선진국으로 도약하여 국가위상을 드높일 수 있는 계기가 된다. 또한, 현재까지 개발된 라면과 김치 외에도 대표적인 한국음식인 비빔밥, 불고기 등을 이용한 다양한 한국형 우주식품을 개발하고 있다. 그리고 본 연구를 통해 개발된 기술은 우주에서 뿐만 아니라 실생활에서도 산업적 활용가치가 매우 높아 선진국에서 선점하지 못한 새로운 산업창출이 가능하며, 관련 산업을 활성화시켜 국민 삶의 질을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Lane, H.W. and Schoeller, D.A. (1999) Overview: History of nutrition and spaceflight. In: Nutrition in spaceflight and weightlessness models. Lane, H.W. and Schoeller, D.A. (eds), CRC Press, NY, pp. 8-10.

2. Holland, A.W. and March, R.W. (1994) Psychological and psychiatric considerations. In: Space physiology and medicine. Nicogossian, A.E., Huntoon, C.L. and Pool, S.L. (eds), Lea and Febiger, Philadelphia, P.A, pp. 424-434.
3. NASA (2003) Advanced Food Technology Workshop Report (Vol. I). In: Advanced Life Support Project Plan. CTSD-ADV-348 Rev C, JSC-29993, Houston, Texas, pp. 1-2.
4. Bourland, C.T., Fohey, M.F., Kloeris, V.L. and Rapp, R.M. (1989) Designing a food system for space station freedom. *Food Technol.*, 43, 76.
5. Heighdelbaugh, N.D. (1966) Space flight feeding concepts: characteristics, concepts for improvement, and public health implications. *J.A.V.M.A.* 149, 1662-1671.
6. Farkas, J. (1998) Irradiation as methods for decontaminating food: A review. *Int. J. Food Microbiol.*, 44, 189-204.
7. Minnaar, A. (1998). Development of shelf stable, processed, low acid food products using heat-irradiation combination treatment. In: Combination processes for food irradiation. IAEA Panel proceeding series. Vienna, pp. 223-241.
8. De Bruyn (2001) Prospects of radiation sterilization of shelf-stable food. In: Irradiation for food safety and quality. (eds) Loaharanu, P. and Thomas, P. Proceedings of FAO/WHO International conference on ensuring the safety and quality of food through radiation processing. Technomic Publishing Co., Inc., Lanscaster. pp. 206-216.
9. Parkash, A., Manley, J., DeCosta, S., Caporaso, F., and Foley, D. (2002) The effects of gamma irradiation on the microbiological, physical and sensory qualities of diced tomatoes. *Radiation Physics and Chemistry*, 63, 387-390.
10. Nayak, C.A., Suguna, K., Narasimhamurthy, K., and Rastogi, N.K. (2007) Effect of gamma irradiation on histological and textural properties of carrot, potato and beetroot. *Journal of Food Engineering*, 79, 765-770.