

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 복숭아의 방사선 조사

Monte Carlo Simulation of Irradiation Treatment of Peaches (*Prunus persica* L. Batsch)

김종순¹, 김동현¹, 박종민¹, 최원식¹, 권순홍^{1*}

Jongsoon Kim¹, Dong-Hyun Kim¹, Jong-Min Park¹, Won-Sik Choi¹, Soon Hong Kwon^{1*}

〈Abstract〉

Food irradiation is important not only in ensuring safety but also improving antioxidant activity of peaches. Our objective was to establish the best irradiation treatment for peaches by calculating dose distribution using Monte Carlo simulation. 3-D geometry and component densities of peaches, extracted from CT scan, were entered into MCNP to obtain simulated dose distribution. Radiation energies for electron beam were 1.35 MeV (low energy) and 10 MeV (high energy). Co (1.25 MeV) and the Husman irradiator, containing three sealed Cs source rods in an annular array, were used for gamma irradiation. At 1.35 MeV electron beam simulation, electrons penetrated well beyond the peach skin, enough for surface treatment for microorganisms and allergens. At 10 MeV electron beam simulation, for top-beam only treatment, doses at the core were the highest and for double beam treatment, the electron energy was absorbed by the entire sample. At Co source, the radiation doses were presented on the whole area. At Cs source, the dose uniformity ratios were 2.78 for one source and 1.48 for three ones at 120 degrees interval. Proper control of irradiation treatment is critical to establish confidence in the irradiation process.

Keywords : Peach, Irradiation Treatment, Monte Carlo Simulation, Husman Irradiator

^{1*} 정회원, 교신저자, 부산대학교, 바이오산업기계공학과, 교수, 경상남도 밀양시 삼랑진읍 삼랑진로 1268-50, 우편번호 50463, E-mail: ksh5421@pusan.ac.kr, Tel: +82-55-350-5421

^{1*} Corresponding Author, Professor, Dept. of Bio-Industrial Machinery Eng., Pusan Natl. Univ Gyeongsangnam-do Miryang-si Sangnamjin-eub Sangnamjin-ro 1268-50, 50463 REPUBLIC OF KOREA

1. Introduction

복숭아는 다른 과일에 비해 호흡량이 많고 과실 내의 양분 소모가 많아서 저장 중 신선도가 저하되는 특성이 있다. 이로 인하여 유통기한이 짧고 또한 변질과 부패현상이 쉽게 일어난다. 따라서 복숭아의 저장 기간을 연장시키고 유통 중의 품질 저하를 방지하는 기술의 개발이 필요하다.

방사선 조사 기술은 국제 기구 (FAO/IAEA/WHO)에서 유용하고 안전한 식품 살균 방법으로 공인되어 산업적으로 이용되고 있다.[1] 방사선 조사 기술은 투과력이 높고, 제품이 포장된 상태로 처리가 가능하여, 2차 감염을 방지할 수 있다. 특히 식품의 저장 기간을 연장하며 제품 고유의 품질을 오랫동안 유지시킬 수 있다. 복숭아의 경우 감마선 처리가 고형물의 감소를 억제하고, 과육의 부패를 지연하여, 유통기한을 냉장 온도에서 20일 까지 연장시킬 수 있다.[2] 또한 감마선 조사는 복숭아의 미생물학적 안정성에 효과적이며 향산화능을 증진시킨다.[3]

농산물의 방사선 조사에 적합한 선량측정에는 방사선측정필름(radiochromic film)이 주로 사용되고 있으나 단위 농산물 내부의 선량 분포를 비파괴적으로 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이온화 방사선의 무작위 반응을 잘 구현하고 있는 몬테카를로 프로그램의 이용이 필요하다.

CT (Computed Tomography) 스캔은 X선과 컴퓨터 기술을 이용한 진단기법으로 의학 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 다층 CT 스캔 데이터는 의학분야에서 복잡한 대상체의 형상 정보와 밀도의 계산에 이용되어 왔다.[5] 이 기법은 농식품 분야에도 적용되어 과일과 야채의 선량 시뮬레이션에 이용되었다. 하지만 국내에서 아직까지 이러한 기술이 농식품의 방사선 처리 연구에 사용된 적은 없다.

지금까지 국내의 방사선 조사의 연구는 처리 농식품의 미생물학적, 물리화학적 변화와 조사된 농식품의 검출에 중점적으로 이루어졌다. 그리고 선진 여러 나라와 달리 국내에 허용된 조사 농식품이 분말 식품과 건조 향신료가 주를 이루어 선량 분포에 대한 연구가 활발히 진행되지 못했다.

따라서, 본 연구는 복숭아를 대상으로 CT 스캔과 몬테카를로 프로그램을 이용하여 3차원 선량 분포를 구하고 최적의 방사선 조사 효과를 낼 수 있는 방법을 제시하였다.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 CT 스캔

CT 데이터는 대상 샘플의 X선 감소 계수 (attenuation coefficient)와 밀접한 관계가 있다. 복숭아 샘플은 CT 스캐너 (Universal HD 350E, Universal System, Dolon, OH)를 이용하여 0.5 cm 간격으로 모두 16장의 이미지를 얻었다. CT의 시야 (Field of View)는 15 cm로 모든 CT 데이터는 512 x 512 화소 (pixel)로 구성되므로 영상 상세도 (resolution)는 0.29 mm로 나타났다. CT 데이터 전환 프로그램 (VoxelCal Plus, Kehlco Inc, Houston, TX)을 이용하여 CT 데이터를 이동식 컴퓨터 메모리 장치에 저장하였다.

2.2 CT 데이터를 이용한 3차원 모델

CT 이미지 데이터 처리는 Matlab Image Processing Toolbox (Mathworks, Natick, MA)를 이용하였다. 역치 (threshold value)와 영상 분할을 이용하여 불필요한 부분을 제거한 후, 최종

적으로 각 CT 데이터는 272 x 252 화소로 저장되었다.

Fig. 1는 복숭아의 중심에서 CT 이미지이며, 복숭아씨의 밀도 (1.1 g/cm^3)는 과육 (0.95 g/cm^3) 보다 높게 나타나고 있다. 복숭아씨와 과육 사이의 경계 부근에서는 밀도의 차이가 크며, 밀도값이 0.7 g/cm^3 까지도 보이고 있다.

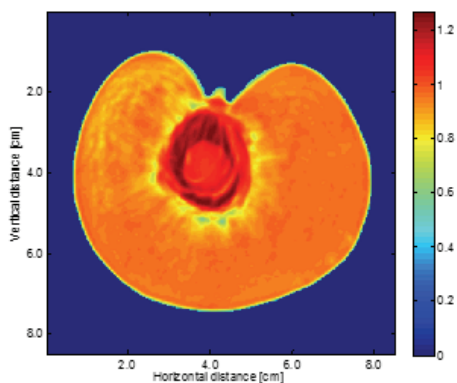


Fig. 1 CT image of a peach

방사선 전달 시뮬레이션에서 대상체 내부의 밀도 뿐만 아니라 정확한 3차원 형상 정보도 중요하다. 3차원 형상 모델은 각 층에서의 CT 데이터를 중첩시켜서 만들었다. 따라서 3차원 모델은 272 (y축) x 252 (z축) x 16 (x축)의 행렬로 구성되며, 각각의 영상 상세도는 $0.29 \text{ mm} \times 0.29 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 로 나타났다.

2.3 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서 사용된 MCNP5 (Monte Carlo N-Particle - Version 5)는 개인용 컴퓨터 (Windows 7, 3.20 GHz CPU, 32.0 GB RAM)에 설치되었다. 이 프로그램은 복잡한 형상의 대상체에서 전자와 X선 광자의 반응을 매우 정확히 수

행한다. 방사선 전달 몬테카를로 프로그램에서 조사된 전자 (electron)나 광자 (photon)는 대상체와 반응하여 이차 입자들을 발생한다. 입자의 궤적은 여러 부분으로 나누어지며, 각 부분에서 입자의 방향과 에너지 변화는 다중 산란 이론 (multiple scattering theory)으로 발생한 통계 분포를 따른다. 입자들이 관심 대상체에서 떠나거나, 입자의 에너지가 일정 기준점 (cutoff) 이하로 감소되면 입자의 반응은 종결된다.

방사선 전달 시뮬레이션에서 방사선 에너지의 종류와 세기는 매우 중요하다. 전자선 (1.35 MeV 와 10 MeV)과 감마선 (1.25 MeV) 시뮬레이션에서 방사선 에너지는 평행하며, 대상체에 모두 균일하게 도달할 수 있도록 하였다. 휴스만 조사기에서 샘플은 원형의 통 안을 회전하며 3개의 세슘 (^{137}Cs) 소스에 노출된다. 세슘 소스는 120도씩 위치하며, 에너지의 세기는 0.66 MeV 이다.

방사선 전달 시뮬레이션에서 대상체의 형상정보와 밀도 뿐만 아니라 실제 원자 구성비 (atomic composition)도 매우 중요하다. 미국 농무성 영양 성분 데이터베이스 (ndb.nal.usda.gov, NDB Id: 09236 (Peaches, raw))을 이용한 복숭아의 원자 구성비를 계산하였다. 산소와 수소가 각각 84.44%와 10.44%로, 두 원소의 질량이 복숭아에 차지하는 비율은 거의 95%에 이른다. 씨앗의 원자 구성비는 복숭아 과육과 동일하다고 가정하였다. 실제 원자 구성비는 차이가 있지만, 입자의 반응에 영향을 끼치는 유효 원자 번호 (Z_{eff} , effective atomic number)의 차이는 미미하다.

일반적으로 몬테카를로 프로그램에서 통계적으로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 많은 반복이 필요하다. 본 연구에서 각 프로그램은 10^6 이상 반복되어, 통계적인 불확정성도 (uncertainty)가 5% 이내가 되도록 하였다.

3. RESULT & DISCUSSION

3.1 전자선 조사에 의한 복숭아의 선량 분포

1) 1.35 MeV 전자선에서의 선량 분포

전자선은 가속 에너지에 따라 투과 깊이가 결정된다. 전자의 에너지가 0.5 MeV 일 때 투과 깊이는 0.15 cm로 저장된 곡물 껍질의 미생물 처리에 효과적이다.[6] 그리고 야채와 과일 등은 육류와 달리 미생물에 의한 위험이 표면 부근에 존재하기 때문에 전자선의 이용이 적합하다.[7] 본 연구에서는 실제 연구용으로 사용되고 있는 전자 가속기 (Van de Graaff electrostatic electron linear accelerator)의 에너지인 1.35 MeV를 시뮬레이션에 이용하였다.[7]

Fig. 2는 1.35 MeV의 전자선이 위에서 아래로 조사될 때 복숭아의 선량 분포이다. 최대 선량은 처음 침투를 시작하는 껍질 부분이 아닌, 0.18 cm 내부에 나타나고 있고, 전자선 조사 영역은 최대 0.58 cm 까지 나타나고 있다. 따라서 낮은 투과 깊이는 껍질 부근의 미생물 처리에 적합하

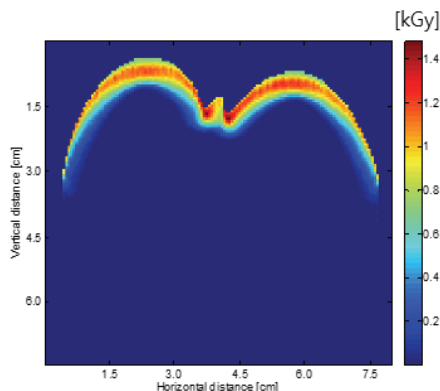


Fig. 2 Dose distribution of a peach at 1.35 MeV electron beam.

다. 또한 복숭아의 경우 껍질 부위에 알러지를 일으키는 성분이 많이 존재하며,[8] 방사선 조사는 알러지를 감소하는데 효과적이다.[9] 모든 표면에서 조사의 영향을 받기 위해서는 아래와 위 방향에서 모두 조사하거나, 복숭아를 180도 회전시켜서 전자선에 노출시키면 된다.

2) 10 MeV 전자선에서의 선량 분포

높은 에너지 상태 (10 MeV)에서 전자선의 투과 깊이는 낮은 에너지 (1.35 MeV)에서 보다 훨씬 크다. 높은 에너지의 전자선이 물에 조사되었을 때 최대 선량은 약 2.5 cm에 나타나고 투과 깊이는 5.0 cm이다.[4] 그러나 이것은 전자선 내용물이 균일한 대상체에 조사되었을 때의 결과이다. 샘플의 형상이 복잡하고 균일한 원자 조성이 아닐 경우에는 각각의 입자의 반응이 중첩되어 나타난다.

Fig. 3의 (a)는 10 MeV의 전자선이 위에서 아래로 조사 될 때의 선량분포를 보여주고 있다. 수직거리가 4.5 cm일 때 복숭아의 평균 선량은 0.88 (± 0.12) kGy이고, 4.5 cm부터 5.5 cm는 0.56 (± 0.14) kGy이고, 5.5 cm 이상은 0.12 (± 0.10) kGy이다. 입사 선량(entrance dose)을 1 kGy로 가정 할 때, 복숭아의 66%는 평균 0.88 kGy의 선량을 받는 반면, 약 16%는 0.12 kGy의 매우 낮은 선량을 받고 있다. 또한 복숭아의 내부 씨에서 선량이 제일 높게 나타나고 있다. 이는 복숭아의 오목한 부분에 위치한 씨가 양쪽 볼록한 부분에 조사된 전자들로부터 어느 정도의 에너지를 받기 때문이다. Fig. 3의 (b)는 전자선이 아래에서 위로 조사될 때의 선량 분포이다. 수직거리 3.0 cm부터 복숭아의 하단 끝부분까지 선량은 균일하게 나타나고 있다. 씨앗의 경우도 큰 선량 변화를 보이지 않고 있다. 이는 복숭아의 형상과 전자선의 방향이 선량 분포에 영향을 주고 있다는

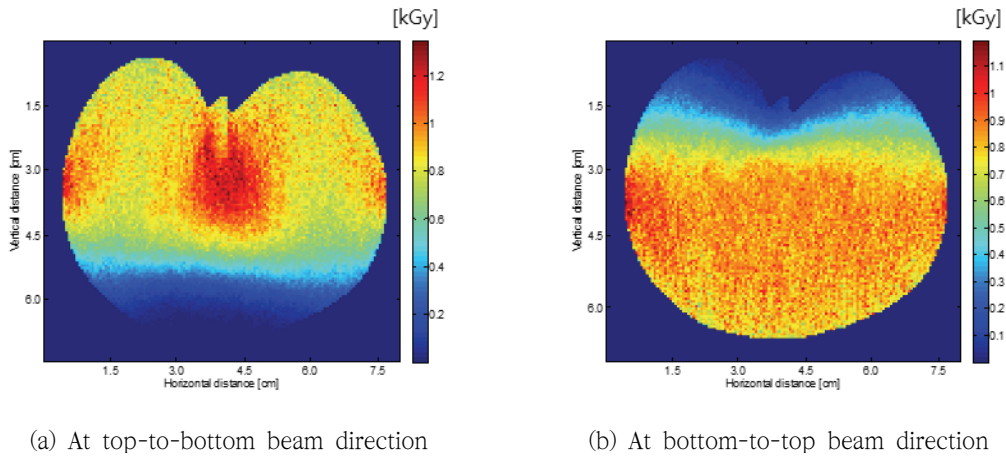


Fig. 3 Dose distribution of a peach at 10 MeV single electron beam.

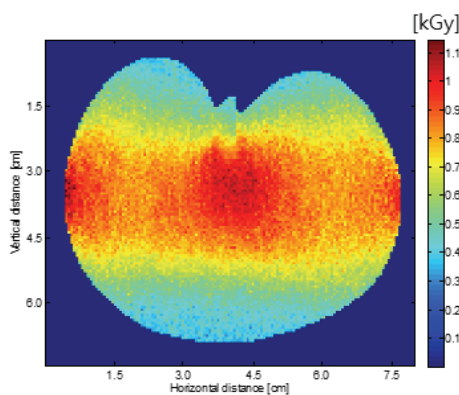


Fig. 4 Dose distribution of a peach at 10 MeV double electron beam.

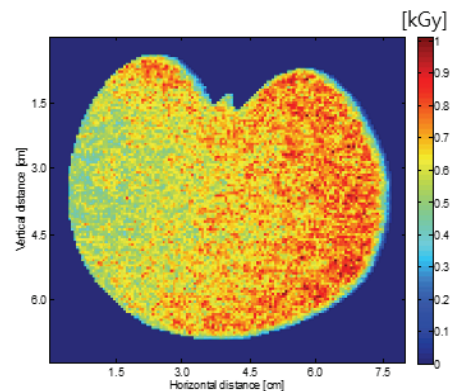


Fig. 5 Dose distribution of a peach at 1.25 MeV gamma rays.

것을 보여주고 있다.

방사선 조사처리에서 대상체의 선량 분포는 매우 균일해야 한다. Fig. 4는 복숭아를 위와 아래에서 동시에 조사하였을 때의 선량분포이다. 여전히 복숭아의 위·아래 1.17 cm까지는 낮은 선량을 보이고 있다. 또한 복숭아 전체의 선량 균일비(최대 선량을 최소 선량으로 나눈 값)는 2.37로, 여전히 높게 나타나고 있다. 이를 해결하기 위해서는 복숭아의 위와 아래 부분에 전자 에너지를 감소시키는 감쇄 물질(attenuator)을 설치하면 될

것이다.[10]

3.2 감마선 조사에 의한 복숭아의 선량 분포

1) 1.25 MeV 감마선에서의 선량 분포

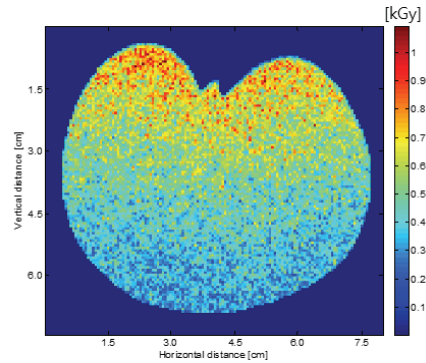
농산물의 방사선 조사 처리에 이용되는 감마선은 주로 방사성 동위 원소인 코발트(⁶⁰Co)에서 발생된다. 감마선은 전자선과 달리 극성을 가지고 있지 않아서 투과 길이가 길다. Fig. 5는 감마선

이 복숭아의 오른쪽에서 왼쪽으로 조사 되었을 때의 선량 분포이다. 높은 에너지 전자선과는 달리 선량이 복숭아 전체에 분포되어 있으며, 감마선의 진행 방향을 따라 거의 선형적으로 감소하고 있다. 감마선이 복숭아에 조사될 때의 선량은 0.81 kGy이고, 복숭아를 빠져 나갈때는 0.51 kGy로, 약 37% 감소하였다. 또한 선량 균일비는 1.84로 10 MeV 전자선보다 훨씬 낮다.

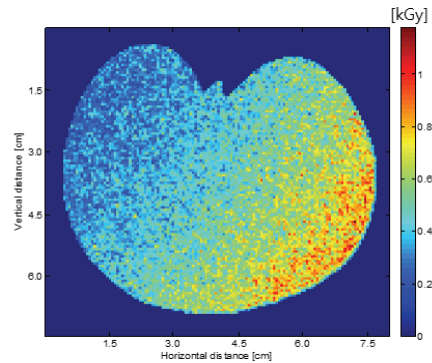
높은 에너지 전자선과 마찬가지로 감마선이 반대 방향 (왼쪽에서 오른쪽)으로도 조사될 경우, 선량 균일비는 1.63으로 나타났다. 일반적으로 조사 처리에서 선량 균일비가 1.5보다 작은 것을 추천 하지만, 농산물의 경우는 2.0 혹은 3.0까지도 허용하고 있다.[11] 따라서 서로 다른 두 방향에서 감마선을 조사할 때 균일한 선량 분포를 얻을 수 있다.

2) 0.66 MeV 감마선에서의 선량 분포

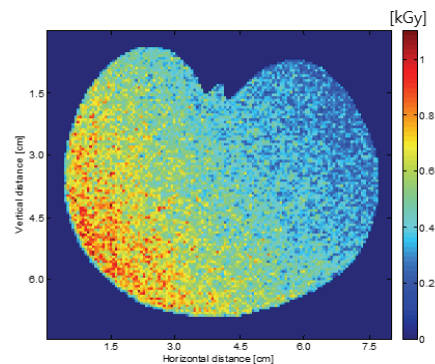
Fig. 6의 (a)는 방사선 소스(Cs)가 위에서 아래로 조사될 때의 선량 분포를 나타내고 있다. 코발트 감마선과 같이 선량이 복숭아 전 영역에 분포되어 있지만, 선량 균일비는 2.78로 훨씬 높다. 이는 코발트(⁶⁰Co)로부터 발생한 감마선은 평행하게 복숭아에 조사되지만 (parallel source), 휴스만 조사기는 점 소스(point source)로 복숭아에 방사형으로 조사되기 때문이다. 방사선 소스가 각각 남동(SE)쪽 남서(SW)쪽에 위치할 때, Fig. 6의 (b)와 (c)에서 보는 바와 같이, 선량 균일비는 3.32와 3.23으로 다소 높게 나타나고 있다. 하지만 복숭아가 세 곳 모두에 노출될 경우에는 선량 균일비가 1.48로 계산되며, 전체 선량은 정규분포 (평균 0.49 kGy, 표준 편차 0.06 kGy)를 이루고 있다. 그림 6(a)에서는 그림 3(a)와는 달리 씨앗 부분에 선량 집중이 나타나지 않고 있다. 이는 감마선이 방사형으로 조사되어 씨앗 부분에 선량이 집중되지 않기 때문이다.



(a) Source location is at North (N)



(b) Source location is at Southeast (SE)



(c) Source location is at Southwest (SW)

Fig. 6 Dose distribution of a peach at 0.66 MeV gamma rays

휴스만 조사기는 세슘(^{137}Cs) 소스가 납으로 만든 차폐물에 들어 있어서 구조가 간단하며 이동이 용이하다. 지금까지 많은 농식품은 방사선 조사처리 시설이 있는 곳까지 장거리 운반되어 처리되었다. 따라서 휴스만 조사기에 대한 결과는 수확 혹은 생산 현장에 바로 적용할 수 있는 조사처리 장치의 개발에 중요한 아이디어를 제공하고 있다.

4. CONCLUSION

농식품의 선량 시뮬레이션은 조사처리 시설의 설계, 운용 및 품질관리에 매우 중요하다. 본 연구에서는 복숭아의 선량 분포를 방사선 전달 몬테카를로 프로그램(MCNP5)을 이용하여 계산하였다. 낮은 에너지(1.35 MeV)의 전자선은 투과 깊이(0.6cm)가 작아서 껍질 부근의 병해충 처리와 알러지 감소에 효과적이다. 높은 에너지(10 MeV)의 전자선은 투과 깊이(4.5cm)가 크며, 위와 아래 두 방향에서 조사했을 때, 선량 균일비는 2.37로 다소 높게 나타났다. 코발트(^{60}Co)에 의한 감마선(1.25 MeV)은 한 방향과 두 방향에서 조사되었을 때, 선량 균일비가 각각 1.86과 1.63으로 나타났다. 또한 세슘(^{137}Cs)에 의한 감마선(0.66 MeV)에서는 선량 균일비가 1.48로 조사 처리시 가장 효과적으로 나타났다. 본 연구 결과는 복숭아 조사처리 계획과 검증에 필요한 정보를 제공할 뿐만 아니라 앞으로 수확 및 생산 현장에 바로 적용 가능한 조사 시스템의 개발에도 큰 도움이 될 것이다.

Acknowledgement

이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group, High Dose Irradiation: Wholesomeness of Food Irradiated with Doses above 10kGy, Technical Report Series 890, WHO, Geneva, (1999).
- [2] P. R. Hussain, R.S. Meena, M.A. Dar, A.M. Wani, "Studies on enhancing the keeping quality of peach (*Prunus persica* Bausch) Cv. Elberta by gamma-irradiation," Radiation Physics and Chemistry, Vol. 77, No. 4, pp. 473-481, (2008).
- [3] M. Kim, K. Kim, H. Yook, "The Effects of Gamma Irradiation on the Microbiological, Physicochemical and Sensory Quality of Peach (*Prunus persica* L. Batsch cv Dangeunmdo)," Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition, Vol. 38, No. 3, pp. 364-371, (2009).
- [4] F. H. Attix, Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, John Wiley & Sons, New York, pp. 160-202, (1986).
- [5] H. Yoriyaz, A. D. Santos, M. G. Stabin, R. Cabezas, "Absorbed fractions in a voxel-based phantom calculated with MCNP-4B code," Medical Physics, Vol. 27, No. 7, pp. 1555-1562, (2000).
- [6] T. Hayashi, Y. Takahashi, S. Todoriki, "Low-energy electron effects on the sterility and viscosity of grains," Journal of Food Science, Vol. 62, No. 4, pp. 858-860, (1997).
- [7] C. Gomes, R. G. Moreira, M. E. Castell-Perez, J. Kim, P.D. Silva, A. Castillo, "E-Beam irradiation of bagged ready-to-eat spinach leaves (*Spinacea oleracea*): An Engineering Approach," Journal of Food Science, Vol. 73, No. 2, pp. E95-E102, (2008).
- [8] A. Botton, M. Begheldo, R. Rasori, C. Bonghi, P. Tonutti, "Differential expression of two lipid transfer protein genes in reproductive organs of peach (*Prunus persica* (L) Batsh)," Plant

- Science, Vol. 163, No. 5, pp. 993-1000, (2002).
- [9] M. Byun, J. Lee, H. Yook, C. Jo, H. Kim, "Application of gamma irradiation for inhibition of food allergy," Radiation Physics and Chemistry, Vol. 63, No. 3, pp. 369-370, (2002).
- [10] E. Chimbombi, R. G. Moreira, J. Kim, E. M. Castell-Perez, "Prediction of targeted Salmonella enterica serovar typhimurium inactivation in fresh cut cantaloupe (*Cucumis melo* L.) using electron beam irradiation," Journal of Food Engineering, Vol. 103, No. 4, pp. 409-416, (2011).
- [11] IAEA, Dosimetry for food irradiation, Technical Report Series 409, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, (2002).

(접수: 2018.10.02. 수정: 2018.11.16. 게재확장: 2018.12.05.)