



식용 버섯류에서의 인공 방사능 농도 조사

조한길* · 김지은 · 이성남 · 문수경 · 박용배 · 윤미혜

경기도보건환경연구원 농수산물안전성검사소

Monitoring of Artificial Radionuclides in Edible Mushrooms in Korea

Han-Gil Cho*, Ji-eun Kim, Sung-nam Lee, Su-kyong Moon, Yong-Bae Park, and Mi-Hye Yoon

GyeongGi-Do Institute of Public Health and Environment Agro-fishery Products Safety
Inspection Center, Suwon, Korea

(Received June 26, 2018/Revised July 19, 2018/Accepted September 13, 2018)

ABSTRACT - To ensure food-safety of mushrooms from radioactive contamination, edible mushroom samples distributed in Gyeonggi province in Korea were collected according to species and country of origin. A total of 284 mushrooms, belonging to 10 species (*Lentinula edodes*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus eryngii*, *Agaricus bisporus*, *Flammulina velutipes*, *Phellinus linteus*, *Inonotus Obliquus* (Chaga), *Auricularia auricula-judae*, *Ganoderma lucidum* and *Tricholoma matsutake*) were subjected to radioactivity testing. The concentration of artificial radionuclides, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, and ¹³⁷Cs, was analyzed using gamma-ray spectrometry. ¹³¹I and ¹³⁴Cs were not detected more than MDA value from all samples. Among 204 domestic mushrooms, however, ¹³⁷Cs were detected in 0.21~2.58 Bq/kg from six cases (3 *Lentinula edodes*, 1 *Ganoderma lucidum* and 2 *Tricholoma matsutake*), whereas ¹³⁷Cs were detected in 0.21~53.79 Bq/kg from 38 cases (22 *Inonotus Obliquus*(Chaga), 14 *Phellinus linteus*, 1 *Lentinula edodes* and 1 *Tricholoma matsutake*) among 80 imported mushrooms. In addition, average concentration of ¹³⁷Cs in 10 Chaga mushroom-processed products was more than twice as much as dried Chaga mushroom, and maximum concentration was 123.79 Bq/kg. Results suggest that radioactivity monitoring system for imported mushrooms and mushroom-processed products should be continuously intensified to secure food-safety in Korea.

Key words : Radioactivity, Cesium, Mushroom, Chaga

2011년 3월 동일본대지진으로 인해 후쿠시마 원자력발전소 사고가 발생한 이후 국내에서는 각종 식품의 방사성 물질 오염에 대한 불안감이 증가하였다. 2017년 현재 후쿠시마현 등 일본 14개현에서 생산되는 27개 품목의 농산물과 8개현에서 생산된 모든 수산물의 국내 수입이 금지된 상태이다¹⁾. 후쿠시마 원전사고 이전, 식품에 대한 국내 방사능 농도 잠정허용기준(식품의약품안전처, 식품공전 고시 제89-19, 1989)은 방사성 요오드(¹³¹I)에 대해서 영·유아용식품 100 Bq/kg, 유 및 유가공품 100 Bq/kg, 기타식품 300 Bq/kg 이하이며, 방사성세슘(¹³⁴Cs+¹³⁷Cs)은 모든 식품에 대해서 370 Bq/kg 이하로 규제하고 있었다. 그러나 후쿠시마 사고 이후 일본산 수입식품 중 방사성세슘(¹³⁴Cs+¹³⁷Cs)에 대한 임시 강화기준이 100 Bq/kg이하로

재설정 되었다¹⁾.

방사성 핵종은 크게 천연 방사성 핵종과 인공 방사성 핵종으로 구분된다. 우주선과 지각에서 나오는 천연 방사성 핵종 중 대표적인 것은 라돈(²²²Rn), 우라늄(²³⁵U), 칼륨(⁴⁰K)이다. 이중 ⁴⁰K는 천연 칼륨 중 하나이고, 거의 모든 식품에 존재하기 때문에 인체에도 존재한다²⁾. 인공 방사성 핵종은 핵실험 및 원자력 발전소 사고에 의해 주로 낙진 형태로 환경에 존재하는 것으로 대표적인 핵종은 플루토늄(²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu), 스트론튬(⁹⁰Sr), 세슘(¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs) 및 요오드(¹³¹I)가 있다³⁾. 인공 방사성물질은 1945년부터 2016년까지 진행된 2,000회 이상의 핵실험 중 주로 대기권 핵실험과, 1986년 체르노빌(Chernobyl) 원자력 발전소 사고 및 최근 2011년 후쿠시마 원자력발전소 사고 등의 원자력발전소 사고로 인해 발생한 것이다^{4,5)}. 대기 중의 인공 방사성물질은 장기간에 걸쳐 지구의 대기 순환과 강우로 인해 지표면에 낙하하여 토양과 해수에 침착되고, 오염된 토양에서 성장하는 농작물은 뿌리를 통해 인공 방사성 핵종을 흡수하여 오염되게 된다³⁾. 1986년 4월

*Correspondence to: Han-gil Cho, Agro-fishery Products Safety Inspection Center, GyeongGi-Do Institute of Health and Environment, Ansan 15507, Korea
Tel: 82-31-290-6681, Fax: 82-31-406-4602
E-mail: johangil@gg.go.kr

발생한 체르노빌(Chernobyl) 원자력발전소 사고의 경우, 주변 지역인 우크라이나, 벨라루스, 러시아 등 중북부 유럽 지역에 심각한 토양오염을 초래하였다^{5,6)}. 이로 인해, 30년이 지난 지금도 해당 지역에서 생산된 각종 버섯류 및 블리베리 등 베리류에서 지속적으로 인공 방사성 핵종이 검출되어 식품 안전상 문제가 되고 있다^{5,6)}. 대표적인 인공 방사선 물질인 ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs은 원전 사고나 핵실험 시에만 발생하며, ¹³¹I는 반감기가 약 8일로 짧지만 인체에 노출 될 경우 갑상선샘에 축적되어 암을 유발하고, ¹³⁴Cs와 ¹³⁷Cs은 반감기가 각각 2.1년과 30년으로 내부피폭 시 대부분 피하지방이나 근육에 저장되어 DNA의 변화를 일으키는 등 만성적으로 악영향을 끼친다⁷⁾. 핵 방사능 효과에 관한 유엔과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)가 제시하는 세계 평균 자연방사선 피폭선량은 2.4 mSv 이다. 이는 라돈 흡입, 지각감마선, 우주방사선 등을 포함한 양이며, 식품에 의한 방사능 내부피폭은 약 14.6% 정도이다⁸⁾. 식품 섭취에 의한 피폭량은 식사 습관에 따라 달라지며 우리나라 국민의 경우 약 12.3%로 세계 평균과 비슷한 수준으로 조사되었다⁹⁾. 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP) 권고(ICRP-60, 1991)에서 제시한 일반인에 대한 인공방사선의 유효 선량한도는 1 mSv/y 인데, 이는 식품 등에 의한 내부피폭 값과 외부피폭 값을 합한 수치이다¹⁰⁾.

버섯은 진균류에 속하는 담자균과 자낭균 중 자실체를 형성하는 고등균류로서, 각종 영양분이 다양하게 포함되어, 식용 및 약용으로 이용되어 왔다. 최근, 일부 버섯의 항암, 항당뇨, 항콜레스테롤, 항산화 작용이 보고되면서, 그 추출물 등이 각종 질병의 예방 및 치료에 도움이 되는 건강식품으로 소비되고 있다¹¹⁾. 버섯은 토양이나 나무로부터 균사체(mycelium)에 의해 흡수되는 각종 금속 성분과 방사성 동위원소를 자실체(fruiting bodies)에 생물농축(bio-concentration)하는 특성이 있다고 알려져 있다¹²⁻¹⁴⁾. 방사성 세슘(¹³⁷Cs)이 버섯류에 농축되는 원인은 버섯뿌리에 존재하는 칼륨 전달체(K⁺ transporter)가 주변 토양에 칼륨(K)이 낮은 경우에 방사성세슘(¹³⁷Cs)을 칼륨(K)으로 착각하고 통과시키기 때문인 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. 국내 유통되는 버섯류 중 차가버섯, 석이버섯, 영지버섯, 표고버섯 등에서 방사능 오염(¹³⁷Cs)이 보고되었다¹⁵⁾. 이 중 차가버섯(*Inonotus obliquus*, Chaga)은 담자균류(Basidiomycetes)의 *Hymenochaetaceae*에 속하며 러시아, 한국, 동유럽과 미국 북부지역의 자작나무 등에 자생하는 버섯으로 16세기 이후 러시아 민간에서 암, 위염, 궤양 및 결핵 치료 등에 사용되어 왔는데, 최근 연구에서는 polyphenolic 화합물, triterpenoid, steroid와 triterpene 성분 등이 항산화, 항염증, 항암 효과나 면역 활성화 증진 등 다양한 생리 효과를 갖는 것으로 확인되었다^{16,17)}. 그러나 2003년부터 2005년 사이에

진행 된 국내 식품방사능 조사사업의 결과는 러시아산 차가버섯에서 6.75~800.01 Bq/kg의 ¹³⁷Cs이 검출되었다고 보고하고 있다^{15,18)}.

2011년 후쿠시마 원전사고 발생 이후, 강화된 국내 식품 방사능 감시체계에서 중국, 러시아, 유럽에서 수입되는 농산물 중 버섯류 방사능 오염에 대한 보고들이 빈번하고 있다^{11,15,18)}. 또한, 건강식품으로 유통되는 차가버섯은 대부분 러시아에서 건조형태 뿐만 아니라 추출분말 형태로도 수입되어 활발히 판매되고 있으며, 수용성 추출액을 차 형태로 음용하고 있다¹¹⁾. 그러나 국내 유통 식용버섯류의 인공방사능 오염 수준이나 차가버섯 추출물의 방사능 오염에 대한 기초자료는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 경기도내 유통되는 버섯을 종류별, 원산지별로 수거하여 방사능 오염도를 분석하였으며, 건강식품으로 소비가 증가하고 있는 차가버섯 가공 추출물의 방사능 오염도를 조사하여 버섯에 의한 방사능 내부피폭을 예방하고자 하였다.

Materials and Methods

실험재료

시료는 식품공전 「제8. 검체의 채취 및 취급방법」에 따라, 2016년 1월부터 2017년 12월까지 경기도 내 학교, 대형유통매장, 중소형마트, 백화점, 재래시장, 지역농산물 판매점 및 온라인쇼핑몰 등에서 유통되는 버섯류 총 10종 284건을 수거하였다. 시료의 선정은 국내에서 많이 유통 소비되고 있고, 학교급식에 공급되는 표고버섯(*Lentinula edodes*, n=95), 느타리버섯(*Pleurotus ostreatus*, n=51), 새송이버섯(*Pleurotus eryngii*, n=25), 양송이버섯(*Agaricus bisporus*, n=11), 팽이버섯(*Flammulina velutipes*, n=10) 등 5종과, 인공 방사성 물질 검출 이력이 있거나 가능성이 있는 상황버섯(*Phellinus linteus*, n=28), 차가버섯(*Inonotus Obliquus*, n=22), 목이버섯(*Auricularia auricula-judae*, n=11), 영지버섯(*Ganoderma lucidum*, n=14), 송이버섯(*Tricholoma matsutake*, n=17) 등 5종을 수거하였다(Table 1). 국내산 버섯류는 총 8종 204건으로 표고버섯(n=84), 느타리버섯(n=51), 새송이버섯(n=25), 양송이버섯(n=11), 팽이버섯(n=10), 상황버섯(n=10), 영지버섯(n=10), 송이버섯(n=3) 등이며, 수입산 버섯류는 총 6종 80건으로 표고버섯(n=11), 상황버섯(n=18), 차가버섯(n=22), 목이버섯(n=11), 영지버섯(n=4), 송이버섯(n=14) 등이 수거되었다.

시료의 전처리

신속한 방사능 농도 분석을 위해서 건조, 회화 등의 전처리 과정 없이 생 시료를 분쇄한 후 직접 측정하였다. 시료 세척 후, 일반적인 식품분쇄기를 사용하여 측정 용기에 균질하게 들어갈 수 있도록 분쇄하여 사용하였다. 건

조된 형태로 유통되지만, 물에 불려서 섭취하는 단순건조 버섯류(표고버섯, 목이버섯)의 경우에는 식품의약품안전처 지침(2016.11.15.)에 따라 농촌진흥청 국립농업과학원 국가 표준식품성분표(<http://koreanfood.rda.go.kr/kfi/fct/fctNutCal/list>)의 수분함량을 고려하여 생물기준으로 환산적용하였다. 그러나 건조된 상태에서 수용성 추출을 통해 추출액을 섭취하는 3종의 버섯류(상황버섯, 차가버섯, 영지버섯)의 경우에는 바로 분쇄하여 측정하였고, 별도의 수분보정을 적용하지 않았다. 측정 용기는 용량 1 L의 마리넬리 비커(Marinelli beaker)를 이용하였다.

방사능 농도분석

감마선분광분석법을 통해 인공방사능 131I, 134Cs, 137Cs 과 천연방사능 40K 등의 방사성 핵종에 대한 방사능 농도를 분석하였다. 40K는 자연 방사성 핵종으로 지각뿐만 아니라, 사람을 포함한 생명체에 존재하며, 일반 성인의 40K 방사능 농도는 약 70 Bq/kg이다¹⁹⁾. 따라서, 식품 중 포함된 131I, 134Cs, 137Cs 등의 인공 방사성 핵종 검사에 대한 내부 대조군(internal control)으로 이용하였다. 측정에 사용된 감마선분광분석기(Gamma-ray spectrometer)는 고순도 게르마늄 검출기(High Purity Germanium Detector, HPGe) (AMETEK ORTEC, TN, USA)로 상대 효율은 60%, 고압(high voltage) 2300 V일 때 에너지 분해능(FWHM)은 60Co 1332.5 keV에서 1.95 keV 이하이다. 두께 10 cm이상의 납 차폐체를 설치하여 주변으로부터 검출기로 입사하는 백그라운드 감마선을 차단하였다. 장비의 에너지 교정과 효율교정에 사용한 표준선원은 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, KOR)에서 제작한 241Am (americium, 59.5 keV), 109Cd (cadmium, 88.0 keV), 59Co (cobalt, 122.1, 136.5 keV), 139Ce (cerium, 165.9 keV), 51Cr (chromium, 320.1 keV), 113Sn (tin, 391.7 keV), 85Sr (strontium, 514.0 keV), 137Cs (cesium, 661.7 keV), 60Co (cobalt, 1173.2, 1332.5 keV), 88Y (yttrium, 898.0, 1836.1 keV)을 포함한 혼합 표준선원을 구매하여 사용하였다. 핵종 및 정량분석은 AMETEK ORTEC사의 Gamma Vision 프로그램(AMETEK ORTEC, TN, USA)을 이용하였다.

최소검출가능농도(Minimum Detectable Activity, MDA) 및 측정시간

방사능 농도 분석에서 최소검출가능농도(Minimum Detectable Activity, MDA)는 검출한계치(lower limits of detection, LLD)를 바탕으로 해서 결정된다. 검출한계치는 Currie에 의해 제안되었으며, 계측의 통계적인 부분만을 고려해서 방사능 존재 여부를 나타내는 개념이다⁹⁾. 본 연구에서는 검출한계치 중 검출한계(LD: detection limit)에 효율, 시료량, 측정시간 등 방사능 농도에 영향을 주는 모든

인자가 들어가 있는 최소검출가능농도(MDA) 값을 사용하여 방사능의 존재여부를 판단하였다. MDA값은 아래 식에 의해 계산되었으며, 분석 프로그램인 Gamma Vision 프로그램(AMETEK ORTEC, TN, USA)을 통해 산출하였다⁹⁾.

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 \cdot \mu^B}{\epsilon \cdot m \cdot I_y \cdot T_s}$$

μ^B : 백그라운드 불확도

ϵ : 효율

m: 시료량

I_y : 감마방출률

T_s : 시료측정시간

측정용기와 장비가 정해져 있는 상태에서 특정 시료에 대해서 같은 검출기로 분석을 할 경우, 최소검출가능농도에 주로 영향을 주는 인자는 측정시간이고, 측정시간이 길어질수록 최소검출가능농도가 작아지게 된다⁹⁾. 본 연구에서는 국내 기준의 백분에 일에 해당하는 1 Bq/kg을 최소검출가능농도(MDA)로 설정하였으며, 이를 만족시키기 위한 측정시간은 10,000초로 결정하였다.

Results

국내산 버섯류 방사능 농도 분석

2016년 1월부터 2017년 12월까지 경기도내에서 유통되는 국내산 버섯류 8종(표고버섯, 느타리버섯, 새송이버섯, 양송이버섯, 팽이버섯, 상황버섯, 영지버섯, 송이버섯) 총 204건을 수거하여 방사능 농도 분석을 수행하였다(Table 1). 방사성요오드(131I)와 방사성세슘(134Cs)은 MDA값 이상에서 검출되지 않았으나 총 6건에서 방사성세슘(137Cs)이 검출되었다(Table 1). 국내산 버섯 중 표고버섯 3건, 영지버섯 1건, 송이버섯 2건에서 137Cs가 검출되었고, 버섯 종류별 137Cs 검출 농도는 표고버섯에서 생물기준 0.21~0.76 Bq/kg, 영지버섯에서는 2.58 Bq/kg, 송이버섯에서는 1.70~1.84 Bq/kg가 검출되었다(Table 1). 자연방사성 핵종인 방사성칼륨(40K)은 표고버섯(102.23~189.68 Bq/kg), 느타리버섯(85.08~140.70 Bq/kg), 새송이버섯(91.73~148.75 Bq/kg), 양송이버섯(131.20~170.67 Bq/kg), 팽이버섯(134.13~162.05 Bq/kg), 송이버섯(111.56~134.05 Bq/kg) 등에서 검출되었고, 건조형태의 상황버섯(147.61~271.68 Bq/kg)과 영지버섯(76.93~246.23 Bq/kg)에서는 상대적으로 높게 검출되었다(Table 1).

수입산 버섯류 방사능 농도 분석

동 기간 경기도내에서 유통되는 수입산 버섯류 6종(표고버섯, 상황버섯, 차가버섯, 목이버섯, 영지버섯, 송이버섯) 총 80건에서는 국내산 버섯류와 동일하게 131I과 134Cs

Table 1. Detection of ^{40}K , ^{131}I , ^{134}Cs and ^{137}Cs in 10 species of edible mushroom in Gyeonggi of Korea during 2016 to 2017

Full name of mushroom	Origin	No. of sample tested	MDA ^a range (Bq/kg-fresh)				No. of ^{137}Cs detected		Range(Bq/kg-fresh)	
			^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs	^{40}K	^{137}Cs	^{40}K		
<i>Lentinulaedodes</i> (shiitake)	Korea	84	<0.08 ~ <0.21	<0.09 ~ <0.29	<0.10 ~ <0.32	3	0.21~0.76	102.23~189.68		
	China	11	<0.07 ~ <0.20	<0.10 ~ <0.19	<0.03 ~ <0.20	1	0.21	120.59~156.36		
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Korea	51	<0.07 ~ <0.19	<0.09 ~ <0.20	<0.09 ~ <0.25	0	-	85.08~140.70		
<i>Pleurotus eryngii</i>	Korea	25	<0.08 ~ <0.21	<0.08 ~ <0.20	<0.13 ~ <0.19	0	-	91.73~148.75		
<i>Agaricus bisporus</i>	Korea	11	<0.08 ~ <0.24	<0.13 ~ <0.20	<0.11 ~ <0.19	0	-	131.20~170.67		
<i>Flammulina velutipes</i>	Korea	10	<0.12 ~ <0.24	<0.14 ~ <0.23	<0.13 ~ <0.24	0	-	134.13~162.05		
	Korea	10	<0.53 ~ <0.99	<0.62 ~ <0.95	<0.64 ~ <0.95	0	-	147.61~271.68		
<i>Phellinus linteus</i> ^b	China	15	<0.18 ~ <0.76	<0.23 ~ <0.85	<0.39 ~ <0.89	13	1.36~9.35	132.11~264.20		
	Cambodia	3	<0.27 ~ 0.40	<0.34 ~ <0.39	<0.38 ~ <0.53	1	4.19	63.18~214.97		
<i>InonotusObliquus</i> ^b (Chaga)	Russia	22	<0.35 ~ <0.96	<0.43 ~ <0.94	<0.72 ~ <0.98	22	5.14~53.79	1488.30~2048.10		
<i>Auricularia auricula-judae</i>	China	11	<0.05 ~ <0.09	<0.05 ~ <0.12	<0.04 ~ <0.13	0	-	76.01~146.23		
	Korea	10	<0.42 ~ <0.72	<0.51 ~ <0.89	<0.41 ~ <0.73	1	2.58	76.93~246.23		
<i>Ganoderma lucidum</i> ^b	China	4	<0.48 ~ <0.70	<0.47 ~ <0.68	<0.38 ~ <0.69	0	-	129.81~164.19		
<i>Tricholoma matsutake</i>	Korea	3	<0.18 ~ <0.19	<0.16 ~ <0.18	<0.13 ~ <0.21	2	1.70~1.84	111.56~134.05		
	China	14	<0.07 ~ <0.18	<0.07 ~ <0.20	<0.14 ~ <0.20	1	5.75	96.96~151.09		
Total		284				44				

^aMDA denoted minimum detectable activity^bThis type of mushroom was dry, not fresh.

Table 2. Detection of 40K, 131I, 134Cs and 137Cs in Chaga mushroom-processed products in Korea in 2017

Samples	Test weight (kg)	Bq/kg			
		MDA ^a		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
		¹³¹ I	¹³⁴ Cs		
A	0.91	< 0.36	< 0.55	32.94 ± 0.75	4667.1 ± 77.63
B	0.84	< 0.59	< 0.56	45.67 ± 0.98	3948.4 ± 67.46
C	0.61	< 0.44	< 0.56	42.74 ± 0.84	3714 ± 62.06
D	0.89	< 0.5	< 0.55	68.75 ± 1.22	4312.4 ± 70.7
E	0.87	< 0.36	< 0.52	39.43 ± 0.87	4278.2 ± 71.9
F	0.77	< 0.36	< 0.39	55.48 ± 1.13	3928.2 ± 65.65
G	0.61	< 0.73	< 0.62	123.79 ± 2.39	4763.9 ± 81.21
H	0.91	< 0.32	< 0.4	33.3 ± 0.96	4127.4 ± 116.52
I	0.51	< 0.52	< 0.81	26.53 ± 0.83	3325.6 ± 59.88
J	0.97	< 0.36	< 0.51	40.41 ± 0.88	4453.5 ± 74.52
Max	0.97	< 0.73	< 0.81	123.79	4763.90
Min	0.51	< 0.32	< 0.39	26.53	3325.60
Average	0.79			50.90	4151.87

^aMDA denoted Minimum detectable activity

은 MDA값 이상에서 검출되지 않았으나, 표고버섯 1건 (0.21 Bq/kg), 상황버섯 14건, 차가버섯 22건, 송이버섯 1건 (5.75 Bq/kg) 등 총 38건에서 137Cs가 검출되었다(Table 1). 러시아산 차가버섯 22건에서는 137Cs이 5.14~53.79 Bq/kg이 검출되었고, 중국산(n=13) 및 캄보디아산(n=1) 상황버섯에서는 137Cs이 1.36~9.35 Bq/kg이 검출되었다. 자연 방사성 핵종 40K는 중국산 표고버섯(120.59~156.36 Bq/kg), 중국산 목이버섯(76.01~146.23 Bq/kg), 중국산 송이버섯(96.96~151.09 Bq/kg) 등에서 검출되었고, 건조형태의 중국/캄보디아산 상황버섯(63.18~264.20 Bq/kg), 러시아산 차가버섯(1,488.30~2,048.10 Bq/kg)과 중국산 영지버섯(129.81~164.19 Bq/kg)에서도 검출되었다(Table 1). 수입산 버섯류의 40K 농도는 국내산과 비교하여 유사한 수준이었지만, 러시아산 건조 차가버섯의 수치가 1,000 Bq/kg 이상으로 높았다.

차가버섯 가공품에서의 방사능 농도 분석

본 연구에서 이용한 차가버섯 22건은 모두 러시아에서 수입된 것으로, 131I와 134Cs는 MDA값 이상에서 검출되지 않았고, 137Cs이 5.14~53.79 Bq/kg 범위에서 평균 23.51 Bq/kg이 검출되었다(Table 1). 차가버섯은 건조 형태뿐만 아니라, 추출분말로 가공된 형태로도 러시아에서 수입되어 판매되고 있기 때문에 시중에서 판매되고 있는 차가버섯 가공품 10개 제품을 제조사별로 수거하여 방사능 농도 분석을 수행하였다(Table 2). 총 10개의 차가버섯 가공품에서 131I와 134Cs는 MDA값 이상에서 검출되지 않았다. 그러나 137Cs은 26.53~123.79 Bq/kg 범위에서 평균 50.90 Bq/kg가 검출되었다. 이러한 결과는 건조 차가버섯의 22건의

평균 방사능 농도인 23.51 Bq/kg의 2.17배 이다. 또한, 40K은 차가버섯 가공제품에서 평균 4,151.87 Bq/kg이 검출되었고, 이러한 결과는 건조 차가버섯 평균 검출량 1769.03 Bq/kg의 약 2.35배였다.

Discussion

국내산 버섯류 중 가장 많이 소비되는 표고버섯 84건 중 3건에서 137Cs이 미량 검출되었다. 표고버섯 3건 중 2건은 건조 형태였고, 1건은 생물 버섯이었으며, 137Cs 검출량은 1~2 Bq/kg으로 낮은 편에 속하였다. 기존 국내산 표고버섯을 대상으로 한 방사능 시험 결과들은 생물 표고버섯을 건조하여 분쇄 후, 8만초(22.2hr) 이상 측정 시 0.0274~0.834 Bq/kg의 137Cs이 검출된다고 보고하였다^{20,21}). 이는 지리적, 기후적, 재배방식의 차이는 있지만, 국내산 표고버섯도 낮은 농도의 137Cs 오염이 있다는 것을 보여준다. 그 외 건조되지 않고 생물 형태로 유통되는 각종 느타리버섯, 새송이버섯, 양송이버섯, 팽이버섯 등에서는 137Cs이 MDA 값 이상에서 검출되지 않았다. 이는 참나무를 이용하여 야외에서 재배하는 표고버섯과 다르게, 실내 재배(indoor cultivation)가 많이 이루어지고 있는 버섯들이라는 공통점이 있다. 이러한 결과는 대만이나 일본에서의 선행연구 결과와 동일하였다^{22,23}). 그러나 국내산 버섯류 중 생물형태의 송이버섯 3건 중 2건에서 137Cs이 2 Bq/kg 검출되었다. 송이버섯은 위에 언급한 5가지 버섯과 다르게 현재까지 인공적인 재배가 불가능한 버섯종이다. 이러한 결과는 국내 토양에도 지역에 따른 차이는 있지만, 4.5~145.0 Bq/kg의 137Cs이 검출되었다는 보고²⁴)로 보아

자연산 송이버섯의 ^{137}Cs 오염은 채취지역의 토양오염에 기인한 것으로 판단된다.

수입산 버섯은 러시아산 차가버섯과 중국산 상황버섯에서 ^{137}Cs 오염이 검출되었다. 현재 차가버섯의 국내 재배는 불가능하여, 수입에 의존하고 있으나, 상황버섯은 국내에서 인공재배가 가능하다. ^{137}Cs 의 농도차이는 있으나, 러시아산 차가버섯은 22건 모두에서 검출되었고, 중국산 상황버섯의 약 78%(13건/15건)에서 ^{137}Cs 이 검출되었다. 반면에 국내산 상황버섯 10건에서는 ^{137}Cs 이 MDA값 이상에서 검출되지 않았다. 이와 같은 결과는 2005년 국내 식품 방사능검사 보고와 동일한 결과였다^{15,18)}. 러시아산 차가버섯에서의 ^{137}Cs 오염은 여러 가지 원인이 있을 수 있으나, 구소련이었던 러시아의 핵실험과 관련성이 높은 것으로 보인다. 카자흐스탄 세미팔라틴스크(Semipalatinsk) 인근 사막에서 행해진 구소련의 핵실험은 최근까지도 해당 지역 토양에서 400 Bq/kg 이상의 방사성세슘이 검출되는 결과를 낳았다²⁵⁾. 대표적인 러시아 차가버섯 산지인 서시베리아는 세미팔라틴스크(Semipalatinsk)와 지리적으로 인접하였기 때문에, 상대적 높은 토양오염이 발생했을 가능성이 높다. 또한, 중국의 핵실험은 비밀리에 신강(Xinjiang)성 타클라마칸사막 롭누르호수(羅布泊, Lop Nur lake) 주변에서 이루어졌다. 최근 중국의 연구결과를 살펴보면, 운남(Yunnan)성을 중심으로 채취한 고목버섯류(*Boletus spp.*) 등 다양한 버섯들에서 ^{137}Cs 가 MDA값 미만부터 339 Bq/kg까지 검출되고, 버섯재배 토양에서도 중간값 5.70 (범위 1.00-12.00) 사이의 ^{137}Cs 가 검출되었다고 보고하고 있다²⁶⁾. 그리고 버섯류의 ^{137}Cs 오염 원인이 1950~60년대 핵실험과 체르노빌 원전사고에 의해 발생한 ^{137}Cs 가 토양에 침착된 후, 버섯으로 흡수되어 발생한 것으로 추정하고 있다^{26,27)}. 이러한 결과들은 체르노빌 원전사고가 일어났던 유럽지역의 연구결과들과도 일치 한다¹²⁻¹⁴⁾. 따라서 러시아나 중국에서 임산물로 채취되는 자연산 버섯들은 토양오염에 따라, 상당량의 ^{137}Cs 을 비롯한 방사성 핵종들을 흡수한 것으로 추정된다.

표고버섯과는 다르게 차가버섯은 목질형태의 단단함을 지니고 있어서, 버섯 자체를 먹기보다는 수용성 추출액을 차 형태로 음용한다^{11,16)}. 국내 식품에서의 방사성세슘(^{134}Cs + ^{137}Cs) 기준은 2013년 9월 9일부로 370 Bq/kg에서 100 Bq/kg으로 임시적으로 강화되었다¹⁾. 하지만, 러시아에서 차가버섯은 약용식물에 포함되어 200 Bq/kg의 유통기준을 가진다²⁸⁾. 차가버섯의 추출조건이나 건조방식에 따라 다를 수 있지만, 높은 농도의 방사성세슘에 오염된 차가버섯을 이용하면 국내기준을 초과하는 차가버섯 가공품이 제조되어 국내에 수입·유통 될 수 있다. 본 연구에서 최고 높은 농도로 검출된 러시아산 차가버섯 가공품의 ^{137}Cs 농도는 123.79 Bq/kg으로 국내 기준을 초과하여, 해당 제품의 판매가 금지되었고 회수되었다.

비교적 짧은 연구기간과 적은 시료수량이라는 한계점을 고려해야만 하지만, 본 연구 결과는 특정국가에서 수입된 일부 버섯류(러시아산 차가버섯, 중국산 상황버섯 등)에서 인공 방사성물질인 ^{137}Cs 이 빈번하게 검출되었고, 러시아산 차가버섯 가공품에서 국내 기준을 초과하는 시료가 1건 확인되었다는 점을 제시하고 있다. 그러나 국내산 버섯류의 ^{137}Cs 오염 정도는 대부분 강화된 법적 기준인 100 Bq/kg에 크게 못 미치는 편이었기 때문에 버섯류 섭취로 인하여 발생하는 인공 방사성물질의 건강 위해성(health risk)이 버섯류에 포함된 영양성분들이 가지는 건강 유익성(health benefit)에 비해 대단히 낮다고 판단된다. 그러나 방사능 오염식품에 대한 국민의 우려가 높은 만큼, 식품 안전 확보를 위해 일부 수입 버섯류와 가공품에 대한 방사능검사 강화와 함께 지속적인 모니터링이 필요하다 하겠다.

국문요약

경기도내 유통되는 식용 버섯류의 방사능 안전성을 확보하기 위해, 버섯 종류별, 원산지별 샘플을 수거하여 방사능 오염도를 분석하였다. 버섯류 10종(표고버섯, 느타리버섯, 새송이버섯, 양송이버섯, 팽이버섯, 상황버섯, 차가버섯, 목이버섯, 영지버섯, 송이버섯) 총 284건을 수거하여 방사능 검사를 수행하였다. 인공방사성물질인 ^{131}I , ^{134}Cs 와 ^{137}Cs 의 방사능 농도는 감마선 측정 장비로 분석하였다. 모든 버섯 샘플에서 ^{131}I 과 ^{134}Cs 은 MDA 값 이상에서 검출되지 않았다. 그러나 국내산 204건 중 총 6건(표고버섯 3건, 영지버섯 1건, 송이버섯 2건)에서 ^{137}Cs 이 0.21~2.58 Bq/kg 검출되었고, 수입산 80건 중 총 38건(차가버섯 22건, 상황버섯 14건, 표고버섯 1건, 송이버섯 1건)에서 ^{137}Cs 이 0.21~53.79 Bq/kg 검출되었다. 그리고 차가버섯을 이용한 가공품 10건에서는 건조 차가버섯에 비해 평균 2배 이상의 ^{137}Cs 가 검출되었고, 최고 123.79 Bq/kg이 확인되었다. 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때, 식품 안전 확보를 위해 일부 수입 버섯류와 가공품에 대한 방사능검사 강화와 함께 지속적인 모니터링이 필요하다 하겠다.

References

1. Korea ministry of food and drug safety(KFDA) Information of food radioactivity safety management. Available from <http://www.mfds.go.kr/index.do?mid=975>. Accessed Jul. 1, (2018).
2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR) Report, Ionizing radiations: Sources and biological effects. (1982).
3. International Commission on Radiological Protection (ICRP),

- Radionuclide release into the environment: Assessment of doses to man. Pergamon Press, Oxford, ICRP Publication **29**, 2-10 (1978).
4. Washington Post, North Korea is the only country that has performed a nuclear test in the 21st century. Available from https://www.washingtonpost.com/graphics/world/nuclear-tests/?utm_term=.6e56f6d463b0 Accessed Jul. 1, (2018).
 5. Hille, R., Hill, P., Heinemann, K., Ramzaev, V., Barkovski, A., Konoplia, V., Neth, R.: Current development of the human and environmental contamination in the Bryansk-Gomel Spot after the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Bioph.* **39**, 99-109 (2000).
 6. Beresford, N.A., Fesenko, S., Konoplev, A., Skuterud, L., Smith, J.T., Voigt, G.: Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? *J Environ Radioact.* **157**, 77-89 (2016).
 7. Kim J.Y., Jung H.J., An M., Hong J.K., Kang T., Kang T.W., Cho Y.H., Han Y.U., Seol B., Kim W., Kim K.: Status of a national monitoring program for environmental radioactivity and investigation of artificial radionuclide concentrations (¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs and ¹³¹I) in rivers and lakes. *Anal. Sci. Technol.* **28**, 377-384 (2015).
 8. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations (UNSCEAR) Report, Exposures from natural radiation sources. (2000).
 9. Kim C.J., Lim C.S., Lee W., Jang M., Ji Y.Y., Chung K.H., Kang M.J.: Survey Study on Radioactivity of Domestic Fishery Product. *Korean J. Food Sci. Technol.* **47**, 789-792 (2015).
 10. International Commission on Radiological Protection (ICRP), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, ICRP Publication **60**, 1-3 (1991).
 11. Baek G.H., H.-S. Jeong H.S., Kim H., Yoon T.J., Suh H.J., Yu K.W.: Pharmacological Activity of Chaga Mushroom on Extraction Conditions and Immunostimulating Polysaccharide. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* **41**, 1378-1387 (2012).
 12. Marzano, F.N., Bracchi, P.G., Pizzetti, P.: Radioactive and conventional pollutants accumulated by edible mushrooms (*Boletus* sp.) are useful indicators of species origin. *Environ. Res.* **85**, 260-264 (2001).
 13. Kalac, P.: A review of edible mushroom radioactivity. *Food Chem.* **75**, 29-35 (2001).
 14. Zhu, Y.G., Smolders, E.: Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *J. Exp. Bot.* **51**, 1635-1645 (2000).
 15. Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) Report, Survey of radioactive contamination of foodstuffs. (2005).
 16. Shikov, A.N., Pozharitskaya, O.N., Makarov, V.G., Wagner, H., Verpoorte, R., Heinrich, M.: Medicinal plants of the Russian Pharmacopoeia; their history and applications. *J. Ethnopharmacol.* **154**, 481-536 (2014).
 17. Ju H.K., Chung H.W., Hong S.S., Park J.H., Lee J., Kwon S.W.: Effect of steam treatment on soluble phenolic content and antioxidant activity of the Chaga mushroom (*Inonotus obliquus*). *Food Chem.* **119** (2010).
 18. Lee W., Lee H.P., Chung K.H., Kim H.R., Cho Y.H., Choi G.S., Lee C.W., Chung H.W., Lee E.J., Sho Y.S., Lee J.O.: Survey of radioactive contamination in imported foodstuffs. *J. Korea Asso. Radiat. Prot.* **31**, 141-148 (2006).
 19. Samat, S.B., Green, S., Beddoe, A.H.: The 40K activity of one gram of potassium. *Phys Med. Biol.* **42**, 407-413 (1997).
 20. Kang T.W., Hong K.A., Park W.P., Zang-Kual, U.: ¹³⁷Cs and 40K Activities of Foodstuffs Consumed in Jeju. *Korean J. Environ. Agric.* **23**, 52-58 (2004).
 21. Ju, S.D., The influence of radioactivity sue to Hukushima nuclear power plant accident on domestic foods(mushroom). Master thesis, Department nuclear engineering graduate school of Chosun university. (2014).
 22. Wang, J.J., Wang, C.J., Lai, S.Y., Lin, Y.M.: Radioactivity concentrations of ¹³⁷Cs and 40K in basidiomycetes collected in Taiwan. *Appl. Radiat. Isot.* **49**, 29-34 (1998).
 23. Ban-nai, T., Muramatsu, Y., Yoshida, S.: Concentrations of ¹³⁷Cs and 40K in edible mushrooms collected in Japan and radiation dose due to their consumption. *Health phys.* **72**, 384-389 (1997).
 24. Kim K.H., Yun J.Y., Yoo S.H.: Distribution of Cs-137 and K-40 in Korean Soils. *J. Korean Soc. Soil. Sci. Fert.* **28**, 33-40 (1995).
 25. Taira, Y., Hayashida, N., Brahmanandhan, G.M., Nagayama, Y., Yamashita, S., Takahashi, J., Gutevitc, A., Kazlovsky, A., Urazalin, M., Takamura, N.: Current Concentration of Artificial Radionuclides and Estimated Radiation Doses from ¹³⁷Cs around the Chernobyl Nuclear PowerPlant, the Semipalatinsk Nuclear Testing Site, and in Nagasaki. *J. Radiat. Res.* **52**, 88-95 (2011).
 26. Tuo, F., Zhang, J., Li, W., Yao, S., Zhou, Q., Li, Z.: Radionuclides in mushrooms and soil-to-mushroom transfer factors in certain areas of China. *J. Environ. Radioact.* **180**, 59-64 (2017).
 27. Falandysz, J., Zalewska, T., Krasińska, G., Apanel, A., Wang, Y., Pankavec, S.: Evaluation of the radioactive contamination in fungi genus *Boletus* in the region of Europe and Yunnan Province in China. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **99**, 8217-24 (2015).
 28. Center of sanitary-epidemiological regulation, hygienic certification, and expertise of the Ministry of healthcare of Russia. Norms of radioactive safty (NRB-99): Hygienic standards of sanitary rules and standards 2.6.1.758-99 (1999).