

식품 중 수은 위해평가

최 훈 · 박성국 · 김미혜*

식품의약품안전평가원 식품위해평가부 오염물질과

Risk Assessment of Mercury through Food Intake for Korean Population

Hoon Choi, Sung-Kug Park, and Meehye Kim*

Food Contaminants Divisions, Food Safety Evaluation Department, National Institute of Food and Drug Safety Evaluation

Abstract The present study was conducted to assess the dietary exposure to mercury and the associated risks for Koreans resulting from their food intake. The probabilistic approach in the Monte Carlo simulation was used to estimate dietary exposures. Based on several reports regarding heavy metals published by KFDA in the 2000s, 178 types of representative foods were selected and data were collected on the occurrence of mercury. The contents of mercury in foods ranged: agricultural products 0.1 (fruits)-45.4 µg/kg (mushrooms), 3.7 µg/kg (meat), and 9.3 (Echinodermata, chordata)-194.9 µg/kg (fish). Others categories investigated were alcoholic beverages (0.7 µg/kg) and processed food (4.4 µg/kg). The mean and 95th percentile for exposure to dietary mercury were 4.29 and 12.48 µg/day, corresponding to 13.6% and 39.7% of PTWI (Provisional Tolerable Weekly Intake), respectively. Therefore, overall level of mercury exposure for Koreans through food intake is below levels recommended by JECFA, indicating the least possibility of risk, and is less than or similar to levels reported in other countries.

Keywords: mercury, risk assessment, food

서 론

문명의 발달과 더불어 산업화에 따른 환경오염 문제는 늘 주요한 화두로 대두되고 있다. 오염물질들은 토양, 공기, 물고기, 곡식, 동물 등 자연계에 다양하게 존재하고 있으며 이러한 오염물질 중 특히 중금속에 의한 오염은 농작물 및 해양생물들에 축적되고 이를 섭취하는 인간과 가축에서도 잔류, 축적되어 금속을 포함하는 여러 효소의 활성을 저해시키고 뼈, 신장, 간에 만성독성 증상을 유발하며, 동물 성장을 저해하는 등 여러 유해영향을 주기 때문에 환경오염물질 중 가장 문제시 되고 있다.

수은은 상온에서 유일한 액체금속으로 무기수은과 유기수은의 형태로 존재한다(1). 어류를 제외한 대부분 식품의 총 수은 농도는 <0.01 µg/g으로 매우 낮으며 대부분 무기수은 형태로 존재한다. 어패류 및 해산물에는 일반식품보다 높은 수은함량을 보이며 90% 이상이 메틸수은 형태로 존재한다(2,3). 수은은 극히 독성이 강한 원소이고 그 화합물도 대단히 강한 독성을 가지고 있다. 중독과 관련이 깊은 수은은 염화제2수은과 유기수은으로 식품중에 존재하는 무기수은은 메틸수은보다 독성이 낮은 것으로 알려져 있다(2). 유기수은은 지방용해도가 높아서 소화관에서의 흡수가 빠르고 혈액수액관문과 태반관문을 쉽게 통과할 수 있으며, 지방

성분이 많은 중추신경계통에 독성을 나타낼 수 있다(4). 또한 메틸수은은 점막, 손상부위 및 피부에서 쉽게 흡수되고 체내 단백질과 결합해서 수은 albuminate를 만들고 이것이 체액에 용해되어 체내를 순환하면서 장기, 뇌, 담즙, 타액선, 골 등에 분포한다. 배설은 타액, 땀, 담즙, 위장점막, 유즙 및 뇨로 이루어지고 특히, 장점막으로의 배설이 많다. 이 때문에 장관에 심한 염증을 초래하여 작열감, 동통이 심하게 일어난다. 기타 오심, 구토, 이질, 구강내의 염증, 타액 분비 증가를 일으키고 잇몸, 혀 등이 어두운 색으로 변하며, 종창, 궤양이 발생하고 현저한 신장해, 뇨폐색을 일으킨다. 만성중독으로는 소화기 증상, 피부증상, 신경증상 특히 불안감, 침울, 환각, 망상, 손발의 진전을 일으킨다. 신장장해를 일으켜 단백뇨, 고혈압을 유발시킨다. 유기수은은 무기수은보다 독성이 강하고 중추신경계 특히 뇌장해를 일으키기 쉽고 보행기립불능, 사지운동 마비, 언어장애, 난청, 시야 축소, 정신장애, 뇌병변 등으로 사망 등을 일으키는 미나마타병을 유발한다. 이처럼 무기수은의 독성이 발현되는 주요 장기는 신장인 반면, 메틸수은은 중추신경계에 주로 영향을 준다.

일반적으로 노출을 피할 수 없는 식품 오염물질에 대한 안전 섭취허용수준을 결정한 reference value로는 대표적으로 JECFA (Joint Expert Committee on Food Additives)에서 설정하는 주간잠정섭취허용량(Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI)와 EPA에서 설정하는 독성참고치(Reference Dose, RfD)가 있다. PTWI는 일생동안 식이섭취로 인해 인체에 축적되어도 안전한 수준을 1주간의 섭취수준으로 표기하고 있는데(5), 이는 중금속 같은 오염물질이 일정기간 동안 체내에 축적된다는 사실 때문이다. 중금속과 같은 오염물질이 평균 이상 함유된 식품을 특정일에 섭취한 정도가 일주일 동안의 섭취허용량을 초과할 수도 있다. 따라서, JECFA에서는 이러한 1일 섭취수준의 변동 가능성이 고려될

*Corresponding author: Meehye Kim, Food Contaminants Division, Food Safety Evaluation Department, National Institute of Food and Drug Safety Evaluation, Cheongwon, Chungbuk 363-951, Korea
Tel: 82-43-719-4251
Fax: 82-43-719-4250
E-mail: meehkim@korea.kr
Received August 8, 2011; revised October 25, 2011;
accepted November 2, 2011

수 있도록 1주일 간의 섭취수준으로 표기하고 있다. 잠정(provisional)이라는 용어는 특정독성영향이 나타날 가능성이 있다고 여겨지는 인체노출 수준에 대한 신뢰할 수 있는 자료가 부족한 점을 반영한 것이다(6). JECFA의 10차(1966년), 14차(1970년)회의에서 총수은의 PTWI를 300 µg Hg/person로 설정하였다가 1972년에 16차 JECFA회의에서 총수은의 PTWI로써 5 µg/kg b.w./week로 표기하였다. 그 후 여러차례 총수은의 PTWI를 재평가해 왔으며 2010년 JECFA회의에서 4 µg/kg b.w./week로 재설정하였다(7). JECFA에서는 어패류 이외의 식품으로 인한 평균 식이 총수은 노출량의 상한선이 성인의 경우 1 µg/kg b.w./week, 어린이의 경우 4 µg/kg b.w./week라 추정하였다. 한편, 무기수은(염화수은)에 대한 reference value로써 EPA에서는 1일 섭취수준으로 RfD 0.3 µg/kg b.w./day을 설정하였다(8).

식품의약품안전청에서는 중금속과 관련한 연구사업을 지속적으로 수행하여 왔으나 연구사업이 시기에 따라 단편적으로 이루어져 식품 전반에 걸친 종합적 안전평가가 이루어질 수 없었다. 따라서, 현재의 식품 중 중금속 관리체계를 한 단계 높이기 위한 방안으로 식품의약품안전청에서 수행해온 각 과제 간 연계성을 높인 종합적이고 일관성 있는 식품 중 중금속 위해평가를 수행함으로써 우리나라 국민의 중금속 노출에 따른 현 위해가능여부를 진단함으로써 향후 추진되어야 할 안전관리 정책 및 사업방안을 도출을 위한 기초자료로 활용코자 하였다.

재료 및 방법

평가대상 식품 선정

본 연구에서 중금속 안전성 재평가를 위한 대상 식품 선정은 식품의약품안전청에서 2000년대에 수행한 중금속 관련 연구과제 중 중금속 함량 원시자료가 확보된 178 식품 품목, 17,965건에 대하여 실시하였다. 178 식품품목은 Table 1과 같다.

Table 1. Food list for safety assessment

178 items, 17,965 samples	
Cereal grains (9)	rice, corn, brown rice, barley, indian mille, mille, hog millet, adlay, buckwheat
Legume (2)	soybean, red bean
Tuber (2)	sweet potato, potato
Vegetables (10)	cabbage, spinach, spring onion, radish, onion, cucumber, carrot, garlic, pepper, leek
Fruits (9)	grape, apple, pear, persimmon, mandarin orange, peach, strawberry, melon, water melon
Vegetable oil (3)	sesame, perilla, black sesame
Mushrooms (12)	shiitake, oyster, white button, tree ear, manna lichen, enoki, mastutake, king oyster, phellinus linteus, others (vegetable worms, agaricus blazeorum, lingshi mushroom, coriolus versicolor)
Meats (14)	pork, beef, chicken, duck, pork liver/kidney, beef liver/kidney, chicken liver/kidney, other products liver/kidney (goose, duck)
Fish (44)	flounder, hair tail, mackerel, pacific saury, bastard halibut, common sea bass, sea bream, pacific cod, allaska pollock, croaker, harvest fish, spanish mackerel, common mullet, angler, jacobever, alabesque greenling, eel (eel, conger eel, inshore hagfish), yellow croaker, pacific herring, sandfish, horse mackerel, gizzard shad, tuna, anchovy, spottybelly greenling, shark, swordfish, chum salmon, canned tuna, dried skipjack tuna, cat fish, others (sand smelt, bull-eye perch, flying fish, shuttles hopppish, redfin velvetfish, blue pointer, oilfish, sawedged perch, opah, patagonian toothfish, snakehead)
Shellfish (9)	granulated ark shell, pacific oyster, abalone, mussel, turban shell, little neck clam, whelk, orient hard clam, ark shell
Seaweed (4)	laver, sea mustard, dasima (sea tangle), green laver
Crustacea (3)	lobster, crab, shrimp
Mollusks (7)	common octopus, common squid, whip-arm octopus, urechis unicinctus, beka squid, webfoot octopus, jellyfish
Echinodermata & Chordata (4)	sea cucumber, sea urchin, sea squirt, warty sea squirt
Tea (13)	green tea, polygonatum odoratum, black tea, adlay tea, solid tea, black tea leached, coffee powder, coffee mix, coffee canned, others (barley tea, oolong tea, donggyuja tea, ssuk tea)
Kimchi (7)	baechukimchi, chongkakkimchi, kkakduki, yeolmukimchi, cucumber pickle, perilla leaves, danmuji
Alcoholic Bev. (11)	makgeolli, sake, beer, wine, fruit wine, soju, whisky, others (brandy, yakju, liquor, distilled liquor)
Ginseng (5)	fresh ginseng, ginseng tea (granule), red ginseng, red ginseng extract, others of red ginseng
Processed food (10)	soybean curd, soybean curd fried, starch jelly, noodles dried, noodles wet, red pepper powder, wheat flour, pork ham, pork sausage, salt

수은 분석방법 및 결과처리

수은 함량 분석은 대부분 금아말감법을 활용한 수은자동분석기를 사용하여 이루어졌으며, 대개 ppq(10¹⁵ 분의 1) 수준까지 분석이 가능하였다. 식품 중 중금속 함량 분석결과가 불검출일 경우, 이는 중금속 함량이 해당 분석법의 검출한계(LOD) 이하라는 것을 의미한다. 중금속 노출평가를 위해서는 일련의 검사결과 중 불검출이라 표현된 정성결과를 평균, 중간, 95th percentile 값처럼 숫자로 표현이 가능한 정량결과와 결합시켜야만 한다. 본 연구에서 활용한 data는 연구사업별, 시료종류별로 희석배수, 분석기기가 상이하였으며 그 결과 검출한계 또는 정량한계의 편차가 매우 컸다. 따라서, 검출한계가 ppq 수준으로 매우 낮고 불검출 비율이 낮음으로 인해 불검출 결과를 0으로 처리하는 경우와 검출한계의 1/2 수준으로 처리하는 경우 간의 결과 차가 미비하므로 중금속 노출평가를 위해서 중금속 함량 결과 중 검출한계 또는 정량한계 미만의 결과는 0(zero)로 일괄처리하였다.

수은 노출 평가

우리나라 국민 전체의 중금속 노출수준을 파악하기 위하여 Monte-Carlo simulation에 기반을 둔 확률론적(probabilistic) 위해평가를 실시하였다(Fig. 1). 이를 위해 Crystal Ball program(ver 11.1., ORACLE, Redwood Shores, CA, USA)을 사용하였고 simulation 횟수는 100,000번이었다. 위해평가에 사용된 식품의 중금속 함량은 확률론적 위해평가를 위해 중금속 함량 raw 데이터를 기반으로 만든 beta 분포 추정값을 사용하였다. beta 분포는 모수적 밀도함수(density function) 중의 하나로써 베타밀도함수는 다음과 같다.

$$P(x) = \frac{(x-a)^{(p-1)} \times (b-x)^{(q-1)}}{\beta(p,q) \times (b-a)^{(p+q-1)}}$$

Location parameter; a = minimum, b = maximum

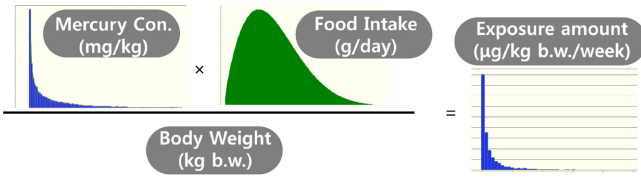


Fig. 1. The probabilistic approach using Monte-Carlo simulation.

$$p = \frac{(\mu - a) \times (2c - a - b)}{(c - \mu) \times (b - a)} \quad q = \frac{(b - \mu) \times p}{(\mu - a)}$$

μ = mean, c = mode, a = min, b = max

식품 섭취량 및 체중은 질병관리본부에서 발간한 ‘국민건강영양조사 4기 2차년도(2008년)’ 자료를 활용하였다(9). 원시자료로부터 식품 섭취량을 얻기 위해 통계프로그램인 SAS(ver 9.1.3 Service pack 4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 사용하였다.

위해도 결정

Probabilistic 노출평가를 통해 추정된 전체 인구집단의 식이를 통한 중금속 노출량으로부터 JECFA에서 제시한 PTWI 대비 위해도(%)를 산출하여 노출수준의 위해정도를 확인하였다.

위해도=

$$\frac{\text{식품 섭취로 인한 중금속 주간 인체노출량}(\mu\text{g/kg b.w/week})}{\text{JECFA의 중금속 주간 인체 노출허용량}(\mu\text{g/kg b.w/week})} \times 100$$

결과 및 고찰

확률론적 위해평가

현대 위해성 평가는 위험물질의 내재된 독성과 인구집단 노출 간의 상관관계에 의해 이루어진다. 노출평가는 위해도를 정량하고, 궁극적으로 특정물질이 국민건강에 우려할만한 위해성을 가지고 있는지를 결정하기 위해 필수적인 과정이다. 본 위해평가는 식품위생법 시행령 제4조 3항(대통령령 제21847호, 2009.11.26 개정; 10) 및 Codex의 “식품안전성 위해평가역할에 관한 원칙(Statement of Principle Relating to the Role of Food Safety Risk Assessment)”(11)에 따라 위험성확인, 위험성결정, 노출평가, 위해도결정의 과정으로 구체화하여 수행하였다. 수은의 위험성확인과 위험성 결정은 서론에서 살펴보았다.

인구집단의 노출은 단일값이 아닌 범위값에서 나타나며 집단 내 개인은 서로 다른 노출이 나타난다. 노출/위해평가 결과에 영향을 주는 변량(variability)으로는 중금속 함량, 식품섭취량 등이 있으며 이러한 변량은 probabilistic 위해평가에서 빈도 분포(frequency distribution)로 나타난다(5). 중금속 노출평가 결과는 중금속 함량, 식품섭취량 분포로부터 추정값(estimate)의 random sampling을 통한 조합을 통해 얻어진다. 이러한 과정을 Monte-Carlo simulation이라고 하며 이렇게 얻어진 결과는 단순한 deterministic 노출평가 결과보다 실제 노출가능성을 반영한다 할 수 있다. 광범위한 모델 시나리오에 적용되고 있는 Monte-Carlo simulation이 적절하고 충분히 많은 데이터에 기반하여 이루어진다면 simulation 결과가 실제 상황을 반영할 것이다. 그러나, Monte-Carlo simulation은 분포의 극단값(upper, lower)에서 부정확할 수 있으며, 비모수 분포가 아닌 모수 분포를 사용하였다면 정확할 수 있다. 오염물질 데이터의 비모수법을 사용하여 Monte-Carlo simulation을 할 경우, 실제 일어날 가능성이 없는 오염 수준이 결과에 반영되는 것을 막기 위해 분포의 상하한값을 잘라 내기도 한다(5).

그 동안 중금속과 같은 오염물질의 식품 중 함량 분포는 lognormal 분포를 갖는다고 알려져 왔다(11). 그러나, lognormal 분포는 중금속 함량 data에 대해 이론적으로 일관성 있는 모델이 아니다. 물리적으로 불가능한 data의 한정된 확률만을 보여주기 때문이다. 중금속 함량 data가 충분히 많이 있다면 lognormal 분포형태를 갖지만 그렇지 못하면 분포의 왜곡이 생길 수 있다. 이에 반해, beta 분포는 물리적으로 일관성을 보여주며, data를 수용할 만큼 유동적이기에 data가 충분하거나 그렇지 않거나 존재하는 data를 확률분포에 가장 잘 반영할 수 있으며 data가 충분하면 lognormal과 같은 분포를 보여준다(12). 중금속 노출량 추정은 Crystal Ball program을 사용한 Monte-Carlo simulation 하에 수행되었다.

식품 섭취량 및 체중

오염물질에 대한 식이 노출평가에 있어서 식품섭취량은 가장 큰 영향인자이다. 따라서 식품섭취조사 연구방법은 여러 국가간 조화가 필요하며, 조사방법이 동일하여야 오염물질 노출정도 비교평가가 가능하다(5). 특정물질의 급성(단기간) 노출평가는 24시간의 노출정도를 고려하며, 만성(장기간) 노출평가는 한평생 기간에 걸친 1일 평균 노출정도를 살펴본다. 식품을 통한 중금속의 위험성은 급성독성이기 보다는 장기간에 걸친 만성독성이기 때문에 한 평생 기간에 걸친 1일 평균 노출정도를 평가하여야 하

Table 2. Food intake of Korean general population from Korea National Health and Nutrition Examination Survey, 2008

Foods	Intake (g/day)		Foods	Intake (g/day)	
	Mean	P95		Mean	P95
Cereal grains	195.6	413.9	Seaweed	1.8	8.3
Legume	5.0	22.0	Crustacea	1.7	0.0
Tuber	30.4	144.1	Mollusks	3.7	18.4
Vegetables	91.8	436.8	Echinodermata & Chordata	0.3	0.0
Fruits	158.9	717.0	Tea	12.6	28.8
Vegetable oil	0.7	2.5	Kimchi	97.7	393.3
Mushrooms	3.2	8.0	Alcoholic Bev.	68.9	171.8
Meats	55.2	266.7	Ginseng	0.3	0.0
Fish	24.2	49.4	Processed food	43.9	145.6
Shellfish	3.2	6.0			

Table 3. Mercury concentration (µg/kg) in foods

Foods	n	Mean conc. (range)	Food	n	Mean conc. (range)	Foods	n	Mean conc. (range)	Food	n	Mean conc. (range)
Cereal grains											
rice	1,116	4.0(n.d-89.0)	millet	29	0.7(0.3-1.6)	Fish	43	60.0(n.d-176.0)	eel	146	155.5(51.2-876.0)
corn	936	1.3(n.d-27.3)	hog millet	17	0.6(0.03-1.8)	flounder	69	69.3(9.5-294.7)	yellow croaker	57	42.6(11.5-186.5)
brown rice	31	3.4(1.2-6.4)	adlay	18	0.6(0.3-0.8)	hair tail	66	83.6(21.0-382.9)	pacific herring	21	106.4(40.1-161.0)
barley	31	0.5(0.3-1.2)	buckwheat	11	1.1(0.3-2.4)	mackerel	42	57.2(15.4-167.4)	sandfish	10	77.1(33.5-150.8)
indian millet	20	0.8(0.3-4.4)			bastard halibut	45	58.3(26.0-143.8)	horse mackerel	7	73.9(21.1-221.7)	
Legume											
soybean	1,087	2.3(n.d-50.4)	red bean	1,031	2.1(n.d-57.4)	common sea bass	25	110.0(66.0-215.6)	gizzard shad	9	20.2(8.8-40.7)
Tuber											
sweet potato	1,101	3.3(n.d-144.1)	potato	1,161	0.7(n.d-25.5)	sea bream	57	145.7(36.9-565.0)	tuna	207	614.3(14.0-3210)
Vegetables											
cabbage	1,100	0.4(n.d-14.8)	cucumber	68	0.1(n.d-0.8)	pacific cod	32	106.1(21.1-903.0)	anchovy	15	20.7(8.0-43.0)
spinach	946	1.8(n.d-19.8)	carrot	51	0.1(n.d-0.9)	alaska pollack	56	37.4(7.1-229.0)	spottybelly greenling	22	52.2(28.3-97.5)
spring onion	1,017	0.5(n.d-14.7)	garlic	70	0.05(n.d-1.0)	croaker	20	56.9(20.4-188.3)	shark	27	341.5(82.0-715.0)
radish	1,131	0.5(n.d-26.4)	pepper	83	0.04(n.d-0.9)	harvest fish	33	19.7(7.5-52.0)	swordfish	88	653.9(20.0-6932)
onion	52	0.01(n.d-0.1)	leek	42	0.03(n.d-0.2)	spanish mackerel	36	26.4(6.4-55.3)	chum salmon	12	26.4(23.0-31.0)
Fruits											
grape	38	0.1(0.03-0.2)	peach	58	0.1(0.02-0.3)	common mullet	23	9.3(3.1-45.7)	canned tuna	33	88.5(23.7-723.0)
apple	58	0.1(0.01-0.3)	strawberry	20	0.5(0.02-1.9)	angler	23	111.9(28.6-425.8)	Dried skipjack tuna	13	202.5(67.5-528.1)
pear	38	0.1(0.02-0.8)	melon	20	0.1(0.01-0.2)	jacopever	57	78.9(2.3-284.1)	cat fish	11	58.6(37.1-96.1)
persimmon	58	0.1(0.03-0.4)	water melon	38	0.1(0.04-0.1)	alabesque greenling	14	45.2(14.3-100.6)	others	393	153.0(2.8-1529)
mandarin orange	58	0.1(0.01-0.7)			Shellfish						
Vegetable oil											
sesame	69	4.0(n.d-29.4)	black sesame	14	1.3(0.8-2.1)	granulated ark shell	69	15.3(5.0-152.0)	litttle neck clam	15	10.8(1.3-19.5)
perilla	12	2.6(0.6-13.8)			pacific oyster	13	9.4(6.7-13.0)	whelk	52	92.2(18.0-195.0)	
Mushrooms											
shitake	15	13.8(3.1-32.0)	enoki	15	2.1(1.3-3.1)	abalone	46	12.6(2.0-46.0)	orient hard clam	52	16.9(4.0-67.0)
oyster	15	4.4(1.7-8.5)	king oyster	25	26.5(1.2-82.2)	mussel	13	8.8(5.3-20.0)	ark shell	76	13.2(4.0-46.0)
white button	15	12.7(5.9-21.5)	phellinus linteus	10	49.7(1.0-91.0)	truban shell	60	54.1(6.0-161.0)			
tree ear	15	15.3(8.3-22.9)	others	40	105.0(6.7-520.0)	Seaweed					
manna lichen	10	118.6(77.3-204.5)			laver	25	7.4(n.d-17.6)	dasima(sea tangle)	12	19.3(2.7-45.7)	
Meats											
pork	145	3.6(n.d-66.0)	pork products	40	6.7(0.001-17.0)	sea mustard	12	17.9(3.0-24.6)	green laver	9	11.7(7.0-19.0)
beef	123	1.2(n.d-23.5)	beef products	40	7.3(n.d-44.0)	Crustacea					
chicken	120	0.6(n.d-3.0)	chicken products	40	1.1(n.d-6.0)	lobster	19	130.7(9.8-329.0)	shrimp	51	11.5(n.d-95.4)
duck	61	1.7(0.1-28.8)	Other products	84	13.8(n.d-215.0)	crab	126	70.9(n.d-431.0)			
						Mollusks					
						common octopus	34	27.0(n.d-160.6)	beka squid	16	5.2(n.d-41.7)
						common squid	79	31.1(n.d-137.4)	webfoot octopus	26	6.9(n.d-32.1)
						whip-arm octopus	59	17.0(n.d-72.4)	jellyfish	23	0.05(n.d-1.1)
						urechis uncinatus	43	3.4(n.d-26.2)			

Table 3. Continued

Food	n	Mean conc. (range)	Food	n	Mean conc. (range)	Food	n	Mean conc. (range)	
<i>Echinodermata & Chordata</i>									
sea cucumber	36	0.8(n.d-16.2)	sea squirt	46	21.3(n.d-285.5)	takju	41	1.4(0.1-10.6)	
sea urchin	12	6.2(n.d-37.5)	warty sea squirt	38	4.0(n.d-110.4)	sake	30	0.5(0.2-3.2)	
<i>Tea</i>									
green tea	42	5.7(0.7-16.3)	black tea leached	14	0.7(0.3-1.2)	beer	40	0.6(n.d-3.1)	
solomon's seal	12	8.4(3.7-20.0)	coffee, powder	20	1.3(0.8-3.6)	wine	87	0.6(n.d-8.6)	
black tea	20	2.9(0.4-7.8)	coffee, mix	10	0.8(0.5-1.3)	<i>Ginseng</i>			
adlay tea	10	1.0(0.6-1.8)	coffee, canned	10	0.2(0.2-0.3)	ginseng fresh	20	6.9(2.0-20.0)	
solid tea	10	0.6(0.2-1.8)	others	28	6.8(0.4-14.5)	ginseng tea granule	12	0.3(0.1-0.8)	
<i>Kimchi</i>									
baechukimchi	90	0.9(n.d-5.9)	cucumber pickle	90	0.3(n.d-5.5)	red ginseng extract	6	1.1(0.6-1.8)	
chongkakkimchi	90	0.4(n.d-2.6)	perilla leaves	90	3.9(0.1-17.4)	other red ginseng	52	0.6(0.2-1.7)	
kkakdukki	90	0.3(n.d-4.0)	dannmuji	90	0.1(n.d-1.5)	<i>Processed food</i>			
yeolmukimchi	90	1.3(n.d-8.5)				soybean curd	323	1.7(n.d-9.9)	
						soybean curd fried	16	1.4(n.d-7.7)	
						starch jelly	343	0.3(n.d-13.9)	
						doodles, dried	71	9.1(n.d-67.5)	
						noodles, wet	44	8.4(n.d-24.5)	
						red pepper powder	193	12.7(n.d-62.4)	
						wheat flour	37	0.4(0.2-1.0)	
						pork, ham	51	1.0(n.d-3.0)	
						pork, sausage	48	0.9(n.d-17.1)	
						salt	222	7.6(n.d-277.5)	

*n.d, not detect

며, 식품섭취량 또한 장기간에 걸친 식품섭취량 결과를 사용하여야 한다. 본 연구에서 평가대상 식품의 노출/위해평가를 위한 사용한 식품섭취량은 166개 품목의 799.8 g/day로 국민건강영양조사에서 조사된 전체 620개 식품 섭취량(1,208.8 g/day)의 66.2%이었다(Table 2). 평가대상에서 제외된 식품 중 섭취량이 높은 식품으로는 우유, 달걀, 수박, 콩나물, 쇠고기(족, 사골국물), 꼴라, 가래떡/백설기, 애호박, 과일음료, 라면, 두유, 된장, 액상요구르트, 호상요구르트, 사이다, 간장 등이었으며, 이들 식품섭취량을 평가대상 식품 섭취량과 합할 경우, 전체 식품섭취량의 81.0%이었다. 한편, 2009년 총 식이조사(TDS) 자료에서 위 식품들의 수은 검사결과가 불검출(0.02 mg/kg 미만)이었다(13). 따라서, 위 식품 섭취로 인한 중금속 섭취 추정량은 1 µg 미만으로 노출기여율이 매우 낮아 전체 중금속 노출량에 큰 영향은 없다고 판단된다. 한편, 2008년 국민건강영양조사에서 조사된 우리나라 국민 전체의 평균 체중은 55 kg이었다.

식품 중 수은 함량

178개 품목의 17,965건에 대해 수은 함량 모니터링을 실시하였다(Table 3). 곡류의 평균 수은 함량은 2.7 µg/kg으로 매우 낮은 수준이었으며, 우리나라 국민이 많이 섭취하는 쌀의 수은 함량은 4.0 µg/kg이었다. 곡류 중 쌀과 현미의 수은 함량이 타 곡류보다는 높은 수준이었다. 두류의 평균 수은 함량은 2.2 µg/kg으로 매우 낮은 수준이었으며, 대두와 팥의 수은함량은 유사하였다. 서류의 평균 수은 함량은 2.0 µg/kg이었으며, 고구마의 수은 함량이 감자보다 높은 수준이었다. 고구마의 최대 수은 함량은 144.1 µg/kg인 반면, 감자의 최대 함량이 25.5 µg/kg이었다. 채소류의 평균

수은 함량은 0.7 µg/kg이었고, 시금치의 평균 수은 함량은 1.8 µg/kg으로 다른 채소류에 비해 높았다. 과실류의 평균 수은 함량은 0.1 µg/kg으로, 딸기의 평균 수은 함량은 0.5 µg/kg으로 다른 과실류에 비해 상대적으로 높았다. 한편, 과실류에서는 다른 농산물과 다르게 모든 경우에서 검출이 되었다. 유지식물류의 평균 수은 함량은 3.4 µg/kg으로, 참깨에서 상대적으로 높게 검출되었다. 버섯류의 평균 수은 함량은 45.4 µg/kg이었다. 석이버섯, 동충하초, 아가리쿠스에서 100 µg/kg을 넘는 높은 수은 함량을 보였고 그 다음으로 송이버섯, 상황버섯, 영지버섯에서도 상대적으로 많은 수은이 검출되었다. 한편, 표고버섯, 느타리버섯, 양송이버섯, 목이버섯, 팽이버섯, 새송이버섯, 운지버섯 등에서는 낮은 수은함량을 보였다. 육류의 평균 수은 함량은 3.7 µg/kg이었다. 고기류 보다는 부산물에서 수은 함량이 높았다. 어류의 평균 수은 함량은 194.9 µg/kg이었다. 최대 함량은 새치류의 6932 µg/kg이었으며 심해성어류, 다랑어류, 새치류를 제외한 어류에서 최대 함량은 대구의 903 µg/kg이었다. 어류의 총 수은 기준 0.5 mg/kg을 초과한 경우는 도미 1건(565 µg/kg), 대구 1건(903 µg/kg)으로 초과율은 각각 1.8, 3.1%이었다. 패류의 평균 수은 함량은 30.2 µg/kg이었다. 꼬막의 최대함량은 152 µg/kg이지만 그 다음은 49 µg/kg으로 1건에 한해서 100 µg/kg을 초과한 수은이 검출되었다. 패류의 수은 기준치 500 µg/kg을 초과한 경우는 없었다. 해조류의 평균 수은 함량은 12.7 µg/kg이었으며, 종류별 함량의 큰 차이는 보이지 않았지만 다시마에서 다소 높게 검출되었다. 갑각류의 평균 수은 함량은 61.3 µg/kg이었다. 수은함량은 바닷가재, 게, 새우 순으로 높았으며, 최대 함량은 게의 431.0 µg/kg으로 500 µg/kg 미만이었다. 연체류의 평균 수은 함량은 17.1 µg/kg이었다. 오징어에서 평

Table 4. Daily dietary exposure and risk of mercury by food intake

Food	Daily intake (µg Hg/day)			% of PTWI*			
	Mean	P50	P95	Mean	P50	P95	
Agricultural products	Cereal grains	0.73	0.44	2.45	2.3	1.4	7.8
	Legume	0.01	0.00	0.06	0.04	0.0	0.2
	Tuber	0.05	0.00	0.18	0.2	0.0	0.6
	Vegetables	0.04	0.01	0.16	0.1	0.03	0.5
	Fruits	0.01	0.01	0.05	0.04	0.02	0.2
	Vegetable oil	0.003	0.0003	0.01	0.008	0.001	0.04
	Mushrooms	0.03	0.0003	0.20	0.1	0.001	0.6
	Sum	0.88			2.8		
Meat	0.13	0.02	0.62	0.4	0.06	2.0	
Fish/shell	Fish	2.80	0.13	10.34	8.9	0.4	32.9
	Shellfish	0.06	0.004	0.23	0.2	0.01	0.7
	Sum	2.87			9.1		
Seaweed	0.02	0.00	0.13	0.1	0.0	0.4	
Sea food	Crustacea	0.07	0.001	0.05	0.2	0.002	0.2
	Mollusks	0.11	0.00003	0.57	0.3	0.0001	1.8
	Echinodermata & Chordata	0.002	0.00001	0.00005	0.005	0.00004	0.0002
	Sum	0.18			0.6		
Tea	0.01	0.0004	0.03	0.02	0.001	0.1	
Kimchi	0.09	0.04	0.34	0.3	0.1	1.1	
Alcoholic Bev.	0.04	0.00	0.11	0.1	0.0	0.3	
Ginseng	0.0001	0.000006	0.000009	0.004	0.00002	0.00003	
Processed food	0.18	0.05	0.64	0.6	0.1	2.0	
All food	4.29	1.80	12.48	13.6	5.7	39.7	

*Provisional tolerable weekly intake

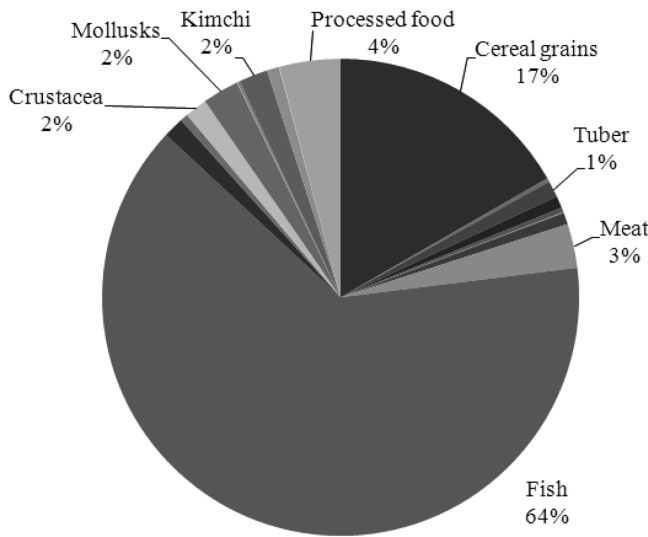


Fig. 2. Contribution ratio of dietary exposure to mercury of general population.

균 수은함량이 가장 높았으며 모두 평균 50 µg/kg 이하이었다. 연체류의 수은 기준치 500 µg/kg을 초과한 경우는 없었다. 곡피·척색류의 평균 수은 함량은 9.3 µg/kg이었다. 곡피류의 평균 수은 함량은 2.1 µg/kg으로 척색류 평균 수은 함량 13.5 µg/kg보다 낮았다. 곡피·척색류에 대해 설정된 수은 기준은 없지만, 수산물(어패류)의 수은 기준치 500 µg/kg을 초과한 경우는 없었다. 다류의 평균 수은 함량은 3.7 µg/kg, 김치류의 평균 수은 함량은 1.0 µg/kg으로 매우 낮은 수준이었다. 주류의 평균 수은 함량은 0.7 µg/kg으로 무시할 수준으로 낮은 함량을 보였다. 인삼류의 평균 수은 함량은 2.4 µg/kg으로 인삼, 홍삼보다는 인삼차과립, 홍삼추출액 등의 수은 함량이 다소 낮았다. 가공식품의 평균 수은 함량은 4.4 µg/kg으로 낮은 함량을 보였다. 소금의 경우 평균 함량이 7.6 µg/kg이었으며 수은 기준치 100 µg/kg을 초과한 경우는 3건으로 초과율은 1.4%이었다. 3건의 수은 함량은 225, 250, 277.5 µg/kg이었으며 이를 제외한 경우 최대 함량은 22.5 µg/kg, 평균 함량은 3.7 µg/kg으로 평균 함량이 1/2 감소하였다.

한국인의 수은 노출 및 위해수준

전체식품을 통한 수은 섭취량은 4.29 µg/day으로 PTWI 대비 13.6% 수준이었다. 극단(P95) 섭취량은 12.48 µg/day로 PTWI 대비 39.7% 수준이었다(Table 4). 따라서, 우리나라 국민의 식품을 통한 수은 섭취수준은 위해우려가 낮은 안전한 수준이었다. 식품별 수은 노출 기여율을 살펴보면, 어패류가 전체 수은 섭취량의 66.8%를 차지하였고 농산물 중 곡류가 17.1%로 그 뒤를 이었다(Fig. 2). 어패류는 수은 함량 및 섭취량이 다른 식품에 비해 높았기에 가장 높은 수은 섭취 기여율을 보였으며 곡류는 우리나라 국민이 가장 많이 섭취하는 쌀의 섭취량이 반영되었기에 수은 함량은 낮더라도 수은 섭취 기여율이 높게 나왔다.

쌀을 통한 수은 섭취수준은 곡류 전체의 97.4%로 대부분을 차지하였으며, 어류 중 수은 섭취기여율이 가장 높은 품목은 새치, 다랑어, 장어, 참치통조림으로 각각 25.0, 24.7, 6.6, 4.6%이었다. 새치, 다랑어는 수은함량이 높았기 때문이고 장어와 참치통조림은 섭취량이 높았기 때문이었다. 새치, 다랑어는 수은함량이 높은 것으로 잘 알려져 있으며 기준적용시 총 수은이 아닌 메틸수은 1.0 mg/kg으로 관리되고 있다.

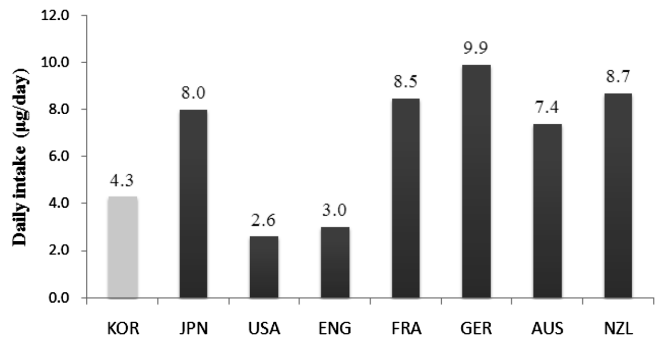


Fig. 3. Comparison of daily dietary exposure to mercury in countries.

한편, 지금까지 보고된 제외국의 평균 수은 섭취수준은 미국 2.6 µg/day(14), 영국 3.0 µg/day(15), 일본 8.0 µg/day(16), 프랑스 8.5 µg/day(15), 독일 9.9 µg/day(15), 호주 7.4 µg/day(17), 뉴질랜드 8.7 µg/day(18) 이었다(Fig. 3).

위해평가의 제한요소 및 불확실성

식품의 중금속 함량을 판단하기 위해 대단위 조사가 이루어져야 하지만, 일부 식품의 중금속 함량 실태조사 건수가 제한적으로 이루어졌기 때문에 식품 중 중금속 함량이 과소 또는 과대평가될 가능성이 있다. 24시간 회상법에 의해 조사된 식품 소비자료에 기초한 일일 식품소비량은 긴 기간(일생)동안 평균적으로 섭취한 식품의 1일 소비량보다 높을 수 있는 문제점을 가지고 있으며, 집단의 평균 섭취량을 산출하는 데는 큰 무리가 없지만, 집단의 섭취량 분포를 추정하거나 개인의 일상적인 섭취량을 가능하기에는 제한점이 있다. 우리나라 국민이 섭취하는 모든 식품에 대한 중금속 함량 분석 및 위해평가가 이루어지지 않았기 때문에 실제 우리나라 국민의 중금속 노출량 및 위해수준은 본 결과보다 다소 높을 가능성이 있다.

요 약

국내 식품의 수은 함량 실태를 검토하여 우리나라 국민의 중금속 노출수준에 따른 안전성을 평가하고자 하였다. 우리나라 국민 전체의 중금속 노출수준을 파악하기 위하여 Monte-Carlo simulation에 기반을 둔 확률론적(probabilistic) 위해평가를 실시하였다. 노출평가를 통해 추정된 인구집단의 식이를 통한 중금속 노출량으로부터 JECFA에서 제시한 PTWI 대비 위해도(%)를 산출하여 노출수준의 위해정도를 확인하였다. 본 연구에서 중금속 안전성 평가를 위한 대상 식품 선정은 식품의약품안전청에서 2000년대에 수행한 중금속 관련 연구과제 중 중금속 함량 원시자료가 확보된 178 식품 품목, 17,965건에 대하여 실시하였다. 식품 섭취량 및 체중은 질병관리본부에서 발간한 ‘국민건강영양조사 4기 2차년도(2008년)’ 자료를 활용하였다. 수은 함량은 농산물이 0.115(과실류)-45.448(버섯류) µg/kg이었고 육류는 3.723 µg/kg, 수산물은 9.344(곡피·척색류)-194.914(어류) µg/kg, 가공식품에는 0.680(주류)-4.412(가공식품) µg/kg이었다. 식품을 통한 수은 섭취량은 4.29 µg/day으로 PTWI 대비 13.6% 수준이었으며, 극단(P95) 섭취량은 12.48 µg/day로 PTWI 대비 39.7% 수준이었다. 따라서, 우리나라 국민의 식이를 통한 수은 노출은 위해우려가 낮은 수준이었으며 이는 제외국과 유사하거나 낮은 수준이었다.

문헌

1. Lee C, Cho SD, Chang DS, Shin DH, Oh DH, Whang IK, Kwon KS, Woo GJ, Chun HS, Oh SS, Kim GH. Food safety guidelines for consumer. *Safe Food 1*: 31-43 (2006)
2. FAO/UNEP. Decision Guidance Documents; Mercury compounds. In: Joint FAO/UNEP Programme for the Operation of Prior Informed Consent. Food and Agriculture Organization of the United Nations/United Nations Environment Programme, Rome-Geneva 1991; amended 1996 (1996)
3. International Programme on Chemical Safety. Methylmercury (Environmental Health Criteria 101). World Health Organization, Geneva, Switzerland (1990)
4. KFDA. Series of Hazard compounds- 21. What is methylmercury in food?, Korea Food & Drug Administration, Seoul, Korea (2007)
5. WHO. Dietary exposure assessment of chemicals in food. pp. 16-44. In: Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food. World Health Organization, Geneva, Switzerland (2008)
6. WHO. Risk Characterization. pp. 9-10. In: Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food. World Health Organization, Geneva, Switzerland (2008)
7. JECFA. Summary report of the 72nd meeting of JECFA (JECFA/72/SC). Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (2010)
8. DeStefano AJ, Zaidi K, Cecil TL, Giancaspro GI. The USP Elemental impurities advisory panel. Elemental impurities-information. *Pharmacopeial Forum* 36: 2-9 (2010)
9. Korea Centers for Disease Control & Prevention. Korea Health Statistics 2008: Korea National Health and Nutrition Examination Survey. Ministry of Health and Welfare, Seoul, Korea (2008)
10. Ministry of Government Legislation. Food sanitation law, enforcement ordinance, presidential decree 21847, revised 2009.11.26, a date of enforcement 2009.11.28. (2009)
11. WHO. Major element for exposure assessment of contaminants and toxins in food. ANNEX4 In: Joint FAO/WHO Workshop on Methodology for Exposure Assessment of Contaminants and Toxins in Food (WHO/SDE/PHE/FOS/00.5). June 7-8, World Health Organization, Geneva, Switzerland (2000)
12. Flynn MR. The beta distribution- a physically consistent model for human exposure to airborne contaminants. *Stoch. Env. Res. Risk A*. 18: 306-308 (2004)
13. Choi DW. Dietary intake and risk assessment of contaminants in Korean foods. The annual report of KFDA, Korea Food & Drug Administration, Seoul, Korea. pp. 131-139 (2008)
14. Egan SK, Tao SSH, Pennington JAT, Bolger PM. US Food and Drug Administration's total diet study: Intake of nutritional and toxic elements, 1991-96. *Food Addit. Contam.* 19: 103-125 (2002)
15. SCOOP(Scientific Cooperation), Assessment of the dietary exposure to arsenic, cadmium, lead, and mercury of the population of the EU Member States. Report of experts participating in Task 3.2.11., Directorate-General Health and Consumer Protection, Brussels, Belgium (2004)
16. MAFF. *Syokuyuhing Angjaengni ganseureu riseukeu peuropail siteu* (Risk profile sheet for food safety): Methylmercury. Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Tokyo, Japan (2009)
17. FSANZ. The 20th Australian Total Diet Survey: A total diet survey of pesticides residues and contaminants. Food Standards Australia New Zealand, Canberra BC, Australia (2003)
18. NZFSA. 2003/04 New Zealand Total Diet Survey: Agricultural compound residues, selected contaminants and nutrients. New Zealand Food Safety Authority, Wellington, New Zealand (2005)