pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 38, No. 3, pp. 158~163 (2023)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2023.38.3.158

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

심해성 어류의 수은, 메틸수은 및 셀레늄 함량

조윤식* · 황선일 · 신상운 · 김현주 · 이지연 · 송지원 · 김정은 · 이병훈 · 모아라 · 박명기
경기도보건환경연구원 농수산물안전성검사팀

Contents of Mercury, Methylmercury, and Selenium in Deep-Sea Fishes

Yun-Sik Cho*, Seon-Il Hwang, Sang-Woon Shin, Hyun-Ju Kim, Ji-Yeon Lee, Ji-Won Song, Jeong-Eun Kim, Byoung-Hoon Lee, A-Ra Mo, Myeong-Ki Park
Agricultural and Fishery Products Safety Inspection Team, Suwon, Korea

(Received March 22, 2023/Revised May 2, 2023/Accepted May 10, 2023)

ABSTRACT - This study aimed to determine mercury (Hg), methylmercury (MeHg), and selenium (Se) levels in deep-sea fishes distributed in Gyeonggi-do, South Korea. Concentrations of Hg, MeHg, and Se were measured by using a mercury analyzer and Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS). The average content (mg/kg) in the seafood samples was as follows: Hg, 0.7647 (0.0182–5.3620), MeHg, 0.0764 (0.0096–0.8750), and Se, 0.4728 (0.1075–3.5100). All the levels of MeHg were below the recommended standards of the Ministry of Food and Drug Safety i.e., <1.0 mg/kg. Recent studies have shown that Se prevents Hg toxicity. The average daily intake in humans was 3.3 μg/kg, which was lower than the recommended amount (50–200 μg/person/day). The weekly intake of Hg and MeHg was calculated to be 6.07% and 1.90%, respectively, of the provisional tolerable weekly intake (PTWI). This study showed that the weekly intake of Hg and MeHg from abyssal fish was less than the PTWI recommended by the Joint FAO/WHO expert committee on food additives. Therefore, the levels reported in this study are presumed to be adequately safe.

Key words: Mercury, Methylmercury, Selenium, Deep-sea fish

바다에 서식하는 수산물에는 인체에 필요한 단백질, 지방, 미네랄 등의 영양성분은 물론 다양한 기능성 물질들이 함유되어 있다. 하지만 소비량의 증가로 인한 수산물 수입국의 확대 및 수입량 증가로 수산물 안전성에 대한 중요성도 크게 부각되고 있다[1]. 한번 체내에 들어온 중금속은 쉽게 분해되거나 제거되지 않고 축적되어 직접적인 독성뿐 아니라 만성적으로 내분비계를 교란시키는 작용을 하는 것으로 알려지면서 국내에서도 농산물, 수산물 등을 대상으로 지속적으로 모니터링을 수행하고 있다. 국내 수산물의 기준규격은 납(Pb), 카드뮴(Cd), 수은(Hg) 등의 위해 중금속 위주로 관리되고 있으며 2006년에 심해성 어류에 대한 메틸수은 기준규격이 신설되었다[2]. 심해성 어류는 태양광선이 도달하지 않는 수심 200 m 이상의 심해에 서식하는 어류를 말하며, 대표적으로 다랑어류, 상어류, 새치류 등이 있다.

수은은 상온에서 액체 상태로 존재하는 유일한 금속으로 물리·화학적 특성에 따라 원소수은, 무기수은, 유기수은으로 구분되며, 해양환경 중에 존재하는 대부분의 수은은 무기형태이다. 이러한 무기수은은 토양과 퇴적물 내 미생물의 활동으로 유기형태인 메틸수은으로 전환되기도 하며, 전환된 메틸수은은 다시 광화학 반응에 의해 디메틸화를 통하여 무기수은으로 변환되기도 한다[3]. 하지만 심해성 어류의 경우 태양광선이 닿지 않는 심해에서 주로 생활하며, 환경으로 배출된 유기수은이 먹이사슬을 거치면서 농축되기 때문에 다른 어종에 비하여 많은 메틸수은이 축적되게 된다[4,5].

메틸수은은 체내 축적시 뇌, 간, 신장에 축적되며 신장에서 가장 높은 농도를 나타내는 물질로 알려져 있다[6-8]. 대표적인 환경오염 사건인 미나마타병은 인간에게서 메틸수은의 중독성이 처음 보고된 환경오염 사건으로 1950년

*Correspondence to: Yun-Sik Cho, Agricultural and Fishery Products Safety Inspection Team, Gyeinggi-Do Institute of Health and Environment, Suwon 16381, Korea
Tel: +82-31-8008-9803, Fax: +82-31-294-4602
E-mail: cyun0030@gg.go.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution,and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대 일본 미나마타의 공장에서 배출된 폐수에 함유된 수은에 의해 오염된 어류의 섭취가 직접적 원인이 되어 질병을 일으킬 수 있음을 확인시켜준 사건이다.

메틸수은의 규제동향을 살펴보면 국내에서는 심해성 어류에 대한 규격으로 2006년 1.0 mg/kg 이하로 식품공전상 기준규격을 신설하고 2009년 12월 1일부터 시행하여 관리를 강화하고 있다[9]. 국제적으로는 Food and Agriculture Organization (FAO)/World Health Organization (WHO)의 국제식품규격위원회(Codex Alimentarius Commission, 이하 Codex)에서는 포식성 어류의 메틸수은 가이드라인 수준을 1.0 mg/kg, 일반어류는 0.5 mg/kg으로 설정하고 있으며, 미국식품의약품청(Food and Drug Administration, 이하 FDA)에서는 어류 중 메틸수은의 action level을 1.0 mg/kg (wet wt)로 설정하여 관리하고 있다. 일본의 경우 심해성 어류를 제외한 어류 중 수은 함량을 0.4 mg/kg (wet wt) 이하로 정하고 있으며, 수은함량이 0.4 mg/kg을 초과한 어류는 메틸수은 기준 0.3 mg/kg을 재적용하여 적부를 판정하고 있다. 유럽연합은 포식성 어류를 제외한 일반어류 중 수은 함량을 0.5 mg/kg, 포식성 어류는 1.0 mg/kg으로 기준을 정하고 있다[10-14].

일생동안 식이섭취로 인해 인체에 축적되어도 안전한 수준을 1주간의 섭취수준으로 표기하고 있는 잠정주간섭취량(Provisional Tolerable Weekly Intake, 이하 PTWI)[13]은 체내에서 축적과 대사기능에 의한 제거능력간 균형이 고려된 개념으로 중금속과 같이 체내축적이 유발되는 물질에 적용한다. 합동 식품첨가물 전문가위원회(The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, 이하 JECFA)에서는 다랑어류 등 메틸수은의 함량이 높은 어류의 섭취량이 증가함에 따라 2003년 메틸수은의 PTWI를 3.3 μg/kg b.w./week에서 1.6 μg/kg b.w./week로[14], 2010년 총수은의 PTWI를 5 μg/kg b.w./week에서 4 μg/kg b.w./week로 하향 조정하였다[15].

2020년 국민건강영양조사에 따르면 우리나라 다랑어류 및 새치류의 1일 평균 섭취량은 3.8 g으로 참치 등 가공식품의 주원료인 가다랑어 및 회덮밥에 많이 사용되는 새치류의 섭취량 증가로 꾸준한 증가추세를 나타내고 있다[16,17].

셀레늄(Se)은 신체의 면역체계 유지는 물론 항산화 물질로서의 기능을 하는 필수적인 미네랄 성분으로 소량의 섭취만으로 기능을 발휘하나 장기간 다량 섭취할 경우 간장장애, 신장장애 등 역효과를 나타내므로 적정량 섭취가 중요하다. 이러한 셀레늄은 체내에 들어온 메틸수은과 결합하여 독성을 감소시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 생체내에 들어온 메틸수은은 셀레늄화합물인 serenonein과 결합하여 셀레늄/수은 복합체가 형성되어 세포 외 및 체외로 배출되는 해독기구경로를 통해 혈액을 통해 소변으로 배설되는 것으로 추정되고 있다. WHO에서는 셀레늄(Se) 섭취권장량을 성인기준으로 50-200 μg/person/day로 규정하고 있다[18,19].

본 연구에서는 경기도 내에서 유통되는 심해성 어류를 대상으로 유해물질인 수은 및 메틸수은과 함께 미량영양성분인 셀레늄의 함량에 대한 조사를 실시하고자 하였다.

Materials and Methods

시료

본 연구과제에 사용된 시료는 2022년 3월부터 11월까지 경기도내 4대 농수산물도매시장(구리, 안양, 안산, 수원) 및 대형마트에서 판매, 유통되고 있는 다랑어류 24건, 새치류 8건, 그 외 심해성 어류(돔배기 5건, 붉평치 2건, 은대구 3건, 적어 4건, 다금바리 4건) 등 총 50건을 직접 수거하여 분석하였다. 대부분 소비가 흔하게 이뤄지는 품종이 아니므로 유통량이 많은 어종 및 판매가 이루어지고 있는 어종을 대상으로 수거하였다. 시료로 수거된 검체는 균질기에서 균질화하여 -20°C에서 보관하며 분석 시료로 사용하였다.

시약 및 표준용액

수은 분석을 위한 표준용액은 mercury Inductively Coupled Plasma (ICP) standard (Merck, Darmstadt, Germany)를 0.01% L-cysteine (Sigma-Aldrich, St.Louis, MO, USA) 용액으로 0.1 μg/mL가 되게 희석하여 사용하였다. 메틸수은 분석에 사용된 표준원액은 methylmercury chloride (Sigma-Aldrich) 0.1252 g을 L-cysteine 용액 100 mL에 녹여 1,000 mg/L로 제조하였고, 표준용액은 동일한 L-cysteine 용액에 표준원액을 녹여 적당한 농도로 희석하여 사용하였다. 추출용매로 사용한 L-cysteine 용액은 L-cysteine 1.0 g, Sodium acetate (Sigma-Aldrich) 0.8 g, Sodium sulfate anhydrous (Sigma-Aldrich) 12.5 g을 증류수 100 mL에 교반하면서 용해시켜 표준원액 및 표준용액 조제시 사용하였고, 전처리에는 분석시 마다 제조하여 사용하였다. 염산 용액은 hydrochloric acid (Sigma-Aldrich)와 증류수를 3:1의 비율로 제조하여 사용하였다. 셀레늄 분석을 위한 표준용액은 Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS) Calibration Standard2 (AccuStandard, New Haven, CT, USA)를 증류수로 희석하여 사용하였다. 질산을(Chemitop, Jincheon, Korea) 사용하여 분해 및 추출하였으며, 증류수기는(LabTower EDI 15, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany) 저항값을 확인하여(18.2 MΩ ± 0.2) 내부점검 기준에 의해 이상이 없음을 확인한 후 사용하였다.

시료의 전처리

수은 및 메틸수은

수은은 식품공전 제8. 일반시험법 9. 식품 중 유해물질 시험법의 9.1.6 수은(Hg)에 따라 시료를 균질화 한 후 일

정량을 취하여 시험용액으로 하였다.

메틸수은 분석을 위한 전처리 방법은 식품공전 제8. 일반시험법 9. 식품 중 유해물질 시험법 9.1.7 메틸수은(Methyl mercury) 중 9.1.7.2 제2법에 따라 실시하였다. 균질화한 시료 약 1 g을 50 mL 원심분리관에 넣고 25 % 염화나트륨 용액 10 mL를 첨가하여 2분간 진탕한 후, 진한 염산(Sigma-Aldrich) 4 mL, toluene (Sigma-Aldrich) 15 mL 첨가하여 2분간 강하게 흔들어서 추출한 뒤, 3,000 G에서 20분간 원심분리기 (1236MGR, GYROZEN Co., Daejeon, Korea)로 원심분리하여 toluene층을 125 mL 분액깔대기에 옮겼다(단, 거품이 발생할 경우에는 1 mL의 isopropanol을 첨가하여 진탕한 후 다시 원심분리한다). 여기에 L-cysteine 용액 5 mL를 첨가하여 진탕기 (MMV-1000W, EYELA, Tokyo, Japan)로 10분간 강하게 진탕 후 10분간 방치하고 하층인 L-시스테인층을 분취하여 시험용액으로 하였다.

셀레늄

셀레늄은 식품공전 제9. 일반시험법 9.1.10 기타금속에 등재된 마이크로웨이브법에 따라 균질화된 시료 약 0.5 g을 취하여 질산 4 mL를 가하여 Microwave (Multiwave7000, Anton paar, Graz, Austria)로 Table 1과 같은 조건으로 분해한 후, 적절한 농도가 되도록 희석하여 시험용액으로 하였다.

기기분석

수은과 메틸수은 분석은 가열기화 금아말감법의 원리로 분석을 하는 수은분석기(MA-3000, Nippon Instruments Corporation, Tokyo, Japan)를 사용하여 측정하였으며, 수은은 150°C에서 60초, 180°C에서 120초로 시료 건조 후, 850°C에서 120초 분해 및 아말감화를 조건으로 하여 분석하였다. 메틸수은은 300°C에서 60초 시료 건조, 850°C에서 180초 분해, 600°C에서 60초 기폭 후 600°C에서 15초 아말감화를 조건으로 하여 분석하였다.

셀레늄은 ICP-MS (Nexion 300D, PerkinElmer, Waltham, MD, USA)를 이용하여 측정하였으며, 분석 조건은 Table 2와 같다.

Table 1. Analytical condition of microwave system

Parameters		Conditions
Estimated sample weight		0.5 g
Starting pressure		40 bar
Pressure		140 bar
Step time	Step 1	25-250°C, 20 min
	Step 2	250°C, 10 min
Cooling temperature		80°C
Pressure release rate		10 bar/min

Table 2. Analytical condition of ICP-MS

Parameters	Conditions
RF Power	1600 Watt
Aux. gas	1.2 L/min as Argon
Neb. gas	1.02 L/min as Argon
Pulse stage voltage	900 V
Mass	Se
(*m/z*)	81.917

통계적 분석 및 위해성 평가

식품별 주간섭취량(일일섭취량×7)은 한국농촌경제연구원에서 발표한 2019년도 식품수급표에서 일일 평균섭취량을 바탕으로 산출하였다. 위해도 평가는 식품별 주간섭취량과 중금속 함량의 평균값을 곱한 후, JFCFA에서 설정한 중금속 주간잠정섭취허용량(PTWI)으로 나눈뒤 100을 곱하여, 위해도(%)로 나타내었다.

Results and Discussion

유효성 검증

수은은 표준용액의 농도범위 0.002 mg/kg에서 10 mg/kg까지, 염화메틸수은 표준용액은 0.002 mg/kg에서 0.01 mg/kg 범위까지, 셀레늄 표준용액은 0.0433 μg/kg에서 2.5002 μg/kg 범위까지 검량선을 각각 작성하여 직선성(Linearity)을 확인하였으며 평균 0.99 이상의 결정계수(R^2)값을 나타내었다.

회수율은 수은과 메틸수은은 최종농도가 0.1 mg/kg이 되도록 시료에 첨가하여 측정하였으며, 셀레늄은 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)에서 구입한 표준인증물질(certified reference material, CRM)을 이용하여 3회 반복 측정하여 구하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

항목별 검출 특성

본 실험에 사용된 심해성 어류에서 수은의 함량(평균±표준오차(최소값-최대값), mg/kg)은 다랑어류 0.3690±0.0523 (0.0329-0.9204), 새치류 2.1350±0.5540(0.6408-5.3620), 그 외 어류 0.6960±0.3106(0.0182-4.8623)로 나타났다. 평균값과 최대값 모두 새치류가 가장 높았으며, 전체평균값은 1.0667 mg/kg으로 나타났다.

메틸수은의 함량(평균±표준오차(최소값-최대값), mg/kg)은 다랑어류 0.0488±0.0570(0.0133-0.1138), 새치류 0.1716±0.0944(0.0237-0.8750), 그 외 어류 0.0758±0.0238(0.0096-0.4078)로 나타났다. 평균값과 최대값 모두 새치류가 가장 높았으며, 전체평균값은 0.0987 mg/kg로 식품공전 설정기준(1.0 mg/kg) 이하의 수치였다.

Table 3. Verification of mercury (Hg), methyl mercury (MeHg) and selenium (Se)

Compound	Linearity (R^2)	Average (Mean±RSD)		
		Recovery	Detection limits (mg/kg)	Quantification limits (mg/kg)
Hg	0.999	114.5±4.5	0.0004	0.0013
MeHg	0.998	99.9±2.8	0.0002	0.0007
Se	0.999	99.7±5.1	0.00003	0.0001

Table 4. Levels of heavy metals and selenium in abyssal fish (unit: mg/kg)

Name	Sample number	mercury (Hg) Mean±SE (min-max)	methyl mercury (MeHg) Mean±SE (min-max)	selenium (Se) Mean±SE (min-max)
Tuna	24	0.3690±0.0523 (0.0329-0.9204)	0.0488±0.0570 (0.0133-0.1138)	0.5960±0.1252 (0.2169-1.7526)
Billfish	8	2.1350±0.5540 (0.6408-5.3620)	0.1716±0.0944 (0.0237-0.8750)	0.8974±0.3662 (0.2232-3.5100)
Abyssal fish (except tuna, billfish)	18	0.6960±0.3106 (0.0182-4.8623)	0.0758±0.0238 (0.0096-0.4078)	0.2312±0.0201 (0.1075-0.4503)
Total	50	0.7647±0.1693 (0.0182-5.3620)	0.0764±0.0187 (0.0096-0.8750)	0.4728±0.0738 (0.1075-3.5100)

Table 5. The estimated weekly intake of mercury(Hg), methyl mercury(MeHg) and selenium(Se)

Name	Daily food intake (g/day)	Weekly food intake (g/week)	Estimated weekly intake[1] of (μg/kg b.w[2]./week)			
			Hg	MeHg	Se	se (μg)[3]
Tuna	5.32	37.24	0.2065	0.0273	0.3335	22.2
Billfish	0.10	0.70	0.0225	0.0018	0.0104	0.7

[1] [Mean content of mercury(or methylmercury, Selenium) in each food×daily food intake×7]/66.55(b.w.).
[2] b.w. : body weight (66.55 kg).
[3] [Estimated weekly intake of SE]×66.55 kg.

셀레늄의 경우 [평균±표준오차(최소값-최대값), mg/kg]은 다랑어류 0.5960±0.1252(0.2169-1.7526), 새치류 0.8974±0.3662(0.2232-3.5100), 그 외 어류 0.2312±0.0201(0.1075-0.4503)로 조사되었다.

국내 Kim 등[20]의 연구결과와 영국[21], 일본[22], 미국[23]의 연구결과에서 심해어류 수은 함량은 0.39-1.50 mg/kg, 다랑어류 0.24-0.4 mg/kg, 새치류 0.66-1.4 mg/kg로 보고되었고, 메틸수은 함량은 심해어류 0.20-0.90 mg/kg, 다랑어류 0.168-0.22 mg/kg, 새치류 0.149-0.96 mg/kg로 나타나 수은과 메틸수은이 새치류에서 가장 높은 함량을 나타내는 것은 유사한 결과였으나 조사결과에서 나타난 검출농도의 분포범위는 다양하여 어류의 크기 또는 대형어류의 경우 부위에 따른 개체특성과 상관성이 있을 것으로 판단된다.

메틸수은, 수은 및 셀레늄의 노출량 평가

심해성 어류 50건을 대상으로 수은, 메틸수은, 셀레늄의 함량을 측정한 결과 각각의 평균함량은 수은 0.7647 mg/kg, 메틸수은 0.0764 mg/kg, 셀레늄 0.4728 mg/kg으로 나타났다.

Table 6. The estimated weekly intake of Hg, MeHg, Se compared with PTWI by JECFA

Name	Estimated weekly intake of (μg/kg b.w./week)		% of PTWI[1] in	
	Hg	MeHg	Hg	MeHg
Tuna	0.2065	0.0273	5.163	1.706
Billfish	0.0225	0.0018	0.563	0.113

[1] The percentage of the PTWI set by JECFA.

상기결과를 바탕으로 노출량 산출을 위하여 국민건강보험공단 건강검진통계에 제공되어진 남자, 여자 평균체중을 바탕으로 전체 평균체중을 66.55 kg으로 산출하였으며, 분석대상 어류의 일일 평균섭취량은 2019년도 한국농촌경제연구원 식품수급표를 따랐다[24]. 심해성 어류의 경우 섭취를 거의 하지 않을 뿐만 아니라 일반적으로 구매하기도 쉽지 않은 어종들도 많이 포함되어 있어 소비량에 대한 통계를 얻을 수 있는 다랑어류, 새치류에 대하여 노출량

을 산출하였다. 본 연구결과와 위에서 산출된 분석대상 어류의 일일평균섭취량과 노출량을 바탕으로 JECFA에서 제시한 PTWI 대비 위해도(%)를 산출하였으며, 그 값은 Table 5, 6과 같이 나타났다. JECFA에서 설정한 메틸수은의 PTWI는 1.6 μg/kg b.w./week로 2종의 섭취량을 통해 산출한 총주간추정섭취량은 0.0291 μg/kg b.w./week이며, 메틸수은 PTWI에 대해 1.8%로 조사되었다. 수은의 PTWI는 4 μg/kg b.w./week이며, 총주간추정섭취량은 0.229 μg/kg b.w./week로 수은의 PTWI 대비 5.7%로 조사되었다.

식품의약품안전처 연구보고서에 따르면[25] 메틸수은의 경우 일반적으로 심해성 어류에서 수은함량대비 약 40% 정도로 보고 있지만, 어종의 종류와 크기에 따라서 90%까지 존재하는 경우도 있으며 본 연구에서는 0.7%에서 96.0%까지 분포하는 것으로 조사되었다.

그러나 심해성 어류에 대한 정확한 노출량 및 안전성을 평가하기 위해서는 전체 식품군에서 어종이 차지하는 비율과 수은섭취에 주로 기여하는 식품군도 함께 고려되어야 하며, 세분화된 어종별 일일 섭취량 및 지역별 섭취빈도 등 다양하고 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

셀레늄의 경우 총주간추정노출량은 0.3449 μg/kg b.w./week로 평균체중을 바탕으로 섭취량 환산시 3.3 μg/kg로 최소권장량 50 μg보다 낮은 수준으로 나타났다. 섭취량 평가 실시 결과 연구대상 어종으로부터의 섭취량은 권장량에 미치지 못하는 것으로 나타났지만, 이는 심해성 어류가 전체식단에서 차지하는 비율이 높지 않으며 개인의 식습관 및 지역에 따라 섭취량의 차이도 크기 때문에 올바른 식단을 통한 음식물 섭취에 대한 연구도 필요하다고 할 수 있다.

국문요약

본 연구에서는 경기도내 유통되고 있는 심해성 어류 50건을 대상으로 수은, 메틸수은의 오염도 및 셀레늄의 함량을 알아보았다. 금아말감법의 수은분석기, ICP-MS를 사용하여 측정하였으며 각 항목별 평균함량은 수은 0.7647 mg/kg (0.0182-5.3620), 메틸수은 0.0764 mg/kg (0.0096-0.8750), 셀레늄 0.4728 mg/kg(0.1075-3.5100)으로 메틸수은은 50건 모두 기준규격(1.0 mg/kg) 이하로 나타났다. 셀레늄은 수은과 결합하여 수은의 독성을 감소시키는 것으로 알려져 있으며, 본 연구과제에서는 일일평균섭취량이 3.3 μg/kg으로 일일권장량보다 낮은 수치였다. 유해물질인 수은과 메틸수은은 JECFA에서 설정한 PTWI의 5.7%, 1.8%로 조사되었다. 따라서 도내에서 유통되는 심해성 어류의 수은, 메틸수은과 같은 위해중금속은 안전한 것으로 나타났지만 지속적 모니터링이 필요하다고 판단된다.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

YunSik Cho https://orcid.org/0000-0001-7418-7291
SeonIl Hwang https://orcid.org/0000-0002-1097-7099
SangWoon Shin https://orcid.org/0000-0002-6414-5378
Hyunju Kim https://orcid.org/0009-0000-4987-6271
JiYeon Lee https://orcid.org/0000-0002-3795-3329
JiWon Song https://orcid.org/0000-0002-6069-7773
JeongEun Kim https://orcid.org/0000-0003-2768-0993
ByoungHoon Lee https://orcid.org/0000-0002-2554-0834
ARa Mo https://orcid.org/0000-0001-8239-5445
MyeongKi Park https://orcid.org/0000-0002-9056-5499

References

1. Mok, J.S., Shim, K.B., Cho, M.R., Lee, T.S., Kim, J.H., Contents of heavy metals in fishes from the Korean coasts. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, **38**, 517-524 (2009).
2. Ministry of Food and Drug Safety, 2015. Korean Food Code(2006-55), Cheongju, Korea.
3. Craig, P.J., 2003, Organometallic compounds in the environment, second ed, John Wiley&Sons, Hoboken, NJ, USA , pp. 32-38.
4. Mason, R.P., Reinfelder, J.R., Morel, F.M.M. Bioaccumulation of mercury and methylmercury. *Water Air Soil Poll.*, **80**, 915-921 (1995).
5. Jensen, S., Jernelov, A., Biological methylation of mercury in aquatic organisms. *Nature*, **223**, 753-754 (1969).
6. Ekno, S., Susa, M., Ninomiya, T., Imamura, K., Kitamura, T., Minamata disease revisited: An update on the acute and chronic manifestations of methylmercury poisoning. *J. Neurol. Sci.*, **262**, 131-144 (2007).
7. MercuryPoisoned.Com, (2023, January, 5). Protocol for safe removal of mercury. Retrieved from http://mercurypoisoned.com/protocol_iaomt.html
8. Clarkson, T.W., Magos, L., Myers, G.J., The toxicology of mercury- current exposures and clinical manifestations. *New Engl. J. Med.*, **349**, 1731-1737 (2003).
9. MFDS, (2023, February, 5). Food Code. Retrieved from https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/
10. Codex Alimentarius Commission, 1991, Guideline levels for methylmercury in fish(CAC/GL 7-1991). Rome. Italy.
11. Food and Drug Administration, (2023, January 20). Fish, shellfish, crustaceans and other aquatic animals-fresh, frozen or processed methylmercury. Retrieved from https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/cpg-sec-540600-fish-shellfish-crustaceans-and-other-aquatic-animals-fresh-frozen-or-processed-methyl
12. USDA,(2023, January 3). 2018 FAIRS Annual Country

Report. Retrieved from https://apps.fas.usda.gov/newgain-api/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Food%20and%20Agricultural%20Import%20Regulations%20and%20Standards%20Report_Tokyo_Japan_2-5-2019.pdf
13. Official Journal of the European Union, (2023, March 2). Commission Regulation (EC) No 1881/2006 Settiing maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:EN:PDF
14. National Institute of Food and Drug Safety Evalution, 2017. A comparative study on the methylmercury analysis method in fish. Seoul, Korea.
15. JECFA, (2023, January 15). Joint FAO/WHO expert committee on food additives(seventy-second meeting). Retrieved from https://www.fao.org/3/at868e/at868e.pdf
16. KDCA, National health statistics, Korea National Health and Nutrition Examination Survey, **8**, 1-326 (2020).
17. Kim, J.A., Yuk, D.H., Park, Y.A., Choi, H.J., Kim, Y.C., Kim, M.S. A study on total mercury and methylmercury in commercial tuna, billfish, and deep-sea fish Seoul Metropolitan City. *Korean J. Food Sci. Technol*., **45**, 376-381 (2013).
18. Yamashita Y., Yamashita, M., Ilda, H., Selenium content in seafood in Japan. Nutrients., **5**, 388-395 (2013).
19. Korea Institute of Science and Technology Information, 2012. Methylmercury and selenium in fish. Seoul. Korea.
20. Kim, H.Y., Chung, S.Y., Sho, Y.S., Oh, G.S., Park, S.S., Suh, J.H., Lee, E.J., Lee, Y.D., Choi, W.J., Eom, J.Y., Song, M.S., Lee, J.O., W, G. J., The study on the methylmercury analysis and the monitoring of total mercury and methylmercury. *Korean J. Food Sci. Technol*., **37**, 882-888 (2005).
21. Knowles, T.G., Farrington D., Kestin, S.C., Mercury in UK imported fish and shellfish and UK-farmed fish and their products. *Food Addit. Contam*., **20**, 813-818. (2003).
22. The Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan., (2023, February. 10). Annual report on the developments in Japan's fisheries in FY2002. Retrieved from https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/pdf/wp_2002.pdf
23. Food and Drug Administration, (2023, January 20). Mercury in food and dietary supplements. Retrieved from https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/mercuryfood-and-dietary-supplements
24. KREI, (2023, January 2). A food supply and demand table. Retrieved from https://library.krei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/b74eec78-18de-4e29-9ee8-0eec16a8bcc5
25. NIFDS, (2023, January 10). Risk assessment of mercury and methylmercury. Retrieved from https://www.nifds.go.kr/brd/m_271/view.do?seq=10142
26. Dabeka, R., McKenzie, A.D., Forsyth, D.S., Conacher, H.B.S., Survey of total mercury in some edible fish and shellfish species collected in Canada in 2002. *Food Addit. Contam*., **21**, 434-440. (2004).
27. Joo, H.J., Noh, M.J., Yoo, J.H., Jang, Y.M., Park, J.S., Kang, M.H., Kim, M.H., Monitoring total mercury and methylmercury in commonly consumed aquatic foods. *Korean J. Food Sci. Technol*., **42**, 269-276. (2010).
28. MFDS, 2019. Standard manual for hazardous evaluation of hazardous substance in food, Jinhan M&B, Korea, pp. 1-184.