

한국산 수산물의 총 수은 및 메틸수은 농도 및 위해도 평가

최민규* · 윤세라 · 박혜정 · 이자연 · 이인석 · 황동운 · 윤민철¹ · 최우석¹

국립수산과학원 기반연구부 어장환경과, ¹국립수산과학원 식품위생가공과

Concentrations and Risk Assessment of Total Mercury and Methyl Mercury in Commercial Marine Fisheries from Korea

Minkyu Choi*, Sera Yun, Hye-Jung Park, Ja-Yeon Lee, In-Seok Lee, Dong-Woon Hwang, Min-Cheol Yoon¹ and Woo Seok Choi¹

Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

¹Food Safety and Processing Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

Total mercury (T-Hg) and methyl mercury (MeHg) were determined in marine fisheries (41 species, n=87) commonly consumed in Korea, using a gold amalgamation method and gas chromatography-cold vapor atomic fluorescent spectroscopy, respectively. Concentrations of T-Hg and MeHg in all samples (31 fish, 4 crustaceans, 4 cephalopods, and 2 gastropod species) were in the range of 0.016-0.495 (mean, 0.093) mg/kg-wet and not detected-0.338 (mean, 0.067) mg/kg-wet, respectively. The concentrations of MeHg in marine fisheries were significantly correlated with T-Hg concentrations ($P<0.001$). The highest mean concentrations of T-Hg and MeHg were found in fish species, followed by crustaceans. The contribution of MeHg to T-Hg was in the range of 64-95% (mean, 83%) in cephalopods, 28-98% (mean, 69%) in fish, and 26-88% (mean, 57%) in crustaceans. The weekly intakes of T-Hg and MeHg by fisheries consumption for the Korean general population were estimated to be 0.463 and 0.338 $\mu\text{g}/\text{kg}$ body weight/week, respectively. The concentrations and intakes of T-Hg and MeHg were less than the allowable residue levels and in the range of 12 to 17% of the provisional tolerable weekly intake (PTWI) applied in Korea.

Key words: Heavy metal, Fish, PTWI, Risk assessment

서론

수은(mercury)은 환경 중 잔류성, 장거리 이동성, 독성이 있는 오염물질로, 화학적 산화도에 따라 원소수은(elementary mercury), 무기수은(inorganic mercury), 유기수은(organic mercury)으로 분류된다. 대기 중에 배출된 수은은 가스상태로 대기권에서 장거리 이동 후 수계로 침적·유입되고, 무기수은은 퇴적물에서 미생물의 메틸화과정을 통해 유기수은, 즉 메틸수은(methyl mercury)으로 바뀐다. 이 유기수은은 먹이사슬(food chain)을 통해 상위생물에 축적되어 최종적으로 생태계 및 인간에게 축적되어 악영향을 미친다(Choi et al., 2012). 수은은 주로 수산물 섭취를 통해 인체로 들어오는데, 메틸수은으로 대표되는 유기수은은 인체 노출시 중추신경장애, 신장, 간 등에 심각한 질병을 일으킨다(Kim and Zoh, 2013). 체내에 들어온 메틸

수은은 혈액뇌장벽(blood brain barrier)과 태반장벽(placental barrier)을 통과할 수 있기 때문에 뇌에 축적되기 쉬우며, 임신기간 동안 노출시 태아에게 치명적인 영향을 줄 수 있고, 장기노출시 신장기능 저하, 구강염증, 신경계 영향 등을 초래한다(Kim and Zoh, 2013). 또한, 메틸수은 화합물은 1993년 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer; IARC)에 의해 발암물질로도 분류되어 있다.

수은의 환경배출은 인체는 물론 생태계 전반에 위해하므로 유엔환경계획(UNEP, United Nations Environment Programme)에서는 전지구적인 오염물질로 규정하고, 2013년 수은에 관한 미나마타협약을 채택하였다. 우리나라는 2014년 미나마타 협약에 서명하였고, 현재 수은을 위해우려물질로 규정하여 배출원, 배출량, 규제현황, 노출수준, 독성에 관한 기초조사와 함께 미나마타협약의 국내이행기반을 구축하기 위해 2016년과

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0675>



This is an Open Access article 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.

Korean J Fish Aquat Sci 50(6) 675-683, December 2017

Received 17 August 2017; Revised 16 October 2017; Accepted 26 October 2017

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2531 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: mkchoi3@korea.kr

2017년에 수은 및 수은화합물 관리를 포함한 '잔류성오염물질 관리법'을 개정하였다(Kim, 2017).

UNEP 보고서 "Global Mercury Assessment" (UNEP, 2002)에 의하면, 수은의 노출량은 지역의 오염수준, 문화나 의식주 습관 등 나라간 혹은 지역간 차이가 큰 것으로 나타났다. 우리나라도 국민소득수준의 향상으로 건강에 대한 관심도 증가되면서 단백질 공급원으로서 수산물의 비중이 점점 증가하고 있을 뿐만 아니라, 지형학적으로 우리의 식생활은 수산물과 밀접한 관련이 있다. 우리나라 성인의 하루 평균 수은 섭취량은 18.8 µg/day 수준이며, 99% 이상이 식품 섭취로 인한 것으로 조사된 바 있다(Korea Ministry of Environment, 2006). 전체식품을 통한 수은 섭취량 조사결과, 전체식품 중 어패류가 66.8%로 가장 큰 기여를 하였고, 농산물 중 곡류가 17.1%로 그 다음이었다(Choi et al., 2012). 또한 전국 국민 혈중 수은농도 조사결과에서 전국 평균 3.8 µg/L이었고, 상어 등을 섭취하는 조사군에서 평균의 무려 7-8배 높은 수준으로 조사되기도 하였다(National Institute of Environment Research, 2007). 따라서, 우리나라 국민의 안전한 수산물 섭취를 위해서 수산물에 대한 수은의 모니터링, 위해도 평가 및 관리는 반드시 필요하다.

지금까지 국내 수산물 내 수은에 대한 연구들은 주로 총수은 또는 총수은을 포함한 중금속 농도에 집중되어 있다(Choi et al., 2012; Kim et al., 2012; Mok et al., 2014; Jo et al., 2015; Hwang et al., 2017). 또한, 메틸수은 연구는 대부분 심해성 어류, 다랑어, 새치류 등을 중심으로 보고되어 있고(Kim et al., 2010; 2013; Kang et al., 2017), 일반어류를 포함한 다양한 수산물에 대한 연구는 매우 제한적으로 수행되었다(Joo et al., 2010; Moon et al., 2012). 따라서, 본 연구는 국내연안에 서식하는 수산물 중 총수은과 메틸수은의 농도 및 위해도 평가를 위해 41종의 수산물을 채집하여 분석하였다.

재료 및 방법

시료채집 및 전처리

조사된 수산물의 종류는 생산량과 소비자료, 오염물질 잔류자료, 어류의 생태자료 등을 고려하여 다음과 같이 선정하였다(Table 1). 어류(fish)는 31종[고등어(Chub mackerel), 갈치(Hairtail), 조기(Yellow croaker), 넙치(Olive flounder), 멸치(Anchovy), 조피볼락(Rockfish), 농어(Seabass), 대구(Cod), 방어(Yellow tail), 복어(Puffer fish), 승어(Striped mullet), 서대(Tongue sole), 도다리(Starry flounder), 전어(Gizzard shad), 참돔(Red seabream), 청어(Herring), 전갱이(Jack mackerel), 쥐치(Filefish), 삼치(Spanish mackerel), 가자미(Brown sole), 민어(Brown croaker), 눈볼데(Black throat seaperch), 병어(Silver pomfret), 참다랑어(Bluefin tuna), 콩치(Saury), 갯장어(Sharp toothed eel), 붕장어(Conger eel), 멍장어(Inshore hagfish), 아귀(Anger fish), 가오리(Ray), 흥어(Mottled skate)], 갑

각류(crustaceans)는 4종[새우(Shrimp), 꽃게(Blue crab), 홍게(Red snow crab), 대게(Snow crab)], 연체류(mollusk) 중 두족강(cephalopods)은 4종[오징어(Squid), 문어(Octopus), 낙지(Small octopus), 쭈꾸미(Webfoot octopus)], 복족강(gastropods)은 2종[전복(Abalone), 소라(Spiny top shell)]이었다. 반면, 이매패강(bivalves)은 총수는 농도가 미량일 뿐만 아니라 메틸수은의 미량 또는 불검출이 보고되므로 대상시료에서 제외하였다(Joo et al., 2010; Moon et al., 2011; Mok et al., 2014).

본 연구에서 총 41종의 수산물(n=87)은 2016년 1월부터 6월까지 국내 최대 수산물 위판장인 부산시공동어시장에서 생물종별 1-2상자(10 kg 이상) 2회 이상 자연산을 대상으로 구입하였다(Table 1). 부가적으로, 고농도를 보인 멍장어는 수입산(미국, 일본; n=2)도 구입하여 잔류특성을 비교하였다. 수산물 시료는 실험실로 이동 후 크기와 중량을 고려하여 시료별 10-80 개체를 선별하여 전처리 하였다. 우선 이물질 제거를 위해 물로 세척 후, 껍질과 내장을 제거한 근육만 분리하여 취하였고, 모든 개체는 함께 균질한 후(composite sample) 갈색유리병에 담아 분석 전까지 냉동보관하였다.

총수은 분석 및 회수율

수산물 중 총수은 농도는 가열기화 골드아말감법(gold amalgamation method)과 원자흡광분광기(Atomic absorption spectrometry)를 이용한 수은자동분석기(DMA-80 Direct Mercury Analyzer, Milestone, Italy)를 사용하여 분석하였다(Jo et al., 2015). 균질화한 시료를 0.05-0.1 g을 정확하게 달아 수은자동분석기 전용 니켈보트(Nickel boat)에 넣은 후 분석하였다. 총수은 분석을 위한 수은표준물은 total mercury standard (Brooks Rand Instruments, 1 ppm, Seattle, USA)을 사용하였고, ERM-CE278 (Mussel tissue, European Reference Materials, Geel, Belgium)은 회수율 계산을 위해 사용하였다.

총수은 분석에 대한 유효성 검증을 위해 표준물질의 직선성, 검출한계, 수은 표준물의 회수율, 표준인증물질의 회수율을 확인한 후 시료를 분석하였다. 총수은 표준용액의 농도 1 ng/mL에서 200 ng/mL까지 저농도와 고농도 검량선을 작성하였고, 이때 결정계수는 0.999 이상이었으며, 검출한계는 0.0005 mg/kg이었다. 수은 표준물의 회수율은 98.4% 이상이었고, 표준인증물질 DOLT-4 (Fish liver certified reference material for trace metals, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada; 2.58 ± 0.22 mg/kg)와 DORM-4 (Fish protein certified reference material for trace metals, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada; 0.410 ± 0.055 mg/kg)에 대해서 각각 2.605 ± 0.008 mg/kg, 0.381 ± 0.001 mg/kg으로 평균 회수율은 101%와 93%이었다.

메틸수은 분석 및 회수율

메틸수은 분석은 환경부의 수질오염공정시험기준(Korea Ministry of Environment, 2017)과 USEPA Method 1630 (US EPA,

Table 1. The concentrations (mg/kg-wet weight, average±standard deviation) of total mercury (T-Hg) and methyl mercury (MeHg), and lipid content (%) in marine fisheries of Korea

Common name	Scientific name	N	Lipid (%)	T-Hg	MeHg
Anchovy	<i>Engraulis japonicus</i>	2	0.6±0.7	0.063±0.004	0.034±0.007
Angler fish	<i>Lophiomus setigerus</i>	2	0.4±0.9	0.053±0.014	0.032±0.015
Black throat seaperch	<i>Doederleinia berycoides</i>	2	3.5±3.9	0.124±0.022	0.117±0.022
Bluefin Tuna	<i>Thunnus thynnus</i>	2	0.4±0.6	0.222±0.001	0.183±0.012
Brown croaker	<i>Miichthys miiuy</i>	2	0.7±0.9	0.031±0.003	0.020±0.010
Brown sole	<i>Pleuronectes herzensteini</i>	2	0.9±0.3	0.157±0.023	0.125±0.029
Chub mackerel	<i>Scomber japonicus</i>	2	3.1±10	0.042±0.012	0.029±0.012
Cod	<i>Gadus macrocephalus</i>	2	0.3±0.3	0.264±0.039	0.187±0.006
Conger eel	<i>Conger myriaster</i>	2	7.5±2.3	0.093±0.011	0.094±0.003
Filefish	<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	2	2.6±16	0.025±0.006	0.009±0.001
Gizzard shad	<i>Konosirus punctatus</i>	2	5.2±0.1	0.016±0.001	0.013±0.005
Hairtail	<i>Trichiurus lepturus</i>	2	5.0±7.2	0.067±0.015	0.049±0.004
Herring	<i>Clupea pallasii</i>	2	3.0±8.5	0.132±0.073	0.093±0.056
Inshore hagfish	<i>Eptatretus burgeri</i>	2	6.6±9.9	0.495±0.503	0.338±0.381
Jack mackerel	<i>Trachurus japonicus</i>	2	3.3±5.3	0.099±0.075	0.067±0.057
Mottled skate	<i>Beringraja pulchra</i>	2	3.1±10	0.140±0.006	0.128±0.021
Olive flounder	<i>Paralichthys olivaceus</i>	2	0.3±0.9	0.137±0.120	0.038±0.046
Puffer fish	<i>Takifugu rubripes</i>	2	0.1±0.1	0.145±0.023	0.065±0.013
Ray	<i>Raja kenoei</i>	2	0.4±0.3	0.060±0.020	0.052±0.010
Red seabream	<i>Pagrus major</i>	2	0.3±0.2	0.086±0.019	0.067±0.010
Rockfish	<i>Sebastes schlegelii</i>	2	0.7±3.4	0.400±0.105	0.326±0.149
Saury	<i>Cololabis saira</i>	2	5.0±2.5	0.076±0.010	0.056±0.004
Seabass	<i>Lateolabrax jaonicus</i>	2	2.9±1.8	0.116±0.041	0.092±0.025
Sharp toothed eel	<i>Muraenesox cinereus</i>	2	2.9±3.5	0.030±0.008	0.020±0.003
Silver pomfret	<i>Pampus argenteus</i>	2	1.8±2.6	0.018±0.005	0.009±0.006
Spanish mackerel	<i>Scomberomorus niphonius</i>	2	8.3±2.2	0.019±0.003	0.017±0.007
Starry flounder	<i>Platichthys stellatus</i>	2	1.0±1.0	0.042±0.003	0.028±0.010
Striped mullet	<i>Chelon haematocheilus</i>	2	0.2±0.5	0.017±0.001	0.007±0.003
Tongue sole	<i>Cynoglossus semilaevis</i>	2	0.2±0.2	0.036±0.012	0.013±0.008
Yellow croaker	<i>Larimichthys polyactis</i>	2	3.4±4.4	0.027±0.005	0.017±0.009
Yellow tail	<i>Seriola quinqueradiata</i>	2	2.0±4.5	0.037±0.027	0.032±0.021
Shrimp	<i>Solenocera melantho</i>	2	0.6±0.1	0.033±0.005	0.012±0.008
Blue crab	<i>Portunus trituberculatus</i>	2	1.2±5.7	0.031±0.005	0.008±0.007
Red snow crab	<i>Chionoecetes japonicus</i>	2	0.5±0.2	0.160±0.002	0.142±0.005
Snow crab	<i>Chionoecetes opilio</i>	2	0.7±0.1	0.098±0.039	0.077±0.029
Squid	<i>Todarodes pacificus</i>	2	1.3±0.5	0.062±0.019	0.052±0.008
Small octopus	<i>Octopus minor</i>	4	0.6±0.5	0.053±0.024	0.034±0.013
Octopus	<i>Enteroctopus dofleini</i>	2	0.3±0.1	0.060±0.007	0.057±0.011
Webfoot octopus	<i>Octopus ocellatus</i>	2	0.6±0.4	0.018±0.001	0.015±0.005
Abalone	<i>Nordotis discus</i>	5	1.1±1.0	0.019±0.001	<0.002
Spiny top shell	<i>Batillus cornutus</i>	2	0.7±0.1	0.019±0.001	<0.002

1998)의 메틸수은 시험법을 적용하였다. 메틸수은의 기기분석법은 기체크로마토그래피-냉증기원자형광분광광도법(gas chromatography-cold vapor atomic fluorescent spectroscopy; GC-CVAFS)이며, 본 연구에서는 NOMA-1000 (Neo & Biz, Seoul, Korea)를 사용하였다. 시험방법은 균질화한 시료를 0.1 g을 정확하게 달아 KOH (Wako, Tokyo, Japan)-메탄올(HPLC grade, J.T. Baker, Phillipsburg, NJ, USA) 용액에 의한 분해를 거쳐 메틸수은을 추출하고, 메틸수은을 sodium tetraethylborate (NaBEt₄, Wako, Tokyo, Japan)로 에틸화시킨 후, Tenax 흡착튜브(1/4 in × 5 mm × 7 in; Supelco, Bellefonte, PA, USA)에 흡착, GC로 분리하여 CVAFS로 정량하는 방법이다. 메틸수은 표준용액은 염화메틸수은(methylmercury chloride, Sigma-Aldrich, Seelze, Germany)을 희석하여 사용하였다.

메틸수은 분석에 대한 유효성 검증을 위해 표준물질의 직선성, 검출한계, 표준인증물질의 회수율을 확인한 후 시료를 분석하였다. 메틸수은 표준용액의 농도 0, 0.078, 0.313, 1.250, 5.000 ng/mL까지 검량선을 작성하였을 때, 결정계수는 0.999 이상이었으며, 검출한계는 0.002 mg/kg이었다. 표준인증물질 DOLT-4 (1.33 ± 0.12 mg/kg)와 DORM-4 (0.355 ± 0.028 mg/kg)에 대해서 각각 2.605 ± 0.008 mg/kg, 0.381 ± 0.001 mg/kg으로 평균 회수율은 101%와 93%이었다.

수산물 중 총수은 및 메틸수은의 농도는 mg/kg-wet weight이고, 이후 농도는 mg/kg으로 표기한다.

수산물 섭취량 및 위해도 평가

수산물 섭취에 따른 총수은과 메틸수은에 대한 위해도 평가는 수산물 섭취를 통한 주간 노출량(weekly intake)을 산정한 후, 이를 총수은과 메틸수은의 잠정주간섭취허용량(provisional tolerable weekly intake; PTWI)과 비교하여 위해도(%) 수준을 평가하였다. 수산물 섭취에 따른 총수은과 메틸수은에 대한 주간노출량(weekly intake)은 아래 식을 이용하여 산정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Weekly intake via seafood (mg/kg bw/week)} \\ & = \frac{C \text{ (mg/kg)} \times I \text{ (g/week)} \times 10^{-3} \text{ (kg/g)}}{\text{BW (kg bw)}} \end{aligned}$$

여기서, C는 수산물 총수은과 메틸수은의 평균농도이고, 수산물에서 총수은 또는 메틸수은이 검출되지 않았을 때, 검출한계의 1/2을 사용하였다. I는 우리나라 국민의 수산물 주간섭취량이고, BW는 전체 국민의 평균체중을 나타낸다.

우리나라 국민의 수산물의 주간 섭취량은 국민건강영양조사 보고서(Korea Health Industry Development Institute, 2014)로부터 수산물의 섭취량을 인용하여 사용하였고, 우리나라 국민이 1인1일 섭취하는 수산물의 양은 57.11 g이고 이중 동물성 수산물 53.59 g, 식물성수산물 3.52 g이며, 이를 세분화하면 어류 27.00 g (189 g/week), 갑각류 4.07 g (28.5 g/week), 두족강

8.98 g (62.9 g/week), 복족강 0.91 g (6.37 g/week)을 섭취한다. 우리나라 국민의 평균 체중은 국민건강영양조사보고서(Korea Health Industry Development Institute, 2008)의 근거하여 55 kg의 자료를 사용하였다.

지방량 분석

수산물 중 지방량 분석은 동결건조된 시료 3 g을 정확히 달아서 지방추출장치(Soxtherm, Gerhardt, Germany)를 이용하여 노르말헥산(GC residue grade, J.T. Baker, Phillipsburg, NJ, USA)으로 지방을 추출하였고, 추출 전후 시료의 무게차로 산정하였다.

결과 및 고찰

총수은의 농도

수산물(41종, n=87)에 대한 지방함량, 총수은 및 메틸수은 농도는 Table 1에 요약하였다. 전체 수산물의 지방량은 0.1-8.3% (평균 2.0%)이었으며, 어류(2.5 ± 2.5%)에서 가장 높았고, 연체류의 복족강(1.0 ± 0.5%), 갑각류(0.7 ± 0.5%), 두족강(0.7 ± 0.4%) 순이었다. 지방량 5%이상의 수산물은 삼치, 붕장어, 떡장어, 전어, 갈치, 콩치로 모두 어류에서 조사되었다. 수산물에 대한 총수은 농도는 0.016-0.495 mg/kg (평균 0.093 mg/kg)으로 모든 수산물에서 검출되었다. 수산물 그룹별 총수은 농도는 어류 (0.119 ± 0.154 mg/kg)에서 가장 높았으며, 다음은 갑각류(0.081 ± 0.059 mg/kg), 연체류의 두족강(0.049 ± 0.023 mg/kg), 복족강(0.019 ± 0.001 mg/kg) 순이었다(Fig. 1a). 다른 수산물 그룹에 비해 어류에서 총수은의 높은 농도는 다른 연구에서도 보고된 바 있다. Joo et al. (2010)이 우리나라의 다소비 수산식품 중 총수은을 조사한 어류의 총수은 농도 (0.063 ± 0.022 mg/kg)는 두족강과 이매패강보다 2-7배 높은 농도를 보였고, Moon et al. (2011)도 일반어류의 총수은 농도 (0.131 ± 0.074 mg/kg)는 갑각류, 두족강, 이매패강보다 2-10배정도 높다고 보고하였다. Galimberti et al. (2016) 또한 갑각류와 연체류보다 상위포식자인 어류(predatory fish; 0.375 mg/kg)에서 6-19배, 비포식성 어류(non-predatory fish; 0.073 mg/kg)에서 1.2-5배정도 높은 총수은 농도를 보인다고 보고하였다. Zaza et al. (2015)도 갑각류와 연체류보다 어류(0.183 ± 0.164 mg/kg)에서 3배정도 높은 총수은 농도를 보고하였다.

각 그룹별 총수은 농도에 대해 좀더 자세히 살펴보면, 어류(31종)에서 총수은 농도범위는 0.016-0.495 mg/kg이었으며, 가장 높은 농도는 떡장어(0.495 ± 0.503 mg/kg)에서 조사되었고, 0.2 mg/kg농도 이상을 보인 어종은 조피볼락(0.400 mg/kg), 대구(0.264 mg/kg), 참다랑어(0.222 mg/kg)이었다. 몇몇 친지질성(lipophilic) 잔류성유기오염물질은 지방량이 높은 수산물에서 높은 농도가 보고되기도 하였지만(Yim et al., 2005; Moon and Choi, 2009), 본 연구에서 어류 내 지방량과 총수은과 상관

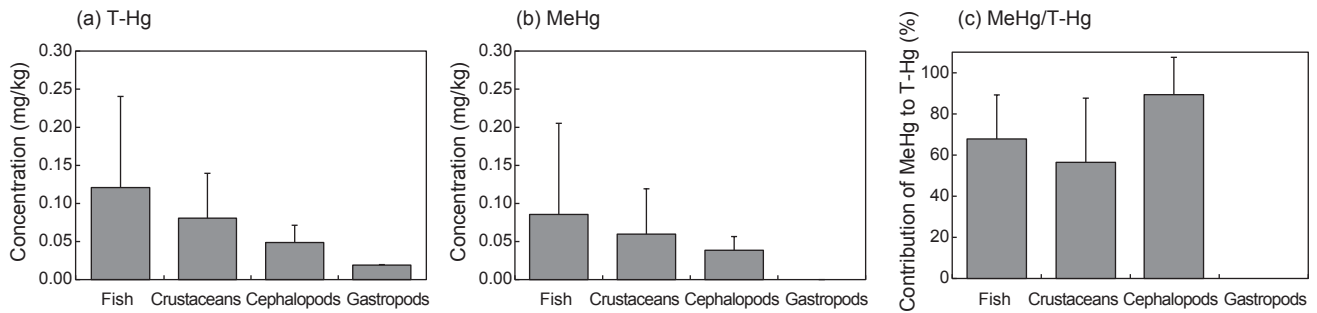


Fig. 1. Concentrations of total mercury (T-Hg, average±standard deviation) and methyl mercury (MeHg) and contribution (%) of MeHg to T-Hg in fish, crustaceans, cephalopods and gastropods.

관계는 유의하지 않았다($P>0.05$, 데이터 미제시).

먹장어(*Eptatretus burger*)는 수심 100 m 미만의 연안에 주로 서식하며, 어류나 오징어류에 흡착하여 살이나 내장 등을 녹여서 빨아먹는 어종이다. 본 연구에서는 국내산뿐만 아니라 수입산(미국, 일본)에 대해서 총수은 분석을 실시하였고, 그 결과, 국내산과 같이 수입산에서도 높은 농도(0.500 ± 0.371 mg/kg)가 검출되었다. 유사한 결과는 가고시만-동중국해 서식 어류에서 총수은 농도를 조사한 Sakamoto et al. (1992)의 연구에서 보고된 바 있고, 조사 어류 중 먹장어(*E. burger*)에서 총수은의 평균농도가 가장 높았으며, 무려 1 mg/kg를 초과하는 수준이었다. Chiu and Mok (2011)은 대만의 심해서식 먹장어류(*Myxine formosana*, 수심 850 m 서식)와 근해서식 먹장어류(*Paramyxine nelson*, 수심 200 m 서식)에 대해 보고하였고, 총수은 농도는 각각 2.738 mg/kg, 1.733 mg/kg (수분함량 77%로 가정)으로 1 mg/kg을 초과하는 고농도였다. 먹장어의 국내 어획량 통계는 없으며, 수입량(활어, 냉동)은 연간 5,362톤으로 국내의 소비량이 매우 높은 수준이었다(National Institute of Fisheries Science, 2013). 따라서 먹장어는 높은 농도의 총수은을 함유한 어종으로 국내 특정소비층과 관련하여 위해도 관리가 필요한 어종으로 판단된다.

어류 중 높은 수은농도가 보고된 사례를 살펴보면, Moon et al. (2011)은 다소비 어류(18종) 중 조피볼락과 가오리에서 0.2 mg/kg 이상의 총수은 농도를 보고하였다. Joo et al. (2010)은 어류(6종) 중 총수은의 평균농도 0.2 mg/kg 이상을 보인 어종은 없었고, 고등어에서 0.2 mg/kg 이상의 농도가 검출된 적이 있었다. Jo et al. (2015)도 어류(27종) 중 총수은의 평균농도 0.2 mg/kg 이상을 보인 어종은 없었지만, 삼치, 대구, 명태, 아귀, 가오리에서 0.2 mg/kg 이상의 농도가 검출된 사례가 있었다. 국내 Kim et al. (2013)과 Kang et al. (2017)의 연구결과와 이탈리아(Zaza et al., 2015; Galimberti et al., 2016), 영국(Knowles et al., 2003), 미국(US FDA, 2014)의 연구결과에서 어류 중 상위포식자 어류인 상어류 0.32-1.50 mg/kg, 다랑어류 0.24-0.40 mg/kg, 새치류 0.47-1.97 mg/kg, 비막치어(Patagonian toothfish) 0.43-0.83 mg/kg의 높은 농도수준이 보고되었다. 총수은

농도가 높은 어류는 대부분 수명이 길고, 심해에 서식하거나, 먹이영양단계에서 상위포식자에 속하는 어종들이다(Bonsignore et al., 2013; Zaza et al., 2015; Galimberti et al., 2016). 본 연구에서

본 연구에서 어류의 총수은 농도는 어류에 대한 국내 잔류허용기준(0.5 mg/kg 이하, 심해성어류, 다랑어류 및 새치류 제외)에 적합한 수준이었고, 일본(0.4 mg/kg), 호주/뉴질랜드(일반어류 0.5 mg/kg, 상어, 가오리, 다랑어류 1.0 mg/kg), 유럽연합(일반어류 0.5 mg/kg, 가오리, 강꼬치고기, 갈치, 고등어, 넙치류, 다랑어류, 대서양메기, 대서양가자미, 뱀장어, 아귀, 은대구, 새치류, 상어류, 송어, 체장메기, 킹크랩 1.0 mg/kg)의 잔류허용기준에도 적합한 수준이었다(Jo et al., 2015).

갑각류(4종)는 내장을 제외한 근육만 취하여 분석하였고, 이때 총수은 농도범위는 0.031-0.160 mg/kg이었으며, 높은 농도는 심해에 서식하는 홍게(0.160 ± 0.002 mg/kg)와 대게(0.098 ± 0.039 mg/kg)에서 조사되었고, 이들은 새우와 꽃게보다 3-5배 정도 높은 수준이었다. Mok et al. (2014)도 꽃게보다 홍게(0.134 ± 0.062 mg/kg)와 대게(0.119 ± 0.061 mg/kg)에서 3배 정도 높다고 보고하였다. Hwang et al. (2017)이 보고한 국내산 홍게(0.15 ± 0.06 mg/kg)와 대게(0.09 ± 0.10 mg/kg)의 총수은 농도도 Joo et al. (2010)과 Moon et al. (2011)이 보고한 국내의 새우($0.057-0.058$ mg/kg)와 꽃게($0.015-0.032$ mg/kg)의 농도 수준보다 2-10배 높은 수준이었다. 갑각류 중 총수은 농도는 꽃게(수심 20-30 m 서식)보다 심해에서 서식하는 홍게(400-2000 m 서식)와 대게(200-450 m 서식)에서 높은 농도를 보였다. 이것은 갑각류 중 총수은 농도도 어류와 유사하게 크기, 수명, 서식환경 및 먹이와 관련성이 있는 것으로 추측된다.

연체류 중 두족강(4종)에서 총수은 농도범위는 0.018-0.062 mg/kg이었으며, 오징어, 문어, 낙지에 비해 주꾸미에서 다소 낮은 농도로 조사되었다. 본 연구의 농도는 Joo et al. (2010)과 Moon et al. (2011)이 보고한 오징어($0.030-0.072$ mg/kg)와 문어($0.026-0.051$ mg/kg)의 농도수준과 유사하였다. 연체류 중 복족강(2종)에서 총수은 농도는 모두 0.019 mg/kg이었으며, Mok et al. (2014)이 보고한 전복(0.004 ± 0.001 mg/kg)과

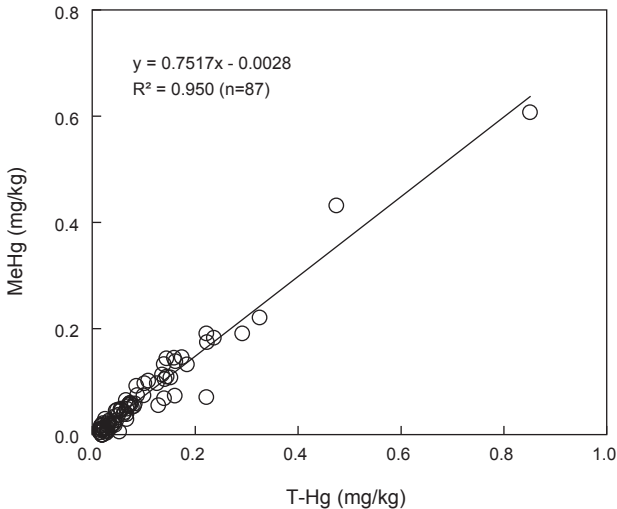


Fig. 2. Correlation between total mercury (T-Hg) and methyl mercury (MeHg) in marine fisheries.

소라(0.005 ± 0.001 mg/kg)보다는 다소 높은 농도였다. 하지만, 본 연구에서 연체류(두족강, 복족강)의 총수은 농도는 연체류에 대한 국내기준규격(0.5 mg/kg)에 모두 적합한 수준이었다.

메틸수은의 농도

수산물(41종)에 대한 메틸수은의 농도는 불검출- 0.338 mg/kg(평균 0.067 mg/kg) 범위였다(Table 1). 수산물 그룹별 메틸수은의 평균농도는 어류(0.076 ± 0.084 mg/kg) > 갑각류(0.060 ± 0.063 mg/kg) > 연체류의 두족강(0.040 ± 0.019 mg/kg) > 복족강(불검출) 순으로 높았으며(Fig. 1b), 메틸수은의 농도는 총수은과 통계적으로 유의한 상관성을 보였다($r=0.975$, $P<0.001$; Fig. 2). 메틸수은과 총수은과의 높은 상관성은 이전에 수산물(Joo et al., 2010; Moon et al., 2011; Miniero et al., 2013)과 수생포유류(Haines et al., 2010)에서도 다수 보고된 바 있다.

본 연구에서 어류 중 메틸수은 농도(0.007 - 0.338 mg/kg)는 국내 다른 연구에서 보고된 농도범위(0.005 - 0.328 mg/kg)와 유사한 수준이었고(Joo et al., 2010; Moon et al., 2011), 상위포식자인 상어(0.46 - 0.95 mg/kg), 새치류(0.15 - 0.96 mg/kg) 보다 낮은 수준이었다(Knowles et al., 2003; Kim et al., 2010; 2013; US FDA, 2014; Kang et al., 2017). 본 연구에서 어류의 메틸수은 농도는 심해성어류, 다랑어류 및 새치류에 대한 국내 잔류허용기준(1.0 mg/kg)에 적합한 수준이었고, 미국(1.0 mg/kg), 일본(0.3 mg/kg, 심해성어류, 다랑어류 및 새치류 제외)에 적합한 수준이었다.

갑각류 중 메틸수은 농도(0.008 - 0.142 mg/kg)는 국내 다른 연구에서 보고된 0.008 - 0.031 mg/kg보다 높은 수준이었다(Joo et al., 2010; Moon et al., 2011). 이것은 기존에 보고되지 않은 홍게와 대게 중의 높은 메틸수은 농도가 포함되었기 때문

으로 판단된다. 연체류 두족강 중 메틸수은 농도(0.015 - 0.057 mg/kg)는 국내 연구에서 0.010 - 0.039 mg/kg와 유사한 수준이었다(Joo et al., 2010; Moon et al., 2011). 복족강은 총수은 농도도 낮았을 뿐만 아니라 메틸수은은 검출한계이하로 조사되었다. 이 같은 결과는 복족강에서도 이매패강과 유사하게 총수은과 메틸수은이 매우 낮은 수준으로 존재하고 있음을 보여준다.

총수은 대비 메틸수은의 기여율은 두족강($83 \pm 13\%$)에서 가장 높았고, 그 다음은 어류($69 \pm 18\%$), 갑각류($57 \pm 31\%$) 순이었다(Fig. 1c). Moon et al. (2011)의 연구에서 또한 두족강(55%), 어류(53%), 갑각류(51%), 이매패강(13%) 순이었고, 이매패강은 다른 수산물 그룹에 비해 확연하게 낮은 기여율로 보고되었다. Joo et al. (2010)의 연구에서도 두족강(41%), 어류(31%), 갑각류(23%) 순이었고, 이매패강에서 메틸수은은 검출한계 이하였다. 다른 연구의 어류에 대한 총수은 대비 메틸수은의 기여율은 North Sea 95% , Hong Kong의 양식산 어류 76% , Southern China Sea 69% 정도로 수은의 높은 메틸화를 보고하였다(Baeyens et al., 2003; Liang et al., 2011; Liu et al., 2014).

총수은과 메틸수은의 섭취량 산정 및 위해도 평가

총수은에 인체노출안전기준은 EFSA (2012)에서 PTWI 4 $\mu\text{g/kg bw/week}$ 를 설정하고 있으며, 식품의약품안전처에서 신장기능이상과 건강영향 관련성 연구에 근거하여 PTWI 3.7 $\mu\text{g/kg bw/week}$ 값을 제시하고 있다(Korea Ministry of Food and Drug Safety, 2013). 또한 메틸수은의 경우, EFSA (2012)에서 PTWI 1.3 $\mu\text{g/kg bw/week}$ 를 기준으로 하고 있으며, Korea 식품의약품안전처에서 태아의 신경발달독성에 근거한 PTWI 2.0 $\mu\text{g/kg bw/week}$ 를 제시하였다(Korea Ministry of Food and Drug Safety, 2013). 따라서 본 연구에서 수산물 섭취시 총수은과 메틸수은의 위해도는 각각 단위체중당 일일 인체노출안전기준 3.7 $\mu\text{g/kg bw/week}$ 과 2.0 $\mu\text{g/kg bw/week}$ 을 적용하여 산정하였다.

본 연구에서 수산물 섭취를 통한 총수은과 메틸수은의 주간 노출량은 각각 0.463 과 0.338 $\mu\text{g/kg bw/week}$ 수준이었고, PTWI대비 각각 12.5% 와 16.9% 로 나타났다. 따라서 본 연구에서 조사한 국내 수산물의 총수은 노출량을 통해 평가한 위해도는 높지 않은 것으로 판단된다. 본 연구에서 총수은 주간 노출량은 국내 다른 연구에서 보고한 주간 노출량(0.178 - 0.517 $\mu\text{g/kg bw/week}$)과 유사한 수준이었고(Joo et al., 2010; Moon et al., 2011), 이탈리아(0.52 $\mu\text{g/kg bw/week}$, Zaza et al., 2015)와 유사하였고, 스페인(2.1 $\mu\text{g/kg bw/week}$, Llull et al., 2017)보다는 낮은 수준이었다. 본 연구에서 메틸수은의 주간 노출량은 국내 연구의 주간 노출량(0.052 - 0.272 $\mu\text{g/kg bw/week}$)보다 다소 높은 수준이었고(Joo et al., 2010; Moon et al., 2011), Jacobs et al. (2017)이 보고한 유럽국가별 메틸수은 노출량에서 아일랜드(0.360 $\mu\text{g/kg bw/week}$)와 유사한 수준이었고, 포르투갈, 스

페인, 이탈리아(0.546-0.796 $\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{week}$)보다는 낮은 수준이었다.

수산물 그룹별 총수은과 메틸수은의 주간 노출량(PTWI 대비 위해도)은 어류에서 각각 0.364 $\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{week}$ (9.8%)와 0.261 $\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{week}$ (13.1%) 수준으로 가장 높았고, 다음은 두족강, 갑각류, 복족강 순이었다. 좀더 자세히 살펴보기 위하여 어종별 평균농도와 주간 섭취량(Korea Health Industry Development Institute, 2014)을 이용하여 어종별 총수은과 메틸수은의 노출량과 PTWI 대비 위해도 기여율을 산정하였다(Table 2). 총수은의 경우, 위해도에 큰 기여한 어종은 오징어(1.4%)이었고, 다음은 조피볼락(1.1%), 장어류(0.9%), 다랑어(0.8%), 대구(0.8%), 게류(0.7%)로 나타났다. 메틸수은의 경우, 가장 높은 기여도를 보인 어종은 역시 오징어(2.2%)이었고, 다음은 조피볼락(1.6%), 다랑어(1.3%), 장어류(1.2%), 대구(1.1%), 게류

(1.0%)로 나타났다. 조피볼락, 다랑어, 장어류, 대구는 앞에서 언급했듯이 총수은 0.2 mg/kg 이상의 상위농도로 분류되는 어종일 뿐만 아니라 주간섭취량도 5.46-8.89 g/week 수준으로 비교적 높은 수준이었기 때문에 위해도에 높은 기여를 하였다. 반면, 오징어와 게류는 0.2 mg/kg농도이하 수준에도 불구하고 주간섭취량이 14.07-45.71 g/week로 현저하게 높은 수준이었기 때문에 높은 기여도를 보였다. 국내의 Joo et al. (2010)과 Moon et al. (2011)의 연구에서 보고한 총수은과 메틸수은 위해도에 크게 기여하는 어종은 고등어, 오징어, 다랑어, 조피볼락, 갈치, 명태이었다. Jacobs et al. (2017)이 보고한 유럽국가에서 메틸수은의 위해도에 가장 큰 기여를 하는 어종들은 공통적으로 다랑어, 돔류, 농어 이었고, 국가에 따라 대구, 명태, 새우, 문어도 기여도가 높았다. 따라서 수산물 섭취를 통한 총수은과 메틸수은의 위해도에 높게 기여하는 어종은 수산물 중 수은농도가 상

Table 2. Estimated intakes ($\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{week}$) and contribution to PTWI (%) of total mercury (T-Hg) and methyl mercury (MeHg) through fisheries consumption

Fisheries	Average consumption rate (g/week)	Intakes ($\mu\text{g}/\text{kg bw}/\text{week}$)		Contribution to PTWI (%)	
		T-Hg	MeHg	T-Hg	MeHg
Squid	45.71	0.051	0.043	1.4	2.2
Rockfish	5.46	0.040	0.032	1.1	1.6
Eels	8.89	0.033	0.024	0.9	1.2
Tuna	7.77	0.031	0.026	0.8	1.3
Cod	6.51	0.031	0.022	0.8	1.1
Crabs	14.07	0.025	0.019	0.7	1.0
Olive flounder	7.28	0.018	0.005	0.5	0.3
Mackerel	21.07	0.016	0.011	0.4	0.6
Mottled skate	5.60	0.014	0.013	0.4	0.7
Anchovy	10.92	0.013	0.007	0.3	0.3
Brown sole	4.34	0.012	0.010	0.3	0.5
Hairtail	9.66	0.012	0.009	0.3	0.4
Saury	8.26	0.011	0.008	0.3	0.4
Small octopus	10.71	0.010	0.007	0.3	0.3
Shrimp	14.14	0.009	0.003	0.2	0.2
Yellow croaker	12.60	0.006	0.004	0.2	0.2
Ocellate puffer	2.31	0.006	0.003	0.2	0.1
Octopus	4.13	0.005	0.004	0.1	0.2
Angler fish	4.06	0.004	0.002	0.1	0.1
Filefish	7.28	0.003	0.001	0.1	0.1
Seabass	0.98	0.002	0.002	0.1	0.1
Seabream	1.12	0.002	0.001	<0.1	0.1
Herring	0.63	0.002	0.001	<0.1	0.1
Spanish mackerel	4.41	0.002	0.001	<0.1	0.1
Starry flounder	0.98	0.001	<0.001	<0.1	<0.1

PTWI, provisional tolerable weekly intake.

위수준으로 존재하고 있거나 국민 소비량이 높은 어종과 관련성이 있다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원(R2017060)의 연구지원에 의해 수행되었습니다

References

- Baeyens W, Leermakers M, Papina T, Saprykin A, Brion N, Noyen J, De Gieter M, Elskens M and Goeyens L. 2003. Bioconcentration and biomagnification of mercury and methylmercury in North Sea and Scheldt Estuary fish. *Arch Environ Contam Toxicol* 45, 498-508. <https://doi.org/10.1007/s00244-003-2136-4>.
- Bonsignore M, Salvagio Manta D, Oliveri E, Sprovieri M, Basilone G, Bonanno A, Falco F, Traina A and Mazzola S. 2013. Mercury in fishes from Augusta Bay (southern Italy): Risk assessment and health implication. *Food Chem Toxicol* 56, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.02.025>.
- Choi H, Park SK and Kim M. 2012. Risk assessment of mercury through food intake for Korean population. *Kor J Food Sci Technol* 44, 106-113. <https://doi.org/10.9721/KJFST.2012.44.1.106>.
- Chiu KH and Mok HK. 2011. Study on the accumulation of heavy metals in shallow-water and deep sea Hagfishes. *Arch Environ Contam Toxicol* 60, 643-653. <https://doi.org/10.1007/s00244-010-9572-8>.
- EFSA (European Food Safety Authority). 2012. Scientific opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. *EFSA J* 10, 1-241. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2985>.
- Galimberti C, Corti I, Cressoni M, Moretti VM, Menotta S, Galli U and Cambiaghi D. 2016. Evaluation of mercury, cadmium and lead levels in fish and fishery products imported by air in North Italy from extra-European Union countries. *Food Cont* 60, 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.009>.
- Haines KJR, Evans RD, O'Brien M and Evans HE. 2010. Accumulation of mercury and selenium in the brain of river otters (*Lontra Canadensis*) and wild mink (*Mustela vison*) from Nova Scotia, Canada. *Sci Total Environ* 408, 537-542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.055>.
- Hwang DW, Choi M, Lee IS, Shim KB and Kim TH. 2017. Concentrations of trace metals in tissues of Chionoecetes crabs (*Chionoecetes japonicas* and *Chionoecetes opilio*) caught from the East/Japan Sea waters and potential risk assessment. *Environ Sci Pollut Res* 24, 11309-11318. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8769-z>.
- Jacobs S, Sioen I, Jacxsens L, Domingo JL, Sloth JJ, Marques A and Verbeke W. 2017. Risk assessment of methylmercury in five European countries considering the national seafood consumption patterns. *Food Chem Toxicol* 104, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2016.10.026>.
- Jo MR, Kim KH, Jo MR, Kwon JY, Son KT, Lee HJ, Kim JH, Lee TS, Kang SI and Kim JS. 2015. Mercury contamination and risk evaluation in commonly consumed fishes as affected by habitat. *J Fish Aquat Sci* 48, 621-630. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0621>.
- Joo HJ, Noh MJ, Yoo JH, Jang YM, Park JS, Kang MH and Kim M. 2010. Monitoring total mercury and methylmercury in commonly consumed aquatic foods. *Kor J Food Sci Technol* 42, 269-276.
- Kang SH, Lee MJ, Kim JK, Jung YJ, Hur ES, Cho YS, Moh A and Park KH. 2017. Contents of total mercury and methylmercury in deep-sea fish, tuna, billfish and fishery products. *J Food Hyg Safety* 32, 42-49. <https://doi.org/10.13103/JFHS.2017.32.1.42>.
- Kim CK, Lee TW, Lee KT, Lee JH and Lee CB. 2012. Nationwide monitoring of mercury in wild and farmed fish from fresh and coastal waters of Korea. *Chemosphere* 89, 1360-1368. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.093>.
- Kim CW, Kim YW, Chae CH, Son JS, Kim JH, Park HO, Kang YS, Kim JR, Hong YS, Kim DS and Jeong BG. 2012. The relationship between fish consumption and blood mercury levels in residents of Busan metropolitan city and Gyeongnam province. *J Agri Med Com Health* 37, 223-232. <https://doi.org/10.5393/JAMCH.2012.37.4.223>.
- Kim JA, Yuk DH, Park YA, Choi HJ, Kim YC and Kim MS. 2013. A study on total mercury and methylmercury in commercial tuna, billfish, and deep-sea fish in Seoul metropolitan city. *Kor J Food Sci Technol* 45, 376-381. <https://doi.org/10.9721/KJFST.2013.45.3.376>.
- Kim MK and Zoh KD. 2013. Fate and transport of mercury in the environmental media and its exposure to human. *J Public Health* 50, 15-26.
- Kim SC, Jang JW, Kim HA, Lee SH, Jung YJ, Kim JY, Ahn JH, Park EH, Ko YS, Kim DS, Kim SY, Jang YM and Kang CS. 2010. Monitoring methylmercury in abyssal fish. *Kor J Food Sci Technol* 42, 383-389.
- Kim SM. 2017. A study on the EU's legislative proposal for a regulation on mercury for the implementation of the Minamata Convention. *J Kor Law* 17, 1-23.
- Knowles T, Farrington D and Kestin S. 2003. Mercury in UK imported fish and shellfish and UK-farmed fish and their products. *Food Add Contam* 20, 813-818. <https://doi.org/10.1080/0265203031000152398>.
- Korea Health Industry Development Institute. 2008. Korea National Health and Nutrition Examination Survey. Nutrition Survey, Seoul, Korea.
- Korea Health Industry Development Institute. 2014. Korea National Health and Nutrition Examination Survey. Nutrition Survey, Osong, Korea.

- Korea Ministry of Environment. 2006. Survey on metal levels in blood of Korean population. Ministry of Environment, Seoul, Korea.
- Korea Ministry of Environment. 2017. Standard analytical methods for surface water. Ministry of Environment, Seoul, Korea.
- Korea Ministry of Food and Drug Safety. 2013. Korean Food code. KMFDS. Cheongju, Korea.
- Liang P, Shao DD, Wu SC, Shi JB, Sun XL, Wu FY, Lo SCL, Wang WX and Wong MH. 2011. The influence of mariculture on mercury distribution in sediments and fish around Hong Kong and adjacent mainland China waters. *Chemosphere* 82, 1038-1043. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.10.061>.
- Liu J, Xu X, Yu S, Cheng H, Hong Y and Feng X. 2014. Mercury pollution in fish from South China Sea: levels, species-specific accumulation, and possible sources. *Environ Res* 131, 160-164. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.004>.
- Llull RM, Gari M, Canals M, Rey-Maqueira T and Grimalt JO. 2017. Mercury concentrations in lean fish from the Western Mediterranean Sea: Dietary exposure and risk assessment in the population of the Balearic Islands. *Environ Res* 158, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.033>.
- Miniero R, Beccaloni E, Carere M, Ubaldi A, Mancini L, Marchegiani S, Cicero MR, Scenati R, Lucchetti D, Ziemacki G and De Felip E. 2013. Mercury (Hg) and methyl mercury (MeHg) concentrations in fish from the coastal lagoon of Orbetello, central Italy. *Mar Pollut Bull* 76, 365-369. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.012>.
- Mok JS, Kwon JY, Son KT, Choi WS, Kang SR, Ha NY, Jo MR and Kim JH. 2014. Contents and risk assessment of heavy metals in marine invertebrates from Korean coastal fish markets. *J Food Protection* 77, 1022-1030. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-13-485>.
- Moon HB and Choi HG. 2009. Human exposure to PCDDs, PCDFs and dioxin-like PCBs associated with seafood consumption in Korea from 2005 to 2007. *Environ Int* 35, 279-284. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.003>.
- Moon HB, Kim SJ, Park H, Jung YS, Lee S, Kim YH and Choi M. 2011. Exposure assessment for methyl and total mercury from seafood consumption in Korea, 2005 to 2008. *J Environ Monitor* 13, 2400-2405. <https://doi.org/10.1039/C1EM10504C>.
- National Institute of Fisheries Science. 2013. Seafood (100 species): Marine fish III. NIFS, Busan, Korea.
- National Institute of Environment Research. 2007. The hazardous substances survey in Korean populations. Incheon, Korea.
- Sakomoto H, Tomiyasu T and Yonehara N. 1992. Total mercury content of fishes in Kagoshima Bay. *Repository, Faculty of Science, Kagoshima University* 35, 71-78.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2002. Global mercury assessment. UNEP Chemical. Switzerland. Retrieved from <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.1182/11718/final-assessment-report-25nov02.pdf?sequence=1&isAllowed=y> On Aug 8, 2017.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998. Method 1630: Methyl mercury in water by distillation, aqueous ethylation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry. Office of Water, US EPA, Washington, DC, U.S.A. Retrieved from http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/method_1630_1998.pdf On Aug 8, 2017.
- US FDA (United States Food and Drug Administration). 2014. Mercury levels in commercial fish and shellfish (1990-2012). Available from: Retrieved from <http://www.fda.gov/Food/Foodborneillnesscontaminants/Metals/ucm115644.htm> On Aug 8, 2017.
- Yim UH, Hong SH, Shim WJ and Oh JR. 2005. Levels of persistent organochlorine contaminants in fish from Korea and their potential health risk. *Arch Environ Contam Toxicol* 48, 358-366. <https://doi.org/10.1007/s00244-004-0085-1>.
- Zaza S, de Balogh K, Palmery M, Pastorelli AA and Stacchini P. 2015. Human exposure in Italy to lead, cadmium and mercury through fish and seafood product consumption from eastern central Atlantic fishing area. *J Food Compos Anal* 40, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.01.007>.