

통영-거제 연안 어류 양식장 표층 퇴적물 중 유기물 및 중금속 오염 평가

황동운* · 황현진** · 이가람** · 김선영** · 박소현** · 윤상필***

*, *** 국립수산과학원 어장환경과 연구사, ** 국립수산과학원 어장환경과 연구원

Organic Matter and Heavy Metals Pollution Assessment of Surface Sediment from a Fish Farming Area in Tongyoung-Geoje Coast of Korea

Dong-Woon Hwang* · Hyunjin Hwang** · Garam Lee** · Sunyoung Kim** · Sohyun Park** · Sang-Pil Yoon***

*, *** Senior Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

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

요 약 : 어류 양식장 퇴적물 중 유기물과 중금속의 오염상태를 파악하기 위하여 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물 중 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, Zn)을 조사하였다. 양식장 퇴적물 중 TOC와 TN의 평균농도는 각각 22.7 mg/g과 3.4 mg/g로 남해안의 반폐쇄적인 내만보다 높았다. 퇴적물 중 중금속의 평균농도는 비소(As) 10.5 mg/kg, 카드뮴(Cd) 0.37 mg/kg, 크롬(Cr) 82.9 mg/kg, 구리(Cu) 127 mg/kg, 철(Fe) 4.19%, 수은(Hg) 0.041 mg/kg, 망간(Mn) 596 mg/kg, 납(Pb) 39.5 mg/kg, 아연(Zn) 175 mg/kg였으며, 이중 Cd, Cu의 농도는 인접한 남동해 연안의 패류양식해역보다 3배 이상 높았다. 퇴적물 기준을 이용한 오염평가 결과, 대부분의 어류 양식장에서 TOC와 중금속 중 Cu 농도가 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 전체 중금속 농도를 고려한 오염부하량지수(PLI)와 생태계위해도지수(ERI) 결과는 일부 어류 양식장 퇴적물이 저서생물에 극심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(disastrous risk)인 것으로 파악되었다. 따라서, 어류 양식장 퇴적물은 유기물 및 일부 중금속에 의한 오염된 상태를 보이고 있어, 양식장 퇴적환경을 개선하고 퇴적물내 유기물 및 중금속의 주된 오염원을 파악하는 한편 오염부하량을 저감하는 종합적인 관리대책이 필요하다.

핵심용어 : 퇴적물, 유기물, 중금속, 오염평가, 어류 양식장

Abstract : To understand the status of organic matter and heavy metal pollution in surface sediment of a fish farming area, we have measured the concentrations of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) in surface sediments of a fish farming area near Tongyoung-Geoje coast. The mean concentrations of TOC and TN were 22.7 mg/g and 3.4 mg/g, respectively, and were much higher than those in surface sediments of a semi-enclosed bay in the southern coast of Korea. The mean concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn were 10.5 mg/kg, 0.37 mg/kg, 82.9 mg/kg, 127 mg/kg, 4.19%, 0.041 mg/kg, 596 mg/kg, 39.5 mg/kg, and 175 mg/kg, respectively, and the mean concentrations of Cd and Cu were three times higher than those in surface sediments of shellfish farming area in the southeastern coast of Korea. In addition, the concentrations of TOC and corrected Cu exceeded the values of sediment quality guidelines applied in Korea, and pollution load index (PLI) and ecological risk index (ERI) showed that the metal concentrations in the sediments of some fish farming area have a strongly negative ecological impact on benthic organisms, although most metal concentrations did not exceed the sediment quality guidelines. Based on overall assessment results, the surface sediments of fish farming areas in the study region are polluted with organic matter and some heavy metals. Thus, a comprehensive management plan is necessary to improve the sedimentary environments, identify primary contamination sources, and reduce the input of pollution load for organic matter and heavy metals in the sediments of fish farming areas.

Key Words : Sediment, Organic matter, Heavy metal, Pollution assessment, Fish farming area

† dwhwang@korea.kr, 051-720-2542

1. 서론

전 세계적으로 인간활동을 통해 발생하는 각종 유기물과 중금속은 연안 및 해양환경의 주요 인위적인 오염물질로 인식되고 있다(Ruilian et al, 2008; Naser, 2013). 경제성장에 따른 산업화와 도시화, 그리고 연안 양식어업 등으로 인해 발생한 유기물 및 중금속 등의 오염물질들은 연안에서 생물체에 이용되거나 조류 및 해류에 의해 연안에서 외해로 이동하기도 하지만, 대부분은 반응성이 높아 입자물질에 흡착되어 연안 퇴적물에 축적된다(Fang and Hong, 1999; Lim et al., 2013; Ra et al., 2013). 퇴적물에 축적된 유기물과 중금속은 퇴적물의 산화환원환경 변화에 의해 일부 다시 용출되어 수층에 영향을 주기도 하지만(Soares et al., 1999; Ra et al., 2013), 대부분은 연안 퇴적물에 그대로 잔존한다. 따라서, 연안 퇴적물은 그 해역의 시공간적인 환경변화 및 오염의 역사를 잘 반영하여 각종 오염물질의 오염현황 및 오염역사를 밝히는 좋은 매체로 알려져 있다(Choi et al., 1999; 2015).

노르웨이, 일본과 함께 전 세계 대표적인 수산물 소비국으로 알려져 우리나라는 국민 1인당 수산물 소비량(2013-2015년 기준)이 약 58.4 kg로 전 세계 수산물 평균 소비량(약 20.2 kg)보다 상당히 많다(FAO, 2016; Lee et al., 2020). 경제성장 이후 안정적인 생활과 웰빙문화의 확산으로 건강한 단백질 섭취를 위해 수산물 소비량은 매년 증가하고 있으나, 수산물의 공급량은 그렇지 못한 실정이다. 1999년 약 110%이던 수산물 자급률은 지속적으로 감소하여 2015년에는 약 70%에 불과하고, 주로 연안 해면어업(잡는 어업)보다는 양식어업(기르는 어업)을 통한 수산물 생산량에 크게 의존하고 있다(MOF, 2017a; 2020). 특히, 해면어업을 통한 수산물 생산량이 매년 감소하고 있어 연근해 수산자원량이 급격히 증가하지 않는 한 양식어업을 통한 수산물의 생산은 미래 우리나라 수산물 수급에 있어 매우 중요하다.

우리나라는 동·서·남해안이 각기 다른 독특한 해양환경 특성을 가지고 있어 다양한 품종(어류, 패류, 해조류 등)의 수산생물을 양식하기에 적합하다. 특히, 남해안의 경우 얕은 수심과 리아스식 해안, 다도해로 이루어진 지리적 장점을 활용하여 전체 양식장의 약 80%(어업면허권 및 양식면적 기준)가 분포하고 있으며(MOF, 2020), 완도, 진도, 해남 등 남서해 연안을 중심으로 해조류 양식, 한산만, 고성만, 자란만, 가막만, 여자만 등 반폐쇄적인 내만을 중심으로 패류 양식이 대규모로 이루어지고 있고, 파도와 풍랑을 막아주는 섬이나 수로 부근, 소규모 내만의 가장자리 등 곳곳에 어류 양식장이 산재해 있다. 특히, 어류 양식장은 다른 패류나 해조류 양식장에 비해 그 규모가 작고 양식 생산량(2011-2016년 기준)도 전체 천해양식 생산량의 약 5%에 불과하지만, 생산

금액으로는 전체 천해양식 생산금액의 약 42%로 다른 양식어업에 비해 경제적 가치가 매우 높다(MOF, 2017a; 2020).

그러나, 이러한 양식어업이 크게 발달하면서 양식 시설물, 양식생물 및 부착생물의 배설물, 양식생물의 사체 및 먹이 등을 통해 발생한 각종 유기물 및 유해물질이 수층에서 퇴적물로 침강하면서 퇴적물을 오염시키고 저층 퇴적물의 화학적 조성 및 대형저서동물의 분포에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Holmer et al., 2005; Vezzulli et al., 2008; Cranford et al., 2009; Tomassetti et al., 2009; Silva et al., 2013). 또한, 양식을 위한 장기간에 걸친 어장의 이용과 적정 어장 분포를 초과한 과밀양식, 무분별한 양식어장의 확장 등으로 퇴적물 오염이 더욱 심화되면서, 부영양화에 따른 적조와 빈산소수괴의 발생 등 이차적인 오염이 발생하여 양식생물의 성장을 저하시키고 대량폐사를 유발할 수 있다(Lee et al., 2011; Choi et al., 2017; Hwang et al., 2018). 그러므로 지속적인 양식어장의 이용과 양식생물의 안전성을 확보하기 위해 각 품종별 양식장 퇴적물 내 유기물과 중금속 등에 대한 오염상태를 파악할 필요가 있다(Lee et al., 2020).

지금까지 남해안에서 양식장 주변 퇴적물 중 유기물 및 중금속에 대한 연구는 진해만(Choi et al., 2017), 거제·한산만(Hwang et al., 2015; Choi et al., 2017), 고성만(Lee et al., 2017), 자란만(Hwang et al., 2018), 진주만(Lee et al., 2020), 가막만(Kim et al., 2012), 여자만(Choi et al., 2013; 2015), 득량만(Jeon et al., 2012) 등 수하식 및 살포식 패류 양식해역에 대해서는 많은 연구가 진행되어져 왔다. 그러나, 실제 과잉의 먹이공급과 양식어류의 배설물 등의 침강으로 퇴적물 내 유기물 및 중금속 오염이 심각할 것으로 예상되는 어류 양식장 퇴적물에 대한 연구는 전무한 실정이다.

그러므로, 이 연구의 목적은 어류 양식장 퇴적물 중 유기물과 중금속의 오염현황을 파악하는데 있으며, 이를 위해 우리나라에서 해상 가두리 양식을 통해 조피볼락, 참돔, 송어, 고등어 등을 가장 많이 양식하고 있는 통영-거제 연안 해역의 어류 양식장을 대상으로 퇴적물 중 유기물 및 중금속 농도를 조사하고 다양한 지화학적 평가기법을 이용하여 오염도를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 채취 및 분석

어류 양식장 퇴적물의 유기물 및 중금속 오염상태를 파악하기 위하여 2014년 10월과 2015년 4월 선박을 이용하여 통영-거제 연안에 산재해 있는 20개 어류 양식장(T1~T10, G1~G10)에서 채니기(van Veen grab sampler, 면적: 0.05 m²)로 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 채취한 퇴적물 중 표면 5 cm 내 퇴적물만

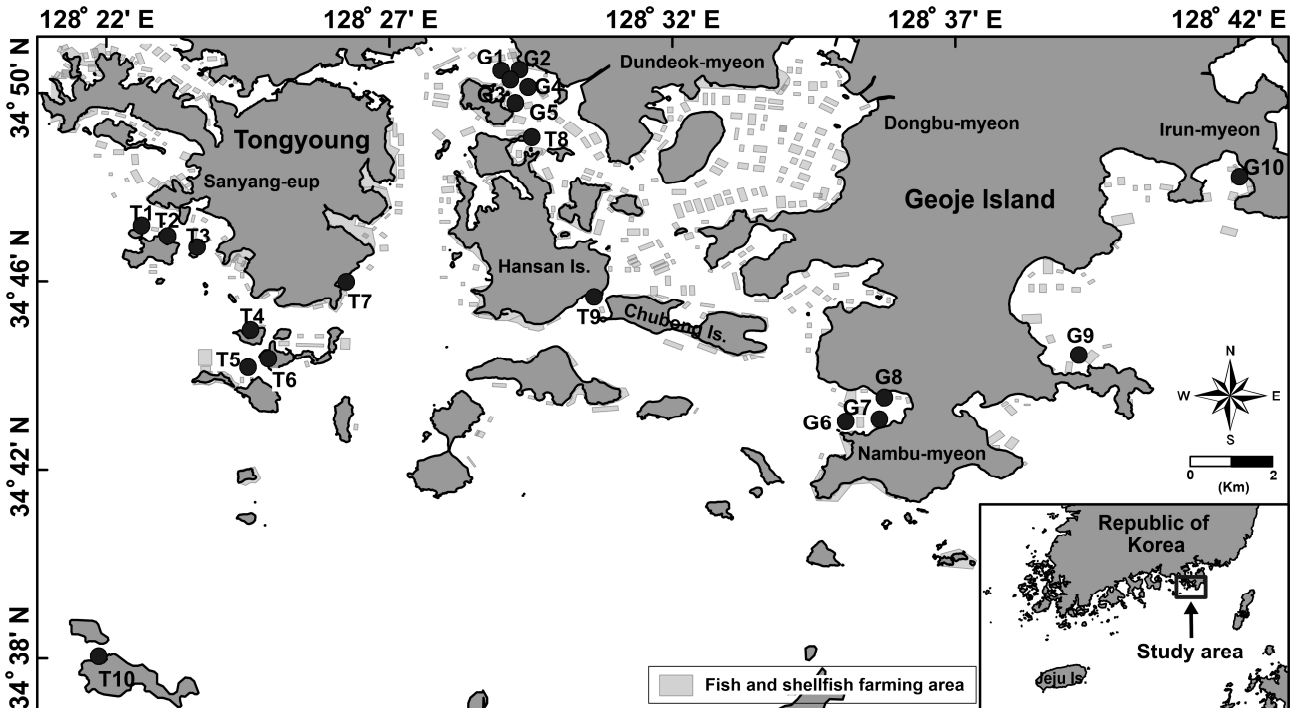


Fig. 1. A map showing the study area and sampling locations for analyzing the organic matter and trace metals in surface sediments from a fish farming area in Tongyoung-Geoje coast of Korea.

을 플라스틱 스푼으로 채집하여 폴리에틸렌병(부피: 250 mL)에 담아 실험실로 운반하여 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 총질소(total nitrogen, TN), 그리고 중금속 9종(heavy metal; 비소[As], 카드뮴[Cd], 크롬[Cr], 구리[Cu], 철[Fe], 수은[Hg], 망간[Mn], 납[Pb], 아연[Zn])을 분석하였으며, Cu와 Zn의 오염평가를 위해 퇴적물 중 리튬(Li)도 함께 분석하였다.

TOC, TN, 중금속은 최근에 Lee et al.(2020)이 사용한 같은 방법으로 분석하였다. 분석방법에 대해 간략히 설명하자면, 먼저 습식 퇴적물 약 100 g을 동결건조기에 넣고 -80°C에서 7~10일간 건조한 후 분쇄하여 균질화한 건식 퇴적물로 만들었다. 이후 TOC와 TN은 건식 퇴적물 약 0.5 g을 25 mL 유리 vial에 넣고 1N 염산 10 mL를 첨가한 후 탄산염을 제거한 다음 가열판에서 약 70°C로 24시간 열을 가해 수분과 잔류 염소를 제거하였다. 이후 시료를 건조기에 넣어 105°C로 2시간 건조하고 실온이 될 때까지 데시케이터에서 방치한 후 주석박막으로 소량(3-5 mg)의 퇴적물을 말아 CHN 원소분석기(element analyzer, Perkin Elmer, US/2400)로 측정하였다.

중금속은 건식 퇴적물 약 50 g을 플라스틱 체(mesh size 125 µm)로 체질하여 체를 통과한 퇴적물만을 사용하여 분석하였다. Hg의 경우 체질한 퇴적물 약 0.1 g을 자동수은분석기(automatic mercury analyzer, Milestone, DMA-80)로 바로 측정하였고, 그 외 중금속은 체질한 퇴적물 약 0.5 g을 테프론

용기(teflon vessel, Savillex Corp.)에 넣고 혼합산(HNO₃:HF:HClO₄=2:2:1)을 첨가한 후 가열판에서 약 130°C로 8~9시간 퇴적물을 분해하였고, 시료의 완전분해를 위해 이 과정을 2번 반복하였다. 이후 2% 질산을 첨가하여 잔사가 남지 않을 때까지 녹인 후 1 µm 여과지(Toyo 5C, Advantec, 110 mm)로 여과한 다음 100 mL 플라스크로 정용하여 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, ELAN DRC-e)로 측정하였다.

중금속 분석결과와 정확성 및 신뢰성을 확보하기 위하여 Hg은 MESS-3(marine sediment, NRC), Hg을 제외한 중금속은 PACS-2(marine sediment, NRC)를 시료와 함께 측정하였으며, 각 중금속의 회수율은 As 118%, Cd 99%, Cr 97%, Cu 98%, Fe 100%, Hg 104%, Li 100%, Mn 101%, Pb 84%, Zn 106%였다.

2.2 유기물 및 중금속 오염도 평가

어류 양식장 퇴적물의 유기물 및 중금속 오염도를 평가하기 위하여 최근 국내외 많은 연구자들(Sundaray et al., 2011; Ra et al., 2013; Zhu et al., 2016; Hwang et al., 2019)에 의해 널리 사용되고 있는 퇴적물 기준(sediment quality guidelines; SQGs), 오염부하량지수(pollution load index, PLI), 생태계위해도지수(ecological risk index, ERI)를 이용하였다.

퇴적물 기준(SQGs)의 경우, 유기물은 어장관리법 제11조에 따른 수산생물 서식 어장환경기준(MOF, 2017b)의 TOC, 중금속은 해양환경 보전 및 활용에 관한 법률 제13조에 따른 해양환경기준(MOF, 2018) 중 중금속 7종(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)에 대한 주의기준(threshold effects levels, TEL)을 각 어류 양식장 퇴적물 중 중금속 농도와 비교하여 오염도를 평가하였다. 이때, As, Cd, Cr, Hg, Pb는 퇴적물 중 중금속 농도와 주의기준을 직접 비교하였고, Cu와 Zn은 퇴적물 입자에 따라 농도가 달라지므로 입자크기의 변화를 반영하는 금속(Li)을 사용하여 해양환경기준에서 제시한 보정식으로부터 입도 보정한 농도와 주의기준을 비교하였다(MOF, 2018).

PLI는 퇴적물 중 전체 중금속 농도를 고려한 오염도 평가 방법으로(Tomlinson et al., 1980), 이 연구에서는 중금속 분석 항목 중 지각물질 중에 풍부한 Fe과 퇴적물의 산화·환원 환경에 따라 농도변화가 큰 Mn을 제외한 중금속 7종(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)의 농도와 각 중금속의 배경농도만을 이용하여 다음의 식(1)로부터 PLI를 계산한 후 어류 양식장 퇴적물의 중금속 오염도를 평가하였다.

$$PLI = (CF_{As} \times CF_{Cd} \times CF_{Cr} \times CF_{Cu} \times CF_{Hg} \times CF_{Pb} \times CF_{Zn})^{1/7} \quad (1)$$

여기서 $CF(=C_m/B_m)$ 는 각 중금속의 배경농도(B_m)에 대한 어류 양식장 퇴적물 중 중금속 농도(C_m) 비를 나타내며, 각 중금속의 배경농도로는 최근 Woo et al.(2019)이 보고한 우리나라 연안 퇴적물 중 중금속의 배경농도(As 7.4 mg/kg, Cd 0.134 mg/kg, Cr 46.1 mg/kg, Cu 14.7 mg/kg, Hg 0.016 mg/kg, Pb 25.2 mg/kg, Zn 69.8 mg/kg)를 이용하였다. 일반적으로 PLI 값이 1.0 이상인 경우 중금속에 대하여 오염된 상태(polluted)임을 의미한다.

ERI는 퇴적물 중 전체 중금속 농도가 저서생태계에 미치는 영향을 평가하는 방법으로(Hakanson, 1980), PLI와 마찬가지로 Fe과 Mn을 제외한 중금속 7종의 농도와 각 중금속의 배경농도(Woo et al., 2019), 각 중금속의 생태독성계수를 이용하여 다음의 식(2)와 (3)으로부터 ERI를 계산한 후 어류 양식장 퇴적물 중 중금속에 의한 저서생태계 위해도를 평가하였다.

$$E_{metal} = T_{metal} \times CF \quad (2)$$

$$ERI = E_{As} + E_{Cd} + E_{Cr} + E_{Cu} + E_{Hg} + E_{Pb} + E_{Zn} \quad (3)$$

여기서, CF는 PLI에서의 CF와 같은 의미이고, T_{metal} 은 각 중금속의 독성계수(As = 10, Cd = 30, Cr = 2, Cu = 5, Hg = 40,

Pb = 5, Zn = 1)이다(Wang et al., 2011; Sheykhi and Moore, 2013). ERI는 값에 따라 총 5개의 오염상태로 구분되며, $ERI < 100$ 는 저서생물에 부정적인 생태 영향을 줄 가능성이 낮은 상태(low risk), $100 < ERI < 150$ 는 저서생물에 약간 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(moderate risk), $150 < ERI < 200$ 는 저서생물에 상당한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(considerable risk), $200 < ERI < 300$ 는 저서생물에 매우 심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(very high risk), $300 < ERI$ 는 저서생물에 극심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(disastrous risk)를 나타낸다(Zhang et al., 2012).

3. 결과 및 고찰

3.1 표층 퇴적물의 유기물 농도

통영-거제 연안 어류 양식장 표층 퇴적물 중 유기물 함량 특성을 나타내는 TOC와 TN의 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다. TOC와 TN의 농도는 각각 11.8-31.8 mg/g(평균 22.7±4.6 mg/g)과 1.70-4.68 mg/g(평균 3.35±0.77 mg/g) 범위였다. 대부분의 양식장에서 TOC는 20 mg/g, TN은 3.0 mg/g 이상의 높은 농도를 보였으며, 특히, 거제도(둔덕면)와 한산도 북쪽의 화도사이의 좁은 수로 사이에 위치한 양식장들(G2, G3, G4, G5)에서 다른 양식장들에 비해 상대적으로 높았다. 또한, 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물 중 TOC와 TN의 농도는 우리나라 연안에서 퇴적물 오염이 심각하다고 알려진 마산항(Hwang et al., 2006)과 비슷하고, 우리나라 남해안의 살포식 패류(주로 피조개, 새꼬막) 양식해역인 여자만(Choi et al., 2013)과 진주만(Lee et al., 2020), 수하식 패류(주로 굴) 양식해역인 한

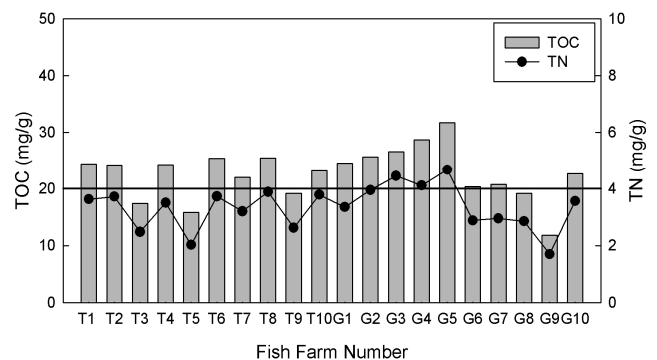


Fig. 2. Concentrations of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) with each station in surface sediments from a fish farming area in Tongyoung-Geoje coast of Korea. The solid line indicates the quality guidelines for TOC concentration in the sediment of aquaculture zone suggested by MOF (2017b).

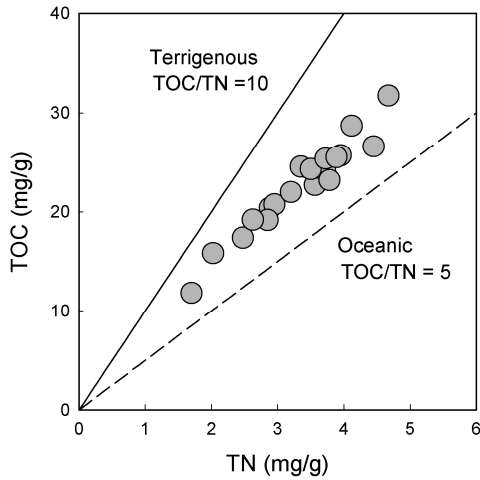


Fig. 3. Plot of total nitrogen (TN) versus total organic carbon (TOC) in surface sediments from a fish farming area in Tongyoung-Geoje coast of Korea.

산·거제만(MIFAFF, 2009), 고성만(Lee et al., 2017), 자란만(Hwang et al., 2018) 보다 약 1.2~3.1배 높았다(Table 1).

어류 양식장 퇴적물의 유기물 기원을 알아보기 위하여 TOC에 대한 TN의 비(C/N ratio)를 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 C/N 비가 10 이상이면 인근 육상으로부터 유입된 육상기원성 유기물이고, C/N 비가 5-10 사이이면 해양 내 생물체에 의해 생성된 해양기원성 유기물임을 의미한다(Stein, 1991; Hyun et al., 2003; Lee et al., 2020). 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물 중 C/N 비는 5.98-7.81(평균 6.82±0.42) 범위로 모든 양식장에서 5-10 사이를 나타내어 해양기원성 유기물이 우세하며, 이러한 결과는 수층에 위치한 어류 양식장으로부터 침강하는 어류사체나 먹이(특히 생사료), 어류 배설물 등의 영향 때문인 것으로 생각된다.

3.2 표층 퇴적물의 중금속 농도

통영-거제 연안 어류 양식장 표층 퇴적물 중 중금속 농도를 Fig. 4에 나타내었다. 중금속 농도는 As 8.2-14.3 mg/kg(평균 10.5±1.8 mg/kg), Cd 0.09-1.86 mg/kg(평균 0.37±0.40 mg/kg), Cr 69.7-94.1 mg/kg(평균 82.9±5.8 mg/kg), Cu 39-533 mg/kg(평균 127±116 mg/kg), Fe 3.52-4.70%(평균 4.19±0.31%), Hg 0.024-0.113 mg/kg(평균 0.041±0.019 mg/kg), Mn 432-990 mg/kg(평균 596±119 mg/kg), Pb 34.2-44.4 mg/kg(평균 39.5±2.8 mg/kg), Zn 126-261 mg/kg(평균 175±36 mg/kg) 범위였다. As, Cr, Fe, Mn, Pb, Zn은 각 양식장별로 큰 차이를 보이지 않았으나, Cd, Cu, Hg은 양식장별로 50% 이상의 큰 차이를 나타내었다. 공간적으로 통영 미륵도와 곤리도 사이에 위치한 양식장(T3)과 거제도(둔덕면)와 한산도 북쪽의 화도사이의 좁은 수로 사이에 위치한 양식장들(G1, G2)에서 다른 양식장들에 비해 상대적으로 높았다.

또한, 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물 중금속 농도는 조사대상 양식장과 인접한 수하식 패류(주로 굴) 양식장이 밀집해 있는 한산·거제만(Hwang et al., 2015), 고성만(Lee et al., 2017), 자란만(Hwang et al., 2018)과 살포식 패류(주로 새꼬막) 양식장이 밀집해 있는 강진만(Choi et al., 2015)과 진주만(Lee et al., 2020)에 비해 As, Cr, Fe, Mn의 농도는 비슷하거나 낮은 반면, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn은 높았으며, 특히, Cd과 Cu는 약 3배 이상 높은 농도를 보였다(Table 2). 이로 인해 어류 양식장 퇴적물의 중금속의 잔류패턴은 Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Pb>As>Cd>Hg 순으로 연구해역 인근의 거제·한산만 및 고성만(Fe>Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>As>Cd>Hg)과 자란만, 강진만, 진주만(Fe>Mn>Zn>Cr>Pb>Cu>As>Cd>Hg)의 퇴적물 중 중금속 잔류패턴과 약간의 차이를 보였다. 일반적으로 중금속은 해수 보다는 수산생물의 체내에서 높은 농도로 존재하고, 특히 Cu는 Zn, Fe과 함께 생물필수원소로서 어

Table 1. Range and mean of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) concentrations in Korean coastal sediments

Study region	TOC (mg/g)		TN (mg/g)		Reference
	Range	Mean	Range	Mean	
Masan Harbor	12.0-32.0	23.0	1.0-2.8	2.0	Hwang et al. (2006)
Hansan-Geoje Bay	12.9-27.6	18.7	1.7-3.7	2.4	MIFAFF (2009)
Yeoja Bay	4.3-12.1	8.4	0.5-1.5	1.1	Choi et al. (2013)
Goseong Bay	14.5-21.9	18.3	2.0-3.0	2.5	Lee et al. (2017)
Jaran Bay	15.1-23.9	17.4	2.0-3.3	2.3	Hwang et al. (2018)
Jinju Bay	9.1-15.7	13.3	1.4-2.4	2.0	Lee et al. (2020)
Tongyoung-Geoje coast (Fish farming area)	11.8-31.8	22.7	1.7-4.7	3.4	This study
Sediment quality guideline, Korea	20.0				MOF (2017b)

통영-거제 연안 어류 양식장 표층 퇴적물 중 유기물 및 중금속 오염 평가

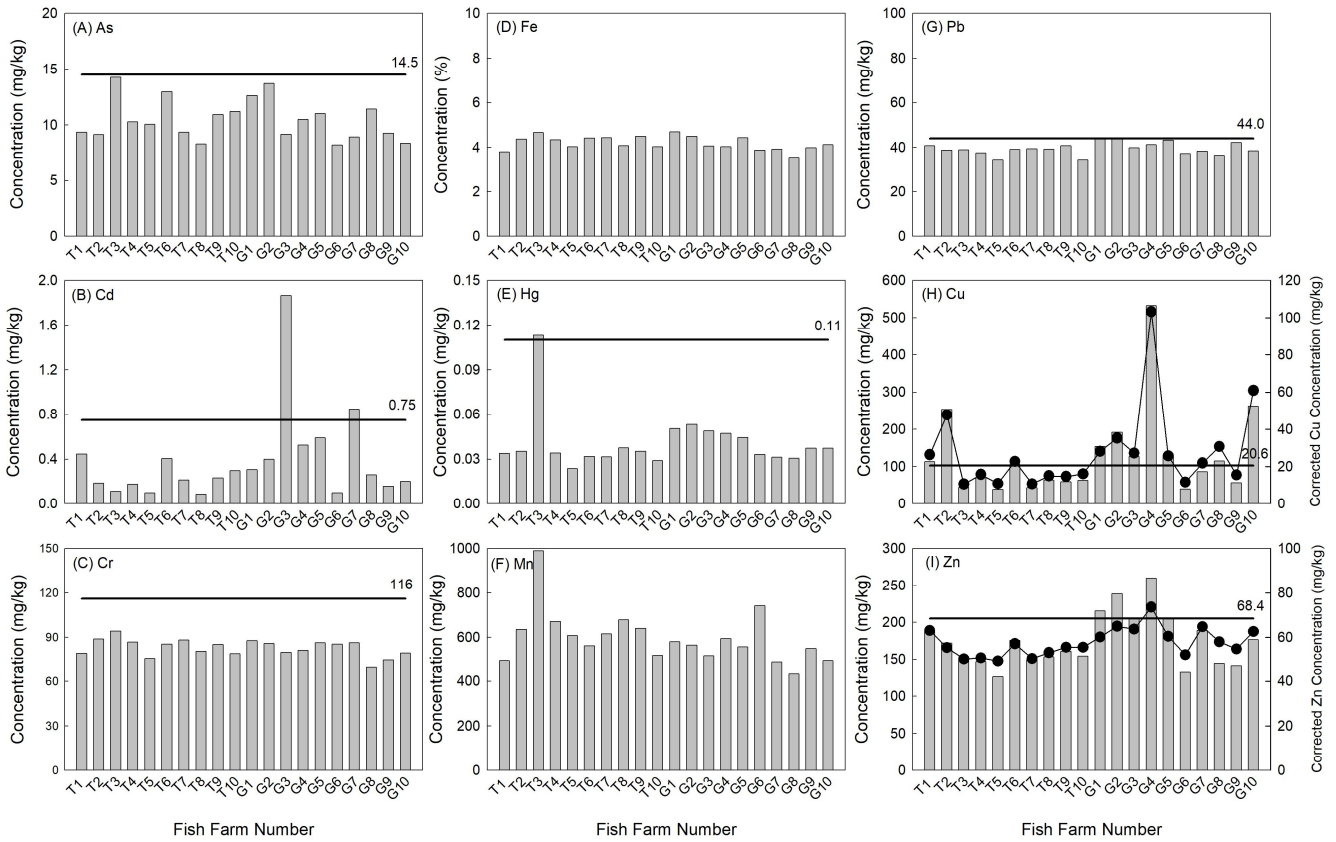


Fig. 4. Concentrations of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) in surface sediments from a fish farming area in Tongyoung-Geoje coast of Korea. The circle and straight lines in Figs. H and I represent the concentrations of Cu and Zn corrected by Li concentrations in surface sediment of each fish farm and the solid lines indicate the quality guidelines of metal concentrations in Korean coastal sediment suggested by MOF (2018).

류의 가식부(muscle) 및 내장(특히 liver)에서 다른 중금속에 비해 농도가 높은 것으로 알려져 있다(Türkmen et al., 2009; Yilmaz et al., 2010; El-Moselhy et al., 2014; Hwang et al., 2017). 또한, 최근 Hwang(2015)은 조사대상 양식장 인근의 한산-거제만 연안에 서식하는 어류의 조직내 중금속을 분석한 결과, 내장(intestine)에서 As, Cd, Cu, Pb, Zn의 농도가 다른 조직들(muscle, scale, skin)에 비해 높은 농도를 보인다고 보고한 바 있다. 따라서, 이러한 결과는 앞서 유기물과 마찬가지로 수층에 위치한 어류 양식장으로부터 침강하는 어류의 사체(특히 내장)나 먹이(특히 생사료) 등의 영향 때문인 것으로 생각되며, 중금속 잔류특성에 대한 보다 명확한 원인을 밝히기 위해서 높은 농도를 보이는 양식장의 양식어류의 조직(근육, 내장 등), 먹이(특히 생사료), 어류 배설물 등 오염원에 대한 추가적인 중금속 조사를 할 필요가 있다.

3.3 퇴적물 유기물 및 중금속 오염도

통영-거제 연안 어류 양식장 표층 퇴적물의 유기물과 중

금속 오염상태를 파악하기 위하여 앞서 2.2절의 3가지 평가 방법(SQGs, PLI, ERI)을 활용하여 오염도를 살펴보았다.

먼저, SQGs의 경우, 유기물은 퇴적물에 대한 수산생물 서식 어장환경기준 중 TOC 기준(20 mg/g, MOF, 2017b)과 각 양식장 퇴적물 중 TOC 농도를 비교해 보았다. 그 결과, 조사대상 20개 양식장 중 75%인 15개 양식장 퇴적물(T1, T2, T4, T6-T8, T10, G1-G7, G10)에서 어장환경기준을 초과하였다(Fig. 2). 이는 인접한 수하식 패류(주로 굴) 양식해역인 한산·거제만(MIFAFF, 2009), 고성만(Lee et al., 2017), 자란만(Hwang et al., 2018) 퇴적물 중 TOC 기준을 초과하는 비율(6-25%) 보다 3배 이상 더 높다. 따라서, 통영-거제 연안 어류 양식장 대부분의 퇴적물은 유기물에 대해 오염된 상태이고, 인접한 수하식 패류 양식해역보다 오염도가 높은 것으로 파악되었다.

중금속은 해저퇴적물에 대한 해양환경기준 중 본 연구에서 측정하지 않은 Ni을 제외한 중금속 7종에 대한 TEL(As 14.5 mg/kg, Cd 0.75 mg/kg, Cr 116 mg/kg, Cu 20.6 mg/kg, Hg 0.11 mg/kg, Pb 44 mg/kg, Zn 68.4 mg/kg; MOF, 2018)과 각 어류 양

식장 퇴적물 중 중금속 농도를 서로 비교하였다. 여기서, Cu와 Zn은 각 양식장 퇴적물 중 Li 농도(70.7-95.4 mg/kg, 평균 84.2 mg/kg)로 보정한 Cu(10.6-104 mg/kg, 평균 27.5 mg/kg)와 Zn(49.3-73.6 mg/kg, 평균 57.7 mg/kg) 농도를 기준농도와 비교하였다. 그 결과, Cu는 조사대상 20개 양식장 중 55%인 통영연안의 3개 양식장(T1, T2, T6)과 거제연안의 8개(G1-G5, G7, G8, G10) 양식장 퇴적물에서 TEL을 초과하였다(Fig. 4H). 그러나, Pb는 거제연안의 G1과 G2, Cd는 거제연안의 G3와 G7, Hg는 통영연안의 T3, Zn은 거제연안의 G4 양식장에서 각각 TEL을 초과할 뿐 그 외 양식장은 TEL 미만이었으며, 특히 As, Cr은 조사대상 모든 양식장에서 TEL 미만이었다(Fig. 4). 따라서, 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물은 다른 중금속에 비해 Cu의 오염도가 높은 것으로 파악되었다.

통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물 중 중금속 7종(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)의 농도와 이들 중금속에 대한 우리나라 연안 퇴적물 중의 배경농도 및 생태독성계수를 식(1)~(3)에 대입하여 각 양식장별 PLI와 ERI 값을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

PLI는 1.4-3.5(평균 2.3) 범위로 각 양식장별로 큰 오염도 차이를 보였으며, 모든 양식장에서 1.0을 초과하여 중금속에 대해 오염된 상태(polluted)인 것으로 나타났다(Fig. 5a). 양식장별로 오염도에 영향을 주는 중금속의 차이는 있으나, 대부분의 양식장에서 해양환경기준을 초과한 Cu의 기여도가 가장 크고, 다음으로 Cd, Hg, Zn의 순으로 높은 기여도를 보였다. 공간적으로 거제도(둔덕면)와 한산도 북쪽의 화도사이의 좁은 수로 사이에 위치한 양식장들(G1-G5)에서 2.7 이상의 높은 PLI를 보여 다른 양식장에 비해 퇴적물의 중금속 오염도가 높았다(Fig. 5a). 또한, 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물은 인접한 한산·거제만(1.3-1.8, 평균 1.6; Hwang et al.,

2015)과 고성만(1.4-2.1, 평균 1.7; Lee et al., 2017), 자란만(1.3-1.8, 평균 1.6; Hwang et al., 2018), 진주만(1.2-1.7, 평균 1.5; Lee et al., 2020) 퇴적물에서 조사된 PLI값 보다 30-60% 정도 높고, 남해서부 연안의 반폐쇄적인 내만인 가막만, 여자만, 득량만, 도암만, 함평만 퇴적물에서 조사된 PLI 값(0.6-1.3, 평균 1.0; Koo et al., 2019)보다는 약 3배 이상 높았다.

ERI는 120-610(평균 258) 범위로 PLI와 유사하게 각 양식장별로 큰 오염도 차이를 보였다(Fig. 5b). 양식장별로 오염도에 영향을 주는 중금속에 있어서 다소 차이는 있으나 PLI와 달리 전체적으로 가장 큰 독성계수를 가지는 Hg의 기여도(평균 42.5%)가 가장 크고, 다음으로 Cd(평균 28.8%), Cu(평균 16.2%), As(평균 6.3%)의 순으로 높은 기여도를 보였다. 공간적으로 통영연안의 T5와 거제연안의 G6 양식장에서 각각 120과 142로서 저서생물에 약간 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(moderate risk)인 것으로 파악되었고, 통영연안의 T4와 T7-T10, 거제연안의 G9 양식장은 160~189 사이를 보여 저서생물에 상당한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(considerable risk)였다. 통영연안의 T1, T2, T6와 거제연안의 G1, G8, G10 양식장은 201-279 사이로 저서생물에 매우 심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(very high risk)였으며, 특히 통영연안의 T3와 거제연안의 G2-G5, G7 양식장은 318-609로서 저서생물에 극심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(disastrous risk)를 나타내었다. 이러한 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물 중의 중금속에 대한 ERI 결과는 최근 한산·거제만(104-204, 평균 142; Hwang et al., 2015), 고성만(112-239, 평균 157; Lee et al., 2017), 자란만(101-202, 평균 146; Hwang et al., 2018), 진주만(109-164, 평균 139; Lee et al., 2020) 퇴적물에서 조사된 ERI값 보다 60-90% 정도 높고, 남해서부 연안의 반폐쇄적인 내만인 가막만, 여자만, 득량만,

Table 2. Mean concentrations of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) in surface sediments of the southeastern coast, Korea. The Cu and Zn concentrations in parenthesis are mean concentrations of Cu and Zn corrected by Li concentration in the surface sediment of fish farming area around Tongyoung-Geoje coast

Study region	Metal (%)				Metal (mg/kg)					Reference
	Fe	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Pb	Zn	
Hasan-Geoje Bay	3.4	10.3	0.12	89	38	0.03	651	30	140	Hwang et al. (2015)
Goseong Bay	4.4	11.2	0.15	82	38	0.03	1089	27	159	Lee et al. (2017)
Jaran Bay	4.0	9.8	0.15	78	31	0.03	673	40	146	Hwang et al. (2018)
Gangjin Bay	4.0	10.5	0.11	82	27	0.03	1019	33	157	Choi et al. (2015)
Jinju Bay	3.7	11.2	0.10	73	24	0.03	953	34	130	Lee et al., (2020)
Tongyoung-Geoje coast (Fish farming area)	4.2	10.5	0.37	83	127 (27.5)	0.04	596	39	175 (57.7)	This study
Background, Korea		7.4	0.13	46	15	0.02		25	70	Woo et al. (2019)
Threshold effects levels		14.5	0.75	116	20.6	0.11		44	68.4	MOF (2018)

통영-거제 연안 어류 양식장 표층 퇴적물 중 유기물 및 중금속 오염 평가

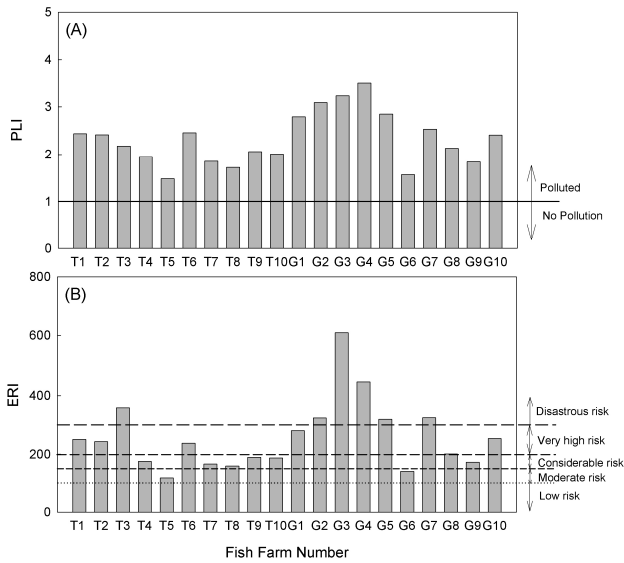


Fig. 5. The bars showing the calculated PLI (A) and ERI (B) values of each fish farm in Tongyoung-Geoje coast of Korea. The solid and dotted lines represent the boundary values for classifying the pollution level of heavy metals in the sediment.

강진만, 함평만 퇴적물에서 조사된 ERI값(61-118, 평균 85; Koo et al., 2019)보다는 약 3배 이상 높았다.

이상의 퇴적물 오염평가를 종합해 보면, 통영-거제 연안 어류 양식장 퇴적물은 인접한 주변의 수하식 혹은 살포식 패류 양식해역이나 남서해안의 반폐쇄적인 내만 보다 유기물 및 중금속 오염도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 중금속 오염도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 대부분의 양식장에서 TEL을 초과한 Cu와 비록 TEL을 초과하지는 않았으나, 다른 해역에 비해 상대적으로 높은 농도를 보이는 Cd, Hg 등 유해 중금속 때문인 것으로 나타났다. 특히, 이들 유해 중금속으로 인해 일부 어류 양식장 퇴적물은 저서생물에 극심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(disastrous risk)인 것으로 파악되었다.

4. 결론

우리나라 남동해안의 통영-거제 연안 어류 양식장을 대상으로 퇴적물 중 유기물 및 중금속 오염현황을 살펴보았다. 어류 양식장 퇴적물은 인접한 패류양식 해역이나, 남해안의 반폐쇄적인 내만 해역보다 높은 유기물 및 중금속 오염도를 보였다. 이러한 퇴적물의 유기물 및 중금속 오염은 상부층에 성행하는 어류 양식장과 밀접한 관련이 있으며, 주로 양식활동에 의해 발생하는 부산물(어류의 사체나 배설물, 먹이

(주로 생사료) 등) 때문인 것으로 생각된다. 대부분의 어류 양식장 퇴적물에서 Cu가 국내 해저퇴적물의 중금속에 대한 해양환경기준인 주의기준(TEL)을 초과하고, 일부 어류 양식장은 Cd, Hg 등 유해 중금속의 농도가 상대적으로 높아 저서생물에 극심한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태(disastrous risk)인 것으로 파악되었다. 본 연구대상인 어류 양식장이 위치한 통영-거제 연안은 1970년대부터 연안 수산자원의 보호 및 육성을 위해 지정한 수산자원보호구역(fishery resource protected area)일 뿐만 아니라 수출용 패류생산해역으로 지정될 만큼 수산학적으로 가치가 매우 높다. 그러므로, 지속적인 양식어장의 이용과 양식어류의 중금속에 대한 안전성 확보를 위해 유기물 및 중금속에 오염된 어류 양식장 퇴적환경을 복원하고 과학적인 자료에 기초한 어류 양식장의 체계적인 관리계획의 수립과 이행이 요구된다. 아울러, 어류 양식장 퇴적물 중의 유기물 및 중금속 오염에 대한 명확한 원인 구명을 위해서는 양식생물 및 저층으로 침강하는 어류의 배설물과 먹이 등의 침강물에 대한 유기물 및 중금속 특성과 안정동위원소를 이용한 유기물 및 중금속의 기원 연구 등 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

이 논문의 완성도를 높이기 위해 세심하게 검토해 주신 익명의 심사위원분들께 감사드립니다. 이 논문은 2021년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2021059)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- [1] Choi, M., H. C. Kim, D. W. Hwang, I. S. Lee, Y. S. Kim, Y. J Kim, and H. G. Choi(2013), Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeoja Bay and Gangjin Bay, Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 46, pp. 424-436.
- [2] Choi, M., I. S. Lee, D. W. Hwang, H. C. Kim, S. P. Yoon, S. Yun, C. S. Kim, and I. S. Seo(2017), Organic enrichment and pollution in surface sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with dense oyster farms, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 50, pp. 777-787.
- [3] Choi, M., I. S. Lee, H. C. Kim, and D. W. Hwang(2015), Distribution and contamination status of trace metals in surface sediments of shellfish farming areas in Yeoja and Gangjin Bays, Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 48, pp. 789-797.

- [4] Choi, M. S., J. H. Chun, H. J. Woo, and H. I. Yi(1999), Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake, Journal of the Korean Environment Science of Society, Vol. 8, pp. 593-600.
- [5] Cranford, P. J., B. T. Hargrave, and L. I. Doucette(2009), Benthic organic enrichment from suspended mussel (*Mytilus edulis*) culture in Prince Edward Island, Canada, Aquaculture, Vol. 292, pp. 189-196.
- [6] El-Moselhy, Kh. M., A. I. Othman, H. Abd. El-Azem, and M. E. A. El-Metwally(2014), Bioaccumulation of heavy metals in some tissues of fish in the Red Sea, Egypt, Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 1, No. 2, pp. 97-105.
- [7] Fang, T. H. and E. Hong(1999), Mechanisms influencing the spatial distribution of trace metals in surficial sediments off the south-western Taiwan, Marine Pollution Bulletin, Vol. 38, No. 11, pp. 1026-1037.
- [8] FAO(2016), The state of world fisheries and aquaculture 2016: Contributing to food security and nutrition for all, Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, p. 200.
- [9] Hakanson, L.(1980), An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach, Water Research, Vol. 14, pp. 975-1001.
- [10] Holmer, M., D. Wildish, and B. T. Hargrave(2005), Organic enrichment from marine finfish aquaculture and effects on sediment biogeochemical processes. In:Hargrave B. T. (ed) environment effects of marine finfish aquaculture. Springer, Berlin, pp 181-206.
- [11] Hwang, D. W., H. G. Jin, S. S. Kim, J. D. Kim, J. S. Park, and S. G. Kim(2006), Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan Harbor, Korea, Journal of the Korean Fisheries Society, Vol. 39, pp. 106-117.
- [12] Hwang, D. W., I. S. Lee, M. Choi, and J. H. Shim(2015), Distribution of organic matter and trace metal concentrations in surface sediments around the Hansan-Geoje Bay, Journal of the Korean Society for Environmental Analysis, Vol. 18, pp. 131-143.
- [13] Hwang, D. W., P. J. Kim, S. G. Kim, C. I. Sun, B. S. Koh, S. O. Ryu, and T. H. Kim(2019), Spatial distribution and pollution assessment of metals in intertidal sediments, Korea, Environmental Science and Pollution Research, Vol. 26, pp. 19379-19388.
- [14] Hwang, D. W., S. S. Kim, S. G. Kim, D. S. Kim, and T. H. Kim(2017), Concentrations of heavy metals in marine wild fishes captured from the southern sea of Korea and associated health risk assessments, Ocean Science Journal, Vol. 52, No. 4, pp. 527-536.
- [15] Hwang, H.(2015), Concentrations of trace metals in fish tissues from Hansan-Geoje Bay, Korea, Master Thesis, Pusan National University, p. 58.
- [16] Hwang, H., D. W. Hwang, G. Lee, H. C. Kim, and J. N. Kwon(2018), Distributions of organic matter and heavy metals in the surface sediment of Jaran Bay, Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 1, pp. 78-91.
- [17] Hyun, S., T. Lee, J. S. Choi, D. L. Choi, and H. J. Woo(2003), Geochemical characteristics and heavy metal pollutions the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea, The Sea-Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 8, pp. 380-391.
- [18] Jeon, S. B., P. J. Kim, S. S. Kim, J. S. Ju, Y. H. Lee, D. S. Jang, J. U. Lee, and S. Y. Park(2012), Characteristics of spatial distribution of geochemical components in the surface sediments of the Deukryang Bay, Journal of the Korean Society for Environmental Analysis, Vol. 15, pp. 203-214.
- [19] Kim, P. J., S. G. Shon, S. Y. Park, S. S. Kim, S. J. Jang, S. B. Jeon, and J. S. Ju(2012), Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surface sediment of the Gamak Bay, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 18, pp. 67-83.
- [20] Koo, J. H., G. Lee, H. Hwang, J. B. Kim, S. S. Kim, and D. W. Hwang(2019), Distribution of organic matter and heavy metals in the surface sediments from fishery resources protection areas in the southwestern coast of Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 25, pp. 666-677.
- [21] Lee, G., D. W. Hwang, H. Hwang, J. H. Park, H. C. Kim, and J. N. Kwon(2017), Distribution and pollution status of organic matter and heavy metals in surface sediment around Goseong Bay, a shellfish farming area, Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 23, pp. 699-709.
- [22] Lee, G., H. Hwang, J. B. Kim, and D. W. Hwang(2020), Pollution Status of surface sediment in Jinju Bay, a spraying shellfish farming area, Korea, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 4, pp. 392-402.
- [23] Lee, W. C., Y. S. Cho, S. J. Hong, H. C. Kim, J. B. Kim,

- and S. M. Lee(2011), Estimation of ecological carrying capacity for oyster culture by ecological indicator in Goeje-Hansan Bay, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 17, pp. 315-322.
- [24] Lim, D. I., S. W. Jung, M. S. Choi, S. M. Kang, H.S. Jung, and J. Y. Choi(2013), Historical record of metal accumulation and lead source in the southeastern coastal region of Korea, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 74, pp. 441-445.
- [25] MIFAFF(2009), Status investigation of fishery environment in 2008, Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF), Report No 11-1541370-000085-01, p. 243.
- [26] MOF(2017a), Statistical yearbook of Oceans & Fisheries in 2017, Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Report No. 11-1192000-000071-10, p. 500.
- [27] MOF(2017b), Quality guidelines for habitat environment of marine biota in Korea, Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Notification No. 2017-109, p. 1.
- [28] MOF(2018), Quality guidelines for marine environment in Korea, Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Notification No. 2018-10, p. 10.
- [29] MOF(2020), Statistical yearbook of Oceans & Fisheries in 2020, Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), Report No. 11-1192000-000071-10, p. 502.
- [30] Naser, H. A.(2013), Assessment and management of heavy metal pollution in the marine environment of the Arabian Gulf: A review, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 72, pp. 6-13.
- [31] Ra, K., E. S. Kim, K. T. Kim, J. K. Kim, J. M. Lee, and J. Y. Choi(2013), Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea, *Journal of Coastal Research*, Vol. 65, pp. 105-110.
- [32] Ruilian, Y., Y. Xing, Z. Yuanhui, H. Gongren, and T. Xianglin(2008), Heavy metal pollution in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 20, pp. 664-669.
- [33] Sheykhi, V. and F. Moore(2013), Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor river southwest Iran, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 185, pp. 3219-3232.
- [34] Silva, C., E. Yáñez, M. L. Martín-Díaz, I. Riba, and T. A. DelValls(2013), Integrated ecotoxicological assessment of marine sediments affected by land-based marine fish farm effluents: physicochemical, acute toxicity and benthic community analyses, *Ecotoxicology*, Vol. 22, pp. 996-1011.
- [35] Soares, H. M. V. M., R. A. R. Boaventura, A. A. S. C. Machado, and J. C. G. Esteves da Silva(1999), Sediment as monitors of heavy metal contamination in Ave River basin(Portugal): multivariate analysis of data, *Environmental Pollution*, Vol. 105, No. 3, pp. 311-323.
- [36] Stein, R.(1991), Accumulation of organic carbon in marine sediments, Springer Verlag, Berlin, pp. 1-217.
- [37] Sundaray, S. K., B. B. Nayak, S. Lin, and D. Bhatta(2011), Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments - A case study: Mahanadi basin, India, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 186, pp. 1837-1846.
- [38] Tomassetti, P., E. Persia, I. Mercatali, D. Vani, V. Marusso, and S. Porrello(2009), Effects of mariculture on macrobenthic assemblages in a western mediterranean site. community analyses, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 58, pp. 533-541.
- [39] Tomlinson, D. L., J. G. Wilson, C. R. Harris, and D. W. Jeffrey(1980), Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters*, Vol. 33, pp. 566-575.
- [40] Türkmen, M. A. Türkmen, Y. Tepe, Y. Töre, and A. Ates(2009), Determination of metals in fish species from Aegean and Mediterranean seas, *Food Chemistry*, Vol. 113, pp. 233-237.
- [41] Vezzulli, L., M. Moreno, V. Marin, E. Pezzati, M. Bartoli, and M. Fabiano(2008), Organic waste impact of captured-based Atlantic bluefin tuna aquaculture at an exposed site in the Mediterranean Sea, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 78, pp. 369-384.
- [42] Wang, Y., Z. Yang, Z. Shen, Z. Tang, J. Niu, and F. Gao(2011), Assessment of heavy metals in sediments from a typical catchment of the Yangtze River, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 172, 407-417.
- [43] Woo, J. S., H. J. Lee, J. K. Park, K. K. Park, D. J. Cho, D. J. Jang, S. J. Park, M. S. Choi, and J. K. Yoo(2019), Background concentration and contamination assessment of heavy metals in Korean coastal sediments, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 24, pp. 64-78.
- [44] Yilmaz, A. B., M. K. Sangin, D. Yağlıoğlu, and C. Turan(2010), Metals (major, essential to non-essential) composition of the different tissues of three demersal fish species from İskenderun Bay, Turkey, *Food Chemistry*, Vol. 123, pp. 410-415.
- [45] Zhang, W., X. Liu, H. Cheng, E. Y. Zeng, and Y. Hu(2012), Heavy metal pollution in sediments of a typical mariculture

zone in South China, Marine Pollution Bulletin, Vol. 64, pp. 712-720.

- [46] Zhu, Z., J. Xue, Y. Deng, L. Chen, and J. Liu(2016), Trace metal contamination in surface sediments of intertidal zone from Qinhuangdao, China, revealed by geochemical and magnetic approaches: Distribution, sources, and health risk assessment, Marine Pollution Bulletin, Vol. 105, pp. 422-429.

Received : 2021. 05. 20.

Revised : 2021. 06. 24.

Accepted : 2021. 06. 28.