

서해연안 패류의 성분원소 함량 및 퇴적물의 지화학적 특성

최운석, 송재희, 박광재, 윤상필, 정상옥, 안경호

국립수산과학원 갯벌연구소

Contents of Inorganic Elements in Shellfish and Geochemical Characteristics of Surface sediments on the West Coast of Korea

Yoon Seok Choi, Kwang Jae Park, Jae Hee Song, Sang Pil Yoon, Sang Ok Chung and
Kyoung Ho An

Tidal Flat Research Institute, NFRDI, Kunsan 573-882, Korea

ABSTRACT

In order to evaluate the relationship of between the contents of inorganic elements in shellfish and surface sediments, we measured the concentration of inorganic elements (As, Ca, Cd, Cr, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Zn) in various shellfish and surface sediments of research area. The enrichment factor (EF) and the index of accumulation rate (Igeo) of the metals showed that the research areas can be classified as moderately polluted, or unpolluted. And also we measured the geochemical characteristics of surface sediments (grain size, chemical oxygen demand (COD), ignition loss (IL) and acid volatile sulfide (AVS)). The grain sizes for research areas of surface sediment were similar the ratio of silt and clay in comparison with other sites. The COD and IL in surface sediment ranged from 5.41 to 14.06 mg/g. d.w. (mean 8.78 ± 3.16 mg/g d.w.) and from 0.92 to 3.17% (mean $2.08 \pm 0.86\%$), respectively. Significant differences in metal concentrations also were determined in the shellfish tissue among the different sites. However, except for metals (Mn, Zn), which showed some elevation of concentrations, the variations in the shellfish tissue were not related to variations in the sediment.

Key words: Shellfish, Inorganic elements, Metal, Surface sediments, Enrichment factor, Geoaccumulation index

서론

서해 연안은 조수 간만의 차가 크고 갯벌이 발달되어 있어 패류양식에 적합한 조건을 가지고 있다. 특히 바지락, 굴, 가무락, 백합 등의 패류양식은 1980년 이후에 시작되어 갯벌어장에서 최고 생산량을 기록하며 생산성이 향상되어 왔지만, 갯벌양식어장 주변의 공장건립, 인간의 생활하수 등에 의한 갯벌어장 오염과 연안의 간척과 매립으로 환경이 변화하면서 갯벌어장의 연안퇴적물이 가지고 있는 지화학적 특성이 변화되어 왔다 (Kim *et al.*, 2009). 이에 따라 갯벌어장의 오염도가 증가하고, 서식 생물도 영향을 받아 갯벌어장의 생산성이 저하되고 있다.

갯벌어장의 환경오염도 측정은 지화학적 평가방법 외에 서식생물의 환경정화 능력을 이용하는 방법도 개발되어 어장평가 방법으로 사용하고 있다. 이러한 생물을 이용한 평가방법으로 (Lee *et al.*, 2006) 은 갯벌생태계의 현탁물을 섭식 (suspension-feeding) 하여 성장하는 바지락에서 중금속을 농축 및 축적하는 특이 단백질 (metallothionein, MT) 을 환경오염의 지표물질로 사용하여 중금속에 의한 환경오염을 측정하는 방법의 가능성을 보고하였다. 한편 (Ahn *et al.*, 2006) 은 갯벌 조간대에서 서식하는 바지락의 지역별 중금속 농축과 퇴적물 내 중금속 농도를 조사한 결과, 일부 중금속들의 경우 패류가 서식하는 퇴적물과 바지락의 중금속 농도 사이에 유의한 상관관계가 관찰되어 서식지 퇴적물의 농도가 바지락의 농축 농도에 반영을 주는 것으로 나타났다.

그러므로 갯벌양식어장에서 갯벌 퇴적물의 지화학적 특성과 서식하는 패류의 무기원소 및 중금속의 함량 분포는 갯벌에서 서식하는 생물들의 생태계에 영향을 미치고 서식생물들을 섭식하는 인간에게도 적지 않은 영향을 끼칠 수 있다 (Cho *et al.*, 2009, Jeon *et al.*, 2002). 따라서 연안생태계의 환경과 서식

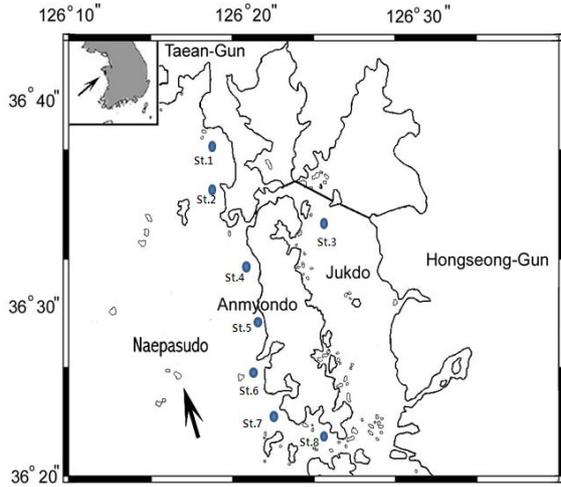


Fig. 1. A map showing the study area and the sampling sites for analysing the surface sediments and shellfish.

하는 패류의 연관성을 조사하기 위하여 연안개발이 되지 않은 비교적 자연성을 유지하고 있는 곳을 연구지역으로 선정하였으며, 갯벌의 표층퇴적물과 서식하는 패류를 채취하여 퇴적물과 가식부위의 무기원소 함유량 및 중금속 함유량을 조사하였다 (Kim *et al.*, 1997). 본 연구에서는 서해연안 표층퇴적물의 지화학적 특성에 따른 오염 정도를 조사하였고 갯벌어장에서 서식하는 패류의 성분원소 및 중금속 함량을 조사하였고, 퇴적물 내에 농축되기 쉬운 중금속들 중에서 몇 종의 원소를 선택하여 중금속에 대한 부화지수 Enrichment Factor (EF), 농집지수 Geoaccumulation index (Igeo) 를 계산하여 퇴적물과 서식하는 패류의 중금속 농도의 상관관계를 조사하였다.

재료 및 방법

서해연안의 표층퇴적물과 패류는 조사점 (Fig. 1) 과 같이 조간대가 형성되어 있어 패류양식을 하고 있는 지역으로 시료는 현장에서 채취하여 즉시 냉장보관함에 담아 실험실로 옮긴 후 해양환경공정시험기준 (국토해양부, 2010) 에 따라 퇴적물 입도, 유기물 함량, 함수율, 화학적 산소요구량 및 황화물을 조사하여 퇴적물의 건강상태를 평가하였다.

퇴적물의 평균입도 분석 (Mean grain size) 은 채취한 시료를 약 20 g 정도 취하여 이온교환수를 이용하여 염분을 제거한다. 그리고 입자의 확산을 위해 10% 과산화수소 (H_2O_2) 와 0.1 N 염산 (HCl) 을 넣어 유기물과 탄산염 ($CaCO_3$) 을 완전히 제거하였다. 그리고 표준체를 이용한 체질방법과 Stokes의 침전속도를 적용한 피펫방법으로 분석하였으며 (Folk, 1968) 결과의 해석은 Folk (1968) 와 McBride (1971) 의 방법에 따라 처리하였다.

함수율 (Water Content) 은 미리 무게를 측정된 도가니에 퇴적물 시료 약 20 g을 담아 건조기에서 110°C로 24시간 가열한 후 데시케이터 안에서 실온으로 식혀 도가니의 무게를 측정한다. 그리고 강열감량 (Ignition Loss) 은 도가니를 전기로에 넣고 550°C에서 4시간 가열한 후 데시케이터 안에서 방냉하여 도가니의 무게를 측정한 후 그 무게차이로 계산하였다.

퇴적물의 화학적산소요구량 (Chemical Oxygen Demand) 는 먼저 습시료 약 1 g의 무게를 취하여 250 mL 삼각플라스크에 넣고 0.1 N $KMnO_4$ 100 mL와 10% NaOH 5 mL를 넣고 잘 흔든 다음, 시료와 시약이 담긴 플라스크를 끓는 물에서 1 시간 동안 중탕하였다. 그 후 실온으로 냉각한 후 10% KI 10 mL와 4% $NaNO_3$ 한 방울을 넣은 다음, 증류수를 가해 500 mL로 만든다. 그리고 유리섬유 여과지로 여과한 후, 여과용액 100 mL를 30% H_2SO_4 2 mL를 넣고 잘 흔든 다음 0.1 N $Na_2S_2O_3 \cdot H_2O$ 용액으로 적정하여 분석하였다.

그리고 무기원소 분석을 위한 시료의 채취는 산 세척된 플라스틱 주걱을 이용하여 산 세척된 폴리에틸렌 병에 표층퇴적물 50 g 정도를 현장에서 채취하였으며, 이들 시료는 즉시 보냉 시료보관함에 담아 실험실로 옮긴 후 급속 냉동하여 전처리 전까지 보관하였다.

보관된 시료는 동결건조기를 이용하여 전처리하여 건조한 다음 막자사발을 이용하여 미세한 분말로 분쇄하였고 X-선 형광분석기 (XRF : Rigaku, Model : Supermini) 를 이용하여 무기원소를 정량하였다.

또한 산 분해를 위한 시료는 퇴적물 시료와 패류의 패각시료는 약 0.5 g 정도를 정확하게 달아 진한 질산 : 과염소산 : 불소산 = 2 : 1 : 2의 혼합된 산 10 mL를 첨가하고 마개를 하여 마이크로파 분해 장치를 이용하여 산 분해하였다. 그리고 방냉 하여 테프론 비이커에 옮겨 150°C 청정한 hot plate hood에서 완전 건조 시키고, 진한 질산 2 mL로 2회 반복하여 잔사를 녹인 후 1 N 질산 용액으로 테프론 비이커에 침적된 화학적 성분을 용출시켰다. 그리고 미리 산 세척된 100 mL 부피 플라스크 (volumetric flask) 에 정용하여 시료로 준비하였다.

분석의 정도관리 (QA/QC) 를 위하여 마이크로파 분해 장치 산분해시 마다 8개의 시료와 2개의 정도관리 표준물질 MESS-3를 시료와 동일하게 산분해 하여 시료로 준비하여 최적 분석조건으로 유도결합질량분석기 (inductively coupled plasma mass; ICP-MS, Model: Elan 9000, Perkin Elmer Co.) 를 이용하여 분석하였다.

패류는 채취 즉시 현장수로 패각을 깨끗이 세척하여 냉장 상태로 실험실로 운반하여 토사를 배출하였고 (Song *et al.*, 2001), 패각과 가식부위를 분리하여 급속냉동 보관하였다. 보

Table 1. Mean grain size and geochemical composition of sediments in the west coast of Korea

	Type of sediment	Mean Grain size ϕ (phi)	Sorting ϕ (phi)	Acid volatile sulfide (AVS) (mg/g d.w.)	Ignition loss (IL) (%)	Chemical oxygen demand (COD) (mg/g d.w.)	Water content (WC) (%)
St. 1	gmS	0.67	1.99	0.002	0.924	11.399	16.36
St. 2	gmS	1.72	3.21	0.039	2.467	14.059	23.79
St. 3	gmS	2.23	1.94	0.002	2.007	12.109	24.54
St. 4	gS	0.97	2.3	0.006	1.391	10.123	19.03
St. 5	sS	5.09	1.98	0.000	3.165	5.405	33.21
St. 6	gS	1.30	1.66	0.010	1.086	6.325	19.08
St. 7	msG	0.87	3.15	0.031	2.784	8.543	19.78
St. 8	gmS	3.32	1.25	0.033	2.794	8.264	25.49

* gmS : gravelly muddy sand, gS : gravelly sand, sS : sand silt, msG : muddy sandy gravel.

관된 시료는 동결건조기를 이용하여 전처리하여 건조한 다음 막자사발을 이용하여 미세한 분말로 분쇄하였고 X-선 형광분석기 (XRF : Rigaku, Model : Supermini) 를 이용하여 무기원소를 정량하였다. 그리고 극미량원소 분석을 위한 산 분해가 필요한 시료는 가식부위 약 0.5 g 정도를 정확하게 달아 진한 질산 2 mL를 첨가하고 마개를 하여 마이크로파 분해 장치를 이용하여 산 분해하였다. 그리고 방냉 하여 테프론 비이커에 옮겨 150°C 청정한 (clean) hot plate hood에서 완전 건조 시키고, 진한 질산 2 mL로 2회 반복하여 잔여물을 녹인 후 1 N 질산 용액으로 테프론 비이커에 침적된 화학적 성분을 용출시켰다. 그리고 미리 산 세척된 100 mL 부피 플라스크 (volumetric flask) 에 정용하여 시료로 준비하였다.

결 과

1. 표층 퇴적물의 지화학적 특성

본 연구지역의 표층퇴적물의 함수율은 16%-35% 범위를 나타내었으며 퇴적물의 입도 분포는 현재의 수리 역학적 퇴적환경을 반영하는 주요 인자로서 (Lee *et al.*, 2001) 퇴적물의 공급원과 해수의 물리적인 유동인자 등에 의하여 에너지 변동을 나타낸다 (Cho *et al.*, 2001, Kim *et al.*, 2005). 따라서 갯벌에 서식하는 패류의 성장과 영양 및 종 조성에 많은 변화를 준다. 조사점의 퇴적물은 니질사 또는 니질로 구성되어 일반적인 양식어장의 입도 구성을 나타내었다 (Table 1).

2. 표층 퇴적물의 유기물 함량 및 분포 특성

한편 퇴적물의 함수율 (WC) 은 현탁물 섭식

(suspension-feeding) 을 하는 생물에게 중요한 요인이며, 연구지역에서 함수율 (WC)의 변화는 평균입도 (Mz)에 따라 상관성 있는 분포특성을 나타내었다 (Fig.2). 표층 퇴적물중의 유기물 함량과 분포특성을 살펴보면 COD는 5.41-14.06 mg/g d.w. (평균 8.78 ± 3.16 mg/g. d.w.) 범위였으며 St. 2, 3, 4에서 높은 값을 보였다. 이 지역의 COD 농도는 Hwang *et al.* (2006) 이 제시한 마산항 11.3-29.9 mg/g d.w. 값에 비하여 낮은 농도를 보였다. 퇴적물중 IL은 0.92-3.17% (평균 2.08 ± 0.86%) 범위로 연구지역의 평균입도의 분포에 따라 일정한 농도분포 양상을 나타내고 있다. 그러나 연구지역의 IL 농도는 우리나라 주변의 연안해역의 측정된 결과와 유사한 농도분포를 나타내고 있지만 반폐쇄적인 내만의 어장주변인 가막만 (4.6-1.6%), 여자만 (6.2-12.2%) 에 비하여 낮은 농도이고, 주변에 큰 공단이 존재하고 육상 기인 오염된 하천수의 유입이 많은 부산항 (6.3- 18.5%), 마산항 (7.2-14.3%) 의 농

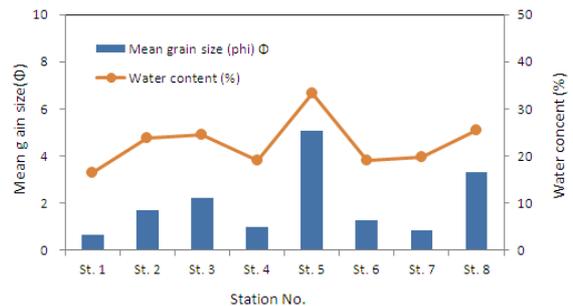


Fig. 2. Mean grain size and water content of each station in surface sediment of research area.

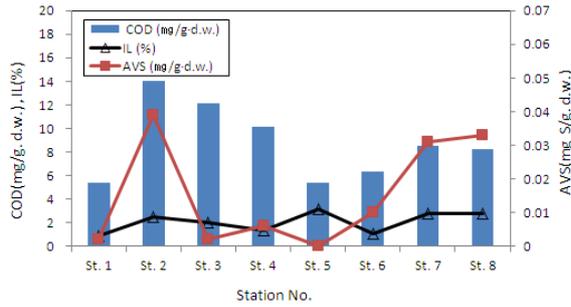


Fig. 3. The concentration of chemical oxygen demand, ignition loss and volatile sulfide in each station in the surface sediment of research area.

도와는 매우 낮은 농도를 보이고 있다 (Hwang et. al. 2010, Kim et al., 2008).

AVS의 농도는 N.D.-0.039 mg/g d.w. (평균 0.015 ± 0.016 mg/g d.w.) 의 범위로 St. 2에서 가장 높은 값을 나타 내었다. (Fig. 3.) 일반적으로 황화물을 생성하는 황산염 환원 성세균은 퇴적물 내에서 에너지원으로 COD로 표현되는 생분 해성 유기물을 이용한다. COD의 농도가 20 mg/g d.w. 이상 이 되면 매우 빠른 속도로 황화물을 생성시키는 것으로 알려져 있다. (Hwang. et al. 2006). 따라서 연구지역의 표층퇴적물 의 COD 농도가 20 mg/g d.w. 보다 낮고 AVS 농도의 변화

양상은 COD의 농도와 유사한 경향성을 보이고 있다. 한편 연구지역 내의 AVS 농도는 서해남부의 영광에서 탄도만 부근지역의 표층퇴적물 중에서 검출되지 않은 지역 (Hwang et al. 2010), 미산항 지역 (Hwang et al. 2006)의 0.20-4.47 mg/g d.w. (평균 1.83 ± 1.21 mg/g d.w.)과 비교하면 낮은 농도이다.

3. 표층 퇴적물의 금속원소 함유량 및 저서환경 오염평가

퇴적물의 오염정도를 평가하는 기준으로 표층퇴적물의 금속 원소의 농도를 측정하여 퇴적물 환경의 오염정도와 저서환경에 대한 오염을 평가한다 (Hyun et al., 2003). 즉 퇴적물 내 금속원소의 농도를 오염되지 않은 지역에서의 자연적인 농도와 (Lim et al., 2007) 비교하는 방법을 주로 사용하며 그 방법으로 부화지수 Enrichment Factor(EF), 농집지수 Geoaccumulation index (Igeo) 의 방법을 이 연구에서는 이용하였다. 먼저 EF는 퇴적물 내의 측정된 AI에 대한 각 금속원소의 농도비 [(Me/AI)observed] 를 지각물질 중 AI에 대한 각 금속원소의 농도비 [(Me/AI)crust] 로 나누어 준 값을 말한다 (Eq.1).

$$\text{Enrichment Factor(EF)} = \frac{(Me/AI)_{\text{observed}}}{(Me/AI)_{\text{crust}}} \quad (1)$$

Table 2. Ratio of metallic elements to Al in the surface sediment in west coast of Korea and in earth crust with the Taylor and McLennan (1995)

	Metal/Al		Metals/Al x 1000					Metals/Al x 1000			
	Fe/Al	Mn/Al	Zn/Al	Pb/Al	Cu/Al	Cr/Al	Ni/Al	As/Al	Cd/Al	Hg/Al	
Earth's crust	0.44	7.46	0.88	0.25	0.31	0.44	0.25	0.02	0.012	0.010	
St. 1. EF*	0.70	1.18	1.39	0.40	0.49	0.70	0.40	0.03	0.40	0.40	
St. 2. EF*	0.84	1.43	1.68	0.48	0.59	0.84	0.48	0.04	0.48	0.48	
St. 3. EF*	0.89	1.52	1.79	0.51	0.63	0.89	0.51	0.04	0.51	0.51	
St. 4. EF*	0.95	1.61	1.90	0.54	0.67	0.95	0.54	0.04	0.54	0.54	
St. 5. EF*	0.81	1.38	1.63	0.46	0.57	0.81	0.46	0.04	0.46	0.46	
St. 6. EF*	1.04	1.77	2.09	0.59	0.74	1.04	0.59	0.05	0.59	0.59	
St. 7. EF*	1.01	1.72	2.02	0.57	0.71	1.01	0.57	0.05	0.57	0.57	
St. 8. EF*	0.94	1.60	1.88	0.53	0.66	0.94	0.53	0.04	0.53	0.53	

* EF : Enrichment Factor

위의 식에서 EF 값이 1 에 가까울수록 오염이 되지 않은 자연적인 농도이며, 1 보다 클 경우는 대기나 하천을 통하여 유입되어 퇴적물에 농축되어 있음을 의미한다. 연구지역의 각 정점별 EF 값을 Table 2에 나타내었다.

연구지역내의 표층 퇴적물중 금속원소의 오염평가는 저질특성을 반영하여 오염정도를 정량적으로 평가할 수 있는 방법인 농집지수인 (Igeo) 를 계산하였다 (Hwang *et al.*, 2006). Igeo 지수는 Müller (1979) 에 의하여 제시된 것으로 퇴적물에 함유된 금속원소의 농도를 오염되지 않은 금속원소의 농도와 비교하는 방법이다 (Hwang *et al.*, 2010). 또한 그 값에 따라 7 등급으로 구분하여 정량할 수 있어 연구지역내 측정된 금속원소의 상대적인 농축정도를 반영하여 오염정도를 세분화할 수 있다. 따라서 이 방법이 오염정도의 평가에 널리 이용되고 있다. 그리고 이 방법은 다음의 식 (2) 을 이용하여 계산한다.

$$Igeo = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5} \quad (2)$$

여기서 Cn은 연구지역내 분석된 금속원소의 농도이며, Bn 은 금속원소의 바탕농도 (background of reference) 를 나타낸다. 일반적으로 금속원소의 바탕농도는 세일이나 지각물질의 금속원소의 평균농도를 사용한다. 또는 해당연구지역에서 가장 낮은 농도를 사용하여 계산하기도 한다 (Hyun *et al.*, 2003b, Hwang *et al.*, 2010).

Table 3은 이 방법에 의하여 계산된 농집지수 값을 나타내었다. 연구지역내의 모든 정점에서 Igeo class가 0으로 오염되지 않은 수준이며 (practically unpolluted), 대부분 Igeo class가 0과 1에 집중되어 있어 약간 오염되었거나 오염되지

않은 수준으로 (practically unpolluted / moderately polluted) 나타났다.

4. 연구지역내 패류의 무기원소 및 중금속 함유량

연구지역내 14종의 패류에 대한 정점별로 무기원소 및 중금속을 측정된 결과 유해 중금속으로 패류에 농축되어 인간에게 질병을 유발할 수 있는 Cd, Hg 그리고 Pb의 분석결과 퇴적물에 대한 금속의 농집지수 Igeo의 값이 1-2로 약간 오염된 지역이 있지만, 패류 내에 축적된 농도는 매우 낮은 값으로 나타났다(Table 4).

그리고 (Cho *et al.*, 2009) 이 보고한 통영지역 양식해역 굴의 Cd (0.01-5.47 mg/kg d.w.), Pb (0.01-6.47 mg/kg d.w.) 와 Hg (0.004-0.74 mg/kg d.w.) 보다 낮은 값을 보이며, (Kim *et al.*, 1997) 이 보고한 서해연안에서 채취된 굴의 Cd (0.57 mg/kg d.w.), Pb (3.78 mg/kg d.w.) 그리고 Hg (0.58 mg/kg d.w.) 에 비하여 낮은 농도이다.

한편, (Yoo *et al.*, 1989) 이 보고한 필조개 내의 Cd (0.08-0.14 mg/kg d.w.), Pb (0.31-0.70 mg/kg d.w.) 보다 낮은 농도를 보이지만, Cu (0.65-1.69 mg/kg d.w.) 의 농도는 연구지역내의 동죽, 키조개 그리고 새조개에서 약 3배 정도 유의수준 값을 나타내었다.

고 찰

갯벌양식어장 퇴적물의 오염도는 서식하는 패류와 저서생물에 영향을 끼치며 종조성을 변화시킨다. 따라서 연안해역이나 양식어장의 주변해역에서 유기물 오염을 평가하는 기준으로 일본에서 제시한 퇴적물 중의 COD와 AVS 농도를 각각 20 mg/g d.w. 와 0.20 mg/g d.w.과 (Yoon, 2000, Hwang *et al.*, 2006) 비교할 때 조사한 지역의 모든 정점에서 기준으로

Table 3. Classification of geoaccumulation index (Müller, 1979) and the number of Igeo class for the concentrations of metallic elements in intertidal surface sediment in west coast of Korea

Igeo	Igeo class	Designation sediment quality	Igeo								
			Fe	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Mn	As	Hg
> 5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	5	Strongly/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	2	Moderately polluted	0	0	0	0	1	0	0	2	2
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	8	8	8	8	7	8	8	6	6
0	0	Practically unpolluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 4. The contents of inorganic elements in shellfish in the west coast of Korea

Sample	St.	Inorganic elements concentration(mg/kg, d.w. ± S.D.) N.D. : Not Detected										
		As	Ca	Cd	Cu	Fe	Hg	Li	Mn	P	Pb	Zn
<i>Scapharca broughtonii</i>	St.7	N.D.	2975.80 ± 10.02	0.0076 ± 0.003	1.18 ± 0.09	354.00 ± 2.64	0.051 ± 0.03	0.68 ± 0.02	36.20 ± 2.66	4683.40 ± 5.44	N.D.	8.59 ± 1.02
<i>Crassostrea gigas</i>	St.1	N.D.	5135.80 ± 16.02	0.0021 ± 0.002	1.57 ± 0.32	218.00 ± 2.66	0.02 ± 0.01	1.09 ± 0.02	26.20 ± 4.64	5103.40 ± 4.42	0.17 ± 0.02	75.25 ± 2.42
<i>Mactra veneriformis</i>	St.4	N.D.	6195.80 ± 12.02	N.D.	5.51 ± 0.92	268.00 ± 2.49	0.028 ± 0.02	1.31 ± 0.22	320.00 ± 9.69	6203.40 ± 10.42	N.D.	7.24 ± 1.62
<i>Ruditapes philippinarum</i>	St.3	N.D.	1915.80 ± 10.42	N.D.	0.61 ± 0.07	350.00 ± 2.14	0.054 ± 0.013	0.72 ± 0.09	6.00 ± 1.68	7243.40 ± 5.08	N.D.	7.13 ± 1.49
<i>Meretrix petechialis</i>	St.4	N.D.	2758.24 ± 5.02	N.D.	1.23 ± 0.52	52.67 ± 3.84	0.0429 ± 0.01	1.21 ± 0.22	8.64 ± 1.61	4501.21 ± 4.40	0.16 ± 0.02	12.54 ± 1.82
<i>Solen strictus</i>	St.3	N.D.	6795.80 ± 4.44	N.D.	0.14 ± 0.02	248.00 ± 5.64	0.010 ± 0.01	1.12 ± 0.09	34.00 ± 2.69	5263.40 ± 8.62	N.D.	7.34 ± 1.42
<i>Atrina pectinata</i>	St.7	0.19 ± 2.01	1739.80 ± 5.52	0.0043 ± 0.002	5.00 ± 0.24	986.00 ± 5.07	0.072 ± 0.02	0.79 ± 0.26	44.80 ± 2.12	6263.40 ± 7.02	0.05 ± 0.02	7.42 ± 0.32
<i>Solecurtus divaricatus</i>	St.4	N.D.	1123.80 ± 4.92	N.D.	0.72 ± 0.05	658.00 ± 8.64	0.069 ± 0.03	0.54 ± 0.12	13.54 ± 2.66	8163.40 ± 10.22	0.09 ± 0.01	6.54 ± 1.42
<i>Mytilus galloprovincialis</i>	St.6	N.D.	1281.80 ± 5.42	N.D.	3.12 ± 0.24	622.00 ± 9.14	0.048 ± 0.03	1.32 ± 0.52	40.00 ± 2.04	8123.40 ± 8.12	N.D.	3.04 ± 1.82
<i>Cyclina sinensis</i>	St.4	N.D.	6615.80 ± 3.09	0.0018 ± 0.0012	1.25 ± 0.24	882.00 ± 8.18	0.07 ± 0.01	0.93 ± 0.06	17.40 ± 3.66	4663.40 ± 5.48	N.D.	6.30 ± 1.05
<i>Glossaulax didyma didyma</i>	St.5	N.D.	2255.80 ± 8.24	N.D.	1.72 ± 0.24	252.00 ± 5.60	0.037 ± 0.03	0.44 ± 0.02	4.80 ± 1.04	5403.40 ± 4.42	N.D.	8.75 ± 1.40
<i>Rapana venosa</i>	St.5	N.D.	2475.80 ± 7.12	N.D.	1.79 ± 0.24	94.00 ± 4.20	0.031 ± 0.03	0.31 ± 0.01	0.20 ± 0.04	4203.40 ± 11.42	N.D.	10.45 ± 1.22
<i>Mactra chinensis</i>	St.2	N.D.	4415.80 ± 4.12	N.D.	4.91 ± 0.25	228.00 ± 3.04	0.050 ± 0.02	0.58 ± 0.02	37.80 ± 3.66	8423.40 ± 14.32	N.D.	3.78 ± 0.42
<i>Fulvia mutica</i>	St.8	N.D.	2395.80 ± 4.04	N.D.	5.00 ± 0.20	668.00 ± 7.04	0.066 ± 0.023	0.28 ± 0.02	58.00 ± 3.64	6403.40 ± 9.19	N.D.	6.93 ± 1.42

제시된 퇴적물 오염기준보다 1/2 이하로 매우 낮아 현재로서는 유기물 오염이 진행되지 않은 곳이 많아 저서생물이 서식하기에 적합한 환경으로 생각된다.

그리고 현탁물을 섭식하는 대부분의 패류에서 중요한 요인으로 작용하여 성장에 영향을 미치는 COD, AVS, IL의 지화학적특성은 퇴적물의 평균입도에 따라 달라지는데 (Kim et al., 2005) 연구지역의 입도는 역泥沙질, 역사질로 구성되어 있어 갯벌양식어장의 적합한 조건을 가지고 있다. 그리고 세립질 퇴적물 일수록 유기물 함량이 높아져서 오염의 근원으로 될

수 있지만 연구지역의 지화학적 농도 수준은 양식장 오염기준에 비하여 양호한 편이며 패류의 성장에 영향이 적은 것으로 생각된다.

퇴적물에 함유되어 있는 금속원소는 연안 해역에서 환경변화에 따른 조건변화를 반영하고 오염의 기록을 장기간 보존하는 특성을 가지고 있다 (Na et al., 2005). 그러므로 퇴적물의 오염의 역사를 밝힐 수 있는 중요한 자료가 된다. (Jeon et al, 2002, Choi et al, 1999, Hwang et al, 2006, 2010) 그리고 퇴적물 내 금속원소의 오염평가에 이용되는 부화지수

Enrichment Factor (EF) 를 계산한 결과 연구지역내 퇴적물중 Fe은 부화지수 EF 값이 거의 1에 가까운 값 (0.91) 을 나타내어 지각중의 Fe이 퇴적물내에 보존되어 있는 것으로 나타났다지만, 일부 원소 Mn과 Zn는 1보다 큰 값 (1.20-2.09) 을 보이고 있다.

또한 금속원소의 오염평가에 이용되는 농집지수 Geoaccumulation index (Igeo) 는 지각을 구성하는 물질 중에 (Lim *et al.*, 2003) 가장 높은 농도의 원소인 Al을 제외하고 9개의 원소에 대하여 농집지수 값을 계산하여 7 등급으로 구분하여 정량할 수 있다. 따라서 연구지역내 측정된 금속원소의 상대적인 농축정도를 반영하여 오염정도를 세분화 계산한 결과 연구지역내의 표층퇴적물중 Cd, As 그리고 Hg를 제외한 나머지 원소는 Igeo class가 1 또는 2 인 약간 오염되어 있거나 오염되지 않은 수준으로 나타났다.

연구지역내 패류의 무기원소 및 중금속 함유량은 표층퇴적물의 무기원소 및 중금속 함유량과 상관관계를 가지는 것으로 사료된다. 그러나 연구지역의 부화지수 Enrichment Factor (EF) 와 농집지수 (Igeo) 의 퇴적물 특성의 오염정도는 외부에서 오염원의 유입이 적은 매우 낮은 것으로 계산되고, 퇴적물이 오염이 적은 자연 상태를 유지하고 있어 연구지역내 서식하는 패류의 무기원소 및 중금속 함유량 농도는 차이가 적은 것으로 나타났다. 즉 Mn과 Zn를 제외한 다른 금속은 외부에서 유입된 부분이 거의 없어서 오염이 진행되지 않은 것을 의미하지만 Mn과 Zn는 적은 양 농축되어 있는 것으로 나타났다.

따라서 서해연안 연구지역의 퇴적물과 서식하는 패류에 대한 중금속의 농축은 대부분의 중금속에서 유의한 상관관계가 관찰되지 않았지만, 일부 중금속 원소인 Mn, Zn에 대해서 퇴적물의 농도에 의한 직접적인 상관관계가 반영되는 것으로 나타났다.

요 약

갯벌어장에 서식하는 패류의 성분원소 함량 및 연안 생태계의 퇴적물의 지화학적 특성의 연관성을 조사하기 위하여 서해 연안을 연구지역으로 선정하였다.

연구지역내 갯벌어장 표층퇴적물의 COD, AVS, IL의 지화학특성은 다소 오염된 지역이 나타나지만 대부분 양식장 오염 기준에 비하여 매우 낮은 농도를 보이며 패류의 성장에 영향이 적은 것으로 생각된다. 그리고 중금속에 대한 농축비 (Ef) 와 농집지수 (Igeo) 의 결과는 연구지역이 오염원이 적은 자연적인 상태를 유지하여 서식하는 패류에 대한 오염이 적은 것으로 평가되었다. 또한 연구지역내에 서식하는 패류의 성분원소 함량을 분석한 결과에 따르면 퇴적물과 패류의 원소함유량의 상관관계는 연관성 있는 것으로 평가되었다. 패류의 무기원소 및 중금속의 농축은 Mn, Zn에 대해서만 상관관계가 반

영되는 것으로 사료된다. 한편 갯벌어장의 패류 및 저서생물들이 서식하기에 좋은 조건대 퇴적물 상태를 유지하기 위하여 어장관리를 위한 중금속 오염에 대한 기준설정이 필요하며, 오염경로와 퇴적물의 오염원을 관리할 수 있는 체계적인 정책이 요구된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 갯벌 바지락 생산 저해요인 (썩) 제어연구 (12-AQ-58) 과제의 일환으로 추진되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, I. Y., Ji, J. Y., Choi, H. S., Pyo, S. H., Park, H. and Choi, J. W. (2006) Spatial variations of heavy metal accumulation in Manila clam, *Ruditapes philippinarum* from some selected intertidal flats of Korea. *Ocean and Polar Research*, 28(3): 215-224.
- Choi, M. S., Chun, J. H., Woo, H. J. and Yi, H. I. (1999) Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shiwa Lake. *Journal of Environmental Sciences*, 8(5): 593-600.
- Cho, S. M., Kim, Y. H., and Jeong, W. G. (2009) The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea. *Korean Journal of Malacology*, 25(3): 213-222.
- Cho, T. C., Lee, S. B. and Kim, S. Y. (2001) Sedimentological and hydromechanical characteristics of bed deposits for the cultivation of Manila clam, *Ruditapes philippinarum* in Gomsu tidal flat. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 34(3): 245-253.
- Cho, Y. G., Ryu, S. O., Khu, Y. K. and Kim, J. Y. (2001) Geochemical composition of surface sediments from the Saemangeum tidal flat, west coast of Korea. 「The Sea」. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 6(1): 27-34.
- Hong, S. P., Kim, D. S. and Kim, Y. M. (1997) Effect of water temperature, salt and MgCl₂ concentration on sand ejection characteristics of short neck clam, *Luditapes philippinarum*. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 30(1): 114-118.
- Hwang, D. W., Jin, H. G., Kim, S. S., Kim, J. D., Park, J. S. and Kim, S. G. (2006) Distribution of organic matters and metallic elements in the surface of Masan harbor, Korea. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 39(2): 106-117.
- Hyun, S. M., Lee, T. H., Choi, J. S., Choi, D. L. and Woo, H. J. (2003) Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu bay, south coast of Korea. 「The Sea」. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 8(4): 380-391.
- Jeon, S. G. and Cho, Y. G. (2002) Some heavy metal concentration of surface sediments from the south

- coast of Korea. *Journal of Environmental Sciences*, 11(12): 1299-1305.
- Kim, S. K., Lee, M. K., Ahn, J. H., Kang, S. W. and Jeon, S. H. (2005) The effects of mean grain size and organic matter contents in sediments on the nutrients and heavy metals concentrations. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 27(9): 923-931.
- Kim, S. K. (1997) A study on the heavy metals contents of shellfish in western coast of Korea. *Journal of Natural Science of Soonchunhyang University*, 3: 353-364.
- Kim, P. G., Park, M. E., Sung, K. Y., Lim, S. T. and Oh, S. M. (2009) Comparative study on distribution of heavy metals of the surface sediments in east/west oceanic dumping areas. *Economic and Environmental Geology*, 42(2): 121-131.
- Kim, K. T., Kim, E. S., Cho, S. R., Kang, S. H., Kim, J. K. and Park, J. K. (2008) The distribution of heavy metals in the surface waters and sediments of Gaduk in Jinhae Bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safe*, 14(2): 95-103.
- Lee, C. B., Park, Y. a., Kang, H. J. and Kim, D. C. (1991) Geochemical characteristics of the continental shelf and slope sediments off the southeastern coast of Korea. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 5(1): 15-32.
- Lee, I. S. and Kim, E. J. (2000) Distribution of heavy metals in sediments, seawater and oysters (*Crassostrea gigas*) in the Jinhae Bay. *Korean Journal of Ecology*, 23(1): 59-64.
- Lee, E. H., Ryu, B. H. and Yang, S. T. (1975) Seasonal changes in heavy metal content of baby clam. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 8(2): 85-89.
- Lee, Y. S., Jo, Y. H., Byun, I. S., Kang, S. W., Cho, E. M., Han, Y. S., Choi, S. H., Park, H. S., Kho, W. G., Ahn, I. Y. and Jeong, K. H. (2006) Bioaccumulation of heavy metals in *Ruditapes philippinarum*. *Korean Journal of Malacology*, 22(2): 157-165.
- Lim, D. I. (2003) Geochemical of coastal sediments around Jeju Island, south sea of Korea: potential provenance of sediment. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 24(4): 337-345.
- Lim, D. I., Choi, J. Y., Choi, H. W. and Kim, Y. O. (2007) Natural background level analysis of heavy metal concentration Korean coastal sediments. *Ocean and Polar Research*, 29(4): 379-389.
- Na, C. K. (2004) Heavy metals in sediments and organisms from tidal flats along the Mokpo coastal area. *Economic and Environmental Geology*, 37(3): 335-345.
- Park, C. S., Wi, M. Y. and Hwang, E. K. (2008) The concentrations of heavy metals in the seawater, sediment and seaweed in Mokpo coastal region. *Korean Journal of Environmental Biology*, 26(4): 303-310.
- Song, K. C., Mok, J. S., and Kang, C. S. (2001) Sand elimination in shortnecked clam, *Ruditapes philippinarum*, harvested from western coast of Korea. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 34(3): 179-183.
- Shin, Y. K., Kim, Y., Chung, E. Y. and Hur, S. B. (2000) Temperature and salinity tolerance of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*. *Journal of the Korean Fisheries Society*, 33(3): 213-218.
- Song, M. Y., Choe, B. L., Park, K. S. and Lee, I. S. (1997) Distribution of heavy metals in the sediments and Periwinkles (*Littorina brevicula*) of Onsan Bay. *Korean Journal of Ecology*, 20(1): 51-59.
- Yoo, I. S., Yoo, E. J., Lee, J. S., Park, H. and Soh, C. T. (1989) Heavy metals in sediments and shellfish along Mangyong River. *Korean Journal of Malacology*, 5(1): 35-41.