

목포 연안해역의 해수, 퇴적물 및 해조류에 축적된 중금속 함량

박찬선·위미영¹·황은경^{1,*}

목포대학교 해양수산자원학과, ¹국립수산과학원 해조류연구센터

The Concentrations of Heavy Metals in the Seawater, Sediment and Seaweed in Mokpo Coastal Region, Southwestern Coast of Korea

Chan Sun Park, Mi Young Wi¹ and Eun Kyong Hwang^{1,*}

Department of Marine and Fisheries Resources, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea

¹Seaweed Research Center, NFRDI, Jeonnam 530-831, Korea

Abstract - Heavy metal concentration of Fe, Zn, Cu, Cd and Pb were analysed from seaweeds (*Ulva pertusa*, *Sargassum thunbergii*, *Caulacanthus okamurae*), sediments and seawater at the two experimental sites of Daebul and Sabjin industrial complex in Mokpo coastal area with a control site (Heugsando). Highest values of heavy metals were found at two experimental sites influencing by various pollution sources such as industrial drains, sewage and harbours. In contrast, the lowest concentrations was observed at the control site without any pollution source. The concentration levels of accumulated heavy metals were in the following order: seaweeds>sediments>seawater. Similar spatial distribution patterns were observed at the seaweeds, sediments and seawater for the highest mean values of the different heavy metals. This result show that seaweeds could be used as a biomonitors of heavy metals at coastal region.

Key words : heavy metal, seaweeds, southwestern coast of Korea, Mokpo

서론

연안역에서 해조류는 생태계의 1차 생산자로서의 역할 뿐만 아니라 연안에 서식하는 어패류의 산란, 서식 및 먹이 제공원으로써 크게 기여하고 있으며, 이외에도 식용, 공업용 원료, 부영양염과 오염물의 흡수, 사료, 비료, 의약품 원료, 바이오에너지원 등으로 그 이용도가 점

점 증대되고 있다(Dawes 1998). 그러나 연안역은 중금속의 오염이 일어나기 쉬운 곳으로 오염물의 대부분은 강 또는 육상으로부터의 유입과 쓰레기의 해양 투기 등에 의해 발생한다. 또한 최근에는 대도시의 도시 하수와 연안역 산업단지로부터의 오염물의 유입이 점점 증가되고 있다.

특정 해역에서 지속성 중금속 오염물질의 오염도를 측정하는 방법에는 해수나 해저퇴적물 또는 해당지역에 서식하는 정착성 해양생물을 이용하는 방법들이 일반적으로 알려져 있다(이 등 1996). 해수의 수질분석을 통한

* Corresponding author: Eun Kyong Hwang, Tel. 061-285-1951, Fax. 061-285-1949, E-mail. ekhwang@nfrdi.go.kr

중금속의 오염도 측정방법은 해수자체가 해류나 조석 등에 의해 끊임없이 유동하므로 1~2회의 측정만으로 특정 해역의 정확한 오염도를 판정하기란 곤란하다. 저저적물의 경우는 오염물질이 단기간 내에 퇴적되는 것이 아니라 오랜 시일이 걸리므로 연안처럼 조석차가 심하고 생물활동이 활발한 곳에서는 조류와 생물교란의 영향으로 인해 오염물의 정확한 퇴적을 기대하기가 어렵다. 그러나 해조류와 같은 부착성 저서생물들은 일생을 통해 활동범위가 거의 동일한 지역으로 국한되면서 중금속이나 유기독성화합물, 또는 방사성 물질 등을 생체내에 농축시키기 때문에 오염에 대한 지표생물로 널리 이용되고 있다(Keeney *et al.* 1976; Chung and Lee 1989; 김 등 2003). 지표생물을 이용한 오염모니터링을 생물감시라 하는데, 전 세계적으로 가장 널리 수행되고 있는 생물감시 프로그램은 “세계 홍합감시(International Mussel Watch)”를 들 수 있다(IMWC 1990).

해조류에 의한 해수나 퇴적물로부터의 중금속 축적은 이미 잘 알려진 사실이며(Burdin and Bird 1994; Vasconcelos and Leal 2001), 해조류의 중금속 흡수기작은 알긴산 등 복합 다당류에 의한 흡착 및 이온 교환 기작, 에너지 관련 대사기작 등의 다양한 기작으로 해석되고 있다. 이러한 중금속 축적 현상을 이용하여 해조류 조직의 중금속 농도와 해수 중의 농도와의 연관성을 기초로 해조류를 중금속 오염에 대한 지표종으로 이용하고 있다(Chung and Lee 1989). 특히, 해조류 중에서 범세계종인 *Enteromorpha*, *Ulva*, *Sargassum*, *Fucus*, *Laminaria*, *Gracilaria*, *Polysiphonia* 등이 일반적으로 이용되고 있다(Murugadas *et al.* 1995; Sandau *et al.* 1996; Leal *et al.* 1997).

본 연구에서는 서남해안의 조간대에 널리 분포하는 구멍갈파래(*Ulva pertusa*), 지층이(*Sargassum thunbergii*), 애기가시덤불(*Caulacanthus okamurae*)를 지표 해조류로 삼았다. 목포연안은 목포항 뿐만 아니라 주변에 조성된 대불국가산업단지, 삼진지방산업단지로부터 배출되는 산업 오·폐수물질 및 생활하수의 유입으로 다양한 오염의 위협을 받고 있다. 특히 산업화의 부산물인 중금속의 연안역 유입이 증가일로에 있는 것으로 보고되고 있어(조와 김 1998; 전과 조 2002), 이러한 중금속 농도 변화에 대한 모니터링이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 서남해안 목포연안에 서식하는 해조류를 대상으로 중금속 유입량이 많은 산업단지주변 해역과 중금속 유입량이 적은 해역(대조구)에서 각각의 중금속 함량을 조사하고, 이들 서식지의 해수 및 퇴적물의 중금속 함량을 분석하므로써, 지표 해조류를 이용한 연안해역의 중금속 농도 변화에 대한 장기적인 정보를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

목포연안의 중금속 오염도를 조사하기 위해 중금속의 유입량이 많은 산업단지 주변 해역(대불국가산업단지, 삼진지방산업단지)과 중금속의 유입량이 적은 대조구(흑산도)를 설정하였다.

1) 정점 1: 삼호(대불국가산업단지)

대불국가산업단지는 행정구역상 전남 영암군에 속해 있으나 영산강 하구를 경계로 목포연안과 맞닿아 있는 곳에 위치한다(34° 46'20"N, 126° 24'25"E). 산업단지는 12,785 km² 크기로 자동차, 기계, 제강, 석유화학, 조선 등 다양한 제조공장이 운영되고 있으며, 산단에서 발생하는 오폐수는 대부분 영산호 하구역으로 유입되고 있다. 영산호 하구역은 수로가 약 2 km로 좁고 평균 수심도 10 m 내외로 조류의 소통이 활발치 못한 곳이다.

2) 정점 2: 산정(삼진지방산업단지)

삼진지방산업단지는 목포의 북서부연안에 위치하고 있으며(34° 49'34"N, 126° 22'46"E), 산업단지의 전방에는 신안군 압해도가 있고 배후지에는 대박산과 양을산 등의 작은 산들이 분포하고 있다. 산업단지는 271 km² 크기로 기계, 내화, 조선 등의 제조공장이 운영되고 있으며, 남측 해안을 따라 목포시가 형성되어 있어, 산업단지 인근 해역은 목포시로부터 생활하수와 산업단지로부터 오염물의 유입이 많은 곳이다.

3) 정점 3: 흑산도(대조구)

흑산도는 목포로부터 서쪽으로 약 95 km 떨어진 곳에 위치하는 섬으로(34° 40'35"N, 125° 26'44"E), 다도해해상국립공원에 속한다. 해안선은 복잡한 리아스식 해안이며, 연안의 수심이 깊고 외해에 면해있어 조류의 소통이 원활하고, 육지로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 오염물의 유입이 거의 없는 곳이다.

2. 시료채취

2006년 3월(봄)과 11월(가을)에 각 조사지에서 해조류[구멍갈파래(*Ulva pertusa*), 지층이(*Sargassum thunbergii*), 애기가시덤불(*Caulacanthus okamurae*)], 퇴적물 및 해수를 삼반복으로 채취하였다. 해조류의 채취는 조간대에서 이루어졌으며, 채취장소 당 분석에 가능한 많은 개체의 해조류를 충분한 양으로 채취하여 조사정점의 대표성을 갖도록 하였다. 또한 해조류의 개체 크기에 따른 중금속

의 농도 차를 최소화하기 위해 가능한 비슷한 크기의 개체들을 대상으로 채취하였다. 표층퇴적물은 반빈채니기 (van Veen grab)를 사용하여 채취하였으며, 채취는 해조류의 채취장소 인근에서 행하였다. 해수는 증류수로 깨끗이 세척된 1 L 폴리에틸렌병에 표층으로부터 수심 30 cm의 해수를 채취하였다. 채취된 시료들은 오염되지 않도록 폴리에틸렌봉지로 포장한 후 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하였다.

3. 중금속 추출

실험실로 운반된 해조류는 염체의 부착생물과 잡물을 제거하고, 염체를 증류수로 세척하여 수분을 제거한 후 60°C에서 24시간 동안 완전 건조시켰다. 시료를 균질화시키기 위해 분말화한 후 4°C에 보관하였다. 이중 중금속 분석에는 0.5 g (건중량)을 사용하였다.

퇴적물은 105°C에서 24시간 동안 말린 다음 막자사발에서 잘게 부수어 잘 혼합한 후 4°C에 보관하였다. 이중 중금속 분석에는 1 g (건중량)을 사용하였다.

Teflon PFA 용기에 분말상태의 균질화된 시료를 넣고, 질산 10 mL를 첨가하여 상온에서 시료가 충분히 반응하도록 하였다. 반응정도를 육안으로 확인한 다음 반응용기의 뚜껑을 덮고 100°C의 열판에서 시료가 완전히 용해될 때까지 반응을 지속시켜 반응용기내 용량이 거의 없어질 때 반응용기를 상온에 일정시간 방치하여 식혔다. 다시 반응용기에 60% 과염소산용액 2 mL을 넣고, 150°C의 열판에서 가열분해시켜 반응용기내 액이 갈색으로 변하기 시작하면 열판에서 반응용기를 내려 방냉시킨 후, 다시 질산 1 mL을 첨가해 시료가 완전분해될 때까지 반복하였다. 반응용기내의 액이 갈색을 보이지 않고 투명 또는 담황색을 보이면 건고전까지 농축시켰다. 반응용기내 잔류물을 1% 염산액으로 용해시켜 질소화합물 및 유리염소를 완전히 제거한 후 여과지로 여과하여 100 mL 메스플라스크를 이용하여 추출된 시료를 정량화하였다.

채수된 해수에 65% 질산 1 mL을 첨가하여 보정한 다음 산으로 세척된 0.4 µm Nucleopore filter로 해수를 여과한 후 4°C에 보관하였다. Danielsson *et al.* (1982) 및 김등 (2003)의 용매추출법을 변형시켜서 해수의 중금속을 분리 및 농축시켰다.

4. 중금속 정량

중금속 5개 항목 철, 아연, 구리, 카드뮴, 납의 측정은 유도결합플라즈마 원자 방출 분광기 (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

Table 1. Analytical condition of inductively coupled plasma spectrometer

Items	Condition
Gas	Argon
Forward power (Kw)	1.5
Line flow (Kpa)	400
Sample gas flow (Kpa)	280
Coolant gas flow (Kpa)	100
Integral time (sec)	2
	Fe - 259.9
	Zn - 213.9
Wave length (nm)	Cu - 324.7
	Cd - 226.5
	Pb - 261.4

(Spectroflame EOP, Spectro Analysis Instruments, USA)로 하였으며 측정조건은 Table 1과 같다. 미리 준비한 표준 용액을 가지고 ICP에서 calibration하여 각 시험용액의 농도를 구하고 이들 값을 이용하여 각 시료중의 중금속 함량을 계산하였다.

결과 및 고찰

1. 해수의 중금속 함량

목포연안 해수의 중금속 함량은 Table 2와 같다. 조사 시기별 해수의 중금속 함량은 3월의 경우 철이 최대 $235 \pm 78 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $102 \pm 81 \sim 61 \pm 14 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 아연이 최대 $64 \pm 20 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $39 \pm 25 \sim 14 \pm 5 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 구리가 최대 $28 \pm 7 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $11 \pm 6 \sim 5 \pm 3 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 납이 최대 $5.1 \pm 1.3 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $2.4 \pm 1.1 \sim 0.2 \pm 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 카드뮴이 최대 $12 \pm 4 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $7 \pm 3 \sim 0.6 \pm 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$), 11월의 경우 철이 최대 $279 \pm 125 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $147 \pm 94 \sim 73 \pm 31 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 아연이 최대 $73 \pm 28 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $41 \pm 24 \sim 16 \pm 9 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 구리가 최대 $37 \pm 13 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $14 \pm 8 \sim 4 \pm 2 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 납이 최대 $5.6 \pm 1.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $3 \pm 1.5 \sim 0.4 \pm 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 카드뮴이 최대 $19 \pm 8 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $10 \pm 6 \sim 0.5 \pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$)로, 11월이 3월보다 다소 높게 나타났다.

조사정점별 해수의 중금속 함량은 산업단지연안의 경우 철이 최대 $279 \pm 125 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $147 \pm 94 \sim 99 \pm 78 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 아연이 최대 $73 \pm 28 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $41 \pm 24 \sim 35 \pm 23 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 구리가 최대 $37 \pm 13 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $14 \pm 8 \sim 10 \pm 5 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 납이 최대 $5.6 \pm 1.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $3 \pm 1.5 \sim 1.1 \pm 0.6 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 카드뮴이 최대 $19 \pm 8 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $10 \pm 6 \sim 6 \pm 3 \mu\text{g L}^{-1}$), 대조구의 경우 철이 최대 $148 \pm 75 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $73 \pm 31 \sim 61 \pm 14 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 아연

Table 2. Concentrations of heavy metals in seawater of Mokpo coastal region, southwestern coast of Korea

Month	Station		Seawater ($\mu\text{g L}^{-1}$)				
			Fe	Zn	Cu	Cd	Pb
March	1	Max.	235 ± 78	59 ± 12	28 ± 7	12 ± 4	5.1 ± 1.3
		Mean	102 ± 81	36 ± 8	10 ± 5	7 ± 3	2.4 ± 1.1
		Min.	57 ± 20	19 ± 3	6 ± 2	3 ± 0.5	0.9 ± 0.3
	2	Max.	216 ± 63	64 ± 20	21 ± 8	11 ± 3	3.4 ± 0.9
		Mean	99 ± 78	39 ± 25	11 ± 6	6 ± 3	1.1 ± 0.6
		Min.	45 ± 16	16 ± 4	7 ± 3	2 ± 0.7	0.6 ± 0.2
	3	Max.	132 ± 48	32 ± 7	11 ± 4	1 ± 0.4	0.8 ± 0.2
		Mean	61 ± 14	14 ± 5	5 ± 3	0.6 ± 0.2	0.2 ± 0.1
		Min.	26 ± 7	6 ± 1	2 ± 0.6	< 0.1	< 0.1
November	1	Max.	279 ± 125	73 ± 28	37 ± 13	18 ± 7	5.6 ± 1.4
		Mean	147 ± 94	41 ± 24	14 ± 8	9 ± 5	3 ± 1.5
		Min.	77 ± 28	21 ± 9	7 ± 4	5 ± 1	1 ± 0.4
	2	Max.	265 ± 116	69 ± 29	29 ± 11	19 ± 8	4.3 ± 1.1
		Mean	105 ± 68	35 ± 23	13 ± 7	10 ± 6	2.1 ± 1.3
		Min.	53 ± 21	17 ± 6	5 ± 2	4 ± 0.9	0.8 ± 0.4
	3	Max.	148 ± 75	30 ± 11	9 ± 3	1.2 ± 0.5	0.9 ± 0.3
		Mean	73 ± 31	16 ± 9	4 ± 2	0.5 ± 0.3	0.4 ± 0.2
		Min.	32 ± 12	5 ± 2	1.6 ± 0.9	< 0.1	< 0.1

1, Samho; 2, Sanchung; 3, Heugsando

Table 3. Concentrations of heavy metals in sediments of Mokpo coastal region, southwestern coast of Korea

Month	Station		Sediment ($\mu\text{g g}^{-1}$ dw)				
			Fe	Zn	Cu	Cd	Pb
March	1	Max.	912 ± 157	98 ± 26	18 ± 6.4	1.9 ± 0.6	46 ± 11
		Mean	640 ± 151	76 ± 38	10.2 ± 4.1	0.8 ± 0.4	28 ± 15
		Min.	496 ± 96	32 ± 9	6.4 ± 2.6	0.5 ± 0.2	12 ± 9
	2	Max.	778 ± 142	85 ± 21	16 ± 7	1.8 ± 0.7	44 ± 13
		Mean	394 ± 101	53 ± 26	11 ± 5.5	0.9 ± 0.5	21 ± 14
		Min.	166 ± 37	29 ± 9	5.2 ± 3.4	0.5 ± 0.2	9 ± 5
	3	Max.	336 ± 55	21 ± 10	3.6 ± 0.9	0.7 ± 0.3	10 ± 2.5
		Mean	148 ± 46	12 ± 6	1.7 ± 0.8	0.3 ± 0.1	3.1 ± 1.2
		Min.	84 ± 13	5 ± 2	0.5 ± 0.1	< 0.1	0.7 ± 0.2
November	1	Max.	937 ± 142	89 ± 27	21 ± 8	2.2 ± 0.8	51 ± 15
		Mean	595 ± 173	64 ± 39	11 ± 5	1 ± 0.6	26 ± 14
		Min.	384 ± 109	28 ± 12	5 ± 2	0.6 ± 0.3	11 ± 7
	2	Max.	807 ± 158	95 ± 33	19 ± 8	1.9 ± 0.8	48 ± 21
		Mean	431 ± 126	50 ± 29	10 ± 6	0.9 ± 0.7	27 ± 11
		Min.	230 ± 113	22 ± 11	5.1 ± 3	0.6 ± 0.3	12 ± 8
	3	Max.	294 ± 101	18 ± 7	3.4 ± 1.1	0.9 ± 0.4	11 ± 3
		Mean	139 ± 85	9 ± 3	1.5 ± 0.9	0.4 ± 0.2	4 ± 2.5
		Min.	65 ± 21	4 ± 1.5	0.7 ± 0.3	< 0.1	0.9 ± 0.5

1, Samho; 2, Sanchung; 3, Heugsando

이 최대 $32 \pm 7 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $16 \pm 9 \sim 14 \pm 5 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 구리가 최대 $11 \pm 4 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $5 \pm 3 \sim 4 \pm 2 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 납이 최대 $0.9 \pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $0.4 \pm 0.2 \sim 0.2 \pm 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$)였고, 카드뮴이 최대 $1.2 \pm 0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $0.6 \pm 0.2 \sim 0.5 \pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$)로, 산업단지연안 해수의 함량은 대조구에 서의 중금속 함량보다 월등히 높게 나타났다.

해수의 용존성 구리, 납, 아연 및 카드뮴의 농도는 산업단지연안에서 대조구보다 2~10배 정도 높게 측정되었는데, 이는 김 등(1994)에 의해 진해만에서 측정된 (Cu: $0.22 \sim 1.70 \mu\text{g L}^{-1}$, Pb: $0.010 \sim 0.237 \mu\text{g L}^{-1}$, Zn: $0.12 \sim 10.58 \mu\text{g L}^{-1}$, Cd: $0.012 \sim 0.103 \mu\text{g L}^{-1}$) 값들 보다도 다소 높은 것으로, 목포연안에 위치한 산업단지 인근해역

Table 4. Concentrations of heavy metals in seaweeds of Mokpo coastal region, southwestern coast of Korea

Species	Month	Station		Seaweed ($\mu\text{g g}^{-1}$ dw)				
				Fe	Zn	Cu	Cd	Pb
<i>Ulva pertusa</i>	March	1	Max.	1522 ± 123	238 ± 59	47 ± 5	2.9 ± 0.4	26 ± 5
			Mean	1103 ± 397	195 ± 86	28 ± 15	1.6 ± 0.5	14 ± 5
			Min.	594 ± 72	83 ± 11	17 ± 3	0.8 ± 0.1	9 ± 2
		2	Max.	1318 ± 110	254 ± 55	42 ± 8	3.2 ± 0.5	19 ± 4
			Mean	1043 ± 342	203 ± 92	31 ± 10	1.8 ± 0.9	9.6 ± 5
			Min.	485 ± 59	97 ± 10	15 ± 3	1.1 ± 0.2	5 ± 1
		3	Max.	728 ± 93	162 ± 15	15 ± 4	0.7 ± 0.3	4 ± 0.7
			Mean	583 ± 116	103 ± 78	11 ± 6	0.4 ± 0.3	2 ± 0.9
			Min.	432 ± 35	54 ± 8	8 ± 2	<0.1	0.7 ± 0.2
November	November	1	Max.	1327 ± 119	205 ± 65	35 ± 6	2.7 ± 0.5	24 ± 8
			Mean	785 ± 314	111 ± 76	17 ± 9	1.5 ± 0.8	11 ± 7
			Min.	293 ± 58	58 ± 7	11 ± 2	0.9 ± 0.2	8 ± 1
		2	Max.	1116 ± 108	189 ± 47	32 ± 7	2.5 ± 0.6	21 ± 9
			Mean	604 ± 316	97 ± 64	19 ± 10	1.4 ± 0.8	9.2 ± 6
			Min.	215 ± 47	48 ± 6	10 ± 2	0.6 ± 0.2	4.5 ± 0.8
		3	Max.	502 ± 89	98 ± 11	13 ± 1	0.6 ± 0.2	6 ± 0.9
			Mean	358 ± 141	56 ± 27	7 ± 4	0.4 ± 0.2	3 ± 1
			Min.	143 ± 24	27 ± 2	3 ± 0.6	<0.1	0.8 ± 0.3
<i>Sargassum thunbergii</i>	March	1	Max.	1319 ± 135	225 ± 62	52 ± 11	3.7 ± 0.9	29 ± 9
			Mean	854 ± 348	173 ± 94	27 ± 14	2.5 ± 1.1	16 ± 10
			Min.	375 ± 43	72 ± 9	19 ± 5	1.2 ± 0.4	10 ± 1
		2	Max.	1182 ± 124	263 ± 66	49 ± 9	3.4 ± 0.7	21 ± 6
			Mean	744 ± 295	167 ± 98	23 ± 12	2.1 ± 1	11 ± 6
			Min.	327 ± 41	85 ± 11	17 ± 4	1 ± 0.3	6 ± 0.7
		3	Max.	536 ± 65	148 ± 13	18 ± 6	0.9 ± 0.4	7 ± 1
			Mean	278 ± 94	83 ± 47	9 ± 5.7	0.3 ± 0.2	3 ± 1.1
			Min.	183 ± 22	34 ± 5	6 ± 1	<0.1	0.9 ± 0.3
November	November	1	Max.	1257 ± 142	203 ± 76	57 ± 12	4.2 ± 1.1	35 ± 11
			Mean	759 ± 335	113 ± 89	24 ± 15	2.8 ± 1.5	19 ± 12
			Min.	348 ± 51	67 ± 10	18 ± 6	1.4 ± 0.7	9 ± 1.4
		2	Max.	1118 ± 135	232 ± 72	47 ± 10	3.7 ± 0.9	26 ± 9
			Mean	682 ± 351	130 ± 84	21 ± 13	2.3 ± 1.2	13 ± 9
			Min.	289 ± 37	71 ± 10	14 ± 5	1.1 ± 0.4	7 ± 1
		3	Max.	468 ± 71	120 ± 28	19 ± 8	1 ± 0.5	8 ± 0.9
			Mean	236 ± 118	68 ± 34	10 ± 7	0.4 ± 0.3	5 ± 1.6
			Min.	172 ± 36	28 ± 6	7 ± 1.5	<0.1	0.8 ± 0.4
<i>Caulacanthus okamurae</i>	March	1	Max.	1198 ± 121	194 ± 67	32 ± 7	2.6 ± 0.8	22 ± 9
			Mean	623 ± 348	101 ± 81	16 ± 10	1.4 ± 0.7	12 ± 8
			Min.	219 ± 37	52 ± 9	9 ± 1	0.7 ± 0.3	7 ± 1.3
		2	Max.	984 ± 112	224 ± 86	29 ± 9	2.6 ± 0.8	24 ± 11
			Mean	483 ± 264	129 ± 88	17 ± 11	1.2 ± 0.6	11 ± 7
			Min.	172 ± 34	68 ± 7	10 ± 3	0.6 ± 0.3	5 ± 0.9
		3	Max.	323 ± 69	96 ± 21	12 ± 3	0.5 ± 0.1	8 ± 1
			Mean	184 ± 98	47 ± 32	6 ± 4	0.3 ± 0.1	5 ± 1.9
			Min.	76 ± 25	22 ± 5	2 ± 0.5	<0.1	1.1 ± 0.7
November	November	1	Max.	1275 ± 136	206 ± 75	35 ± 8	2.9 ± 1.2	26 ± 12
			Mean	749 ± 353	127 ± 104	18 ± 11	1.6 ± 0.8	14 ± 8.4
			Min.	257 ± 41	73 ± 14	8 ± 2	0.6 ± 0.4	6 ± 1.1
		2	Max.	1188 ± 129	222 ± 93	33 ± 12	2.8 ± 0.9	27 ± 13
			Mean	531 ± 274	133 ± 91	19 ± 12	1.1 ± 0.8	13 ± 8
			Min.	195 ± 57	70 ± 11	7 ± 2	0.7 ± 0.4	5.6 ± 1.3
		3	Max.	332 ± 79	89 ± 23	13 ± 5	0.5 ± 0.2	9 ± 3
			Mean	179 ± 103	44 ± 31	7 ± 4	0.3 ± 0.1	4.7 ± 2.6
			Min.	85 ± 37	23 ± 9	2.5 ± 0.8	<0.1	1.2 ± 0.8

1, Samho; 2, Sanchung; 3, Heugsando

의 중금속 오염이 상당한 수준임을 나타낸 것이라 하겠다.

2. 퇴적물의 중금속 함량

목포연안 퇴적물의 중금속 함량은 Table 3과 같다. 조사 시기별 퇴적물의 중금속 함량은 3월의 경우 철이 최대 $912 \pm 157 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $640 \pm 151 \sim 148 \pm 46 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $98 \pm 26 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $76 \pm 38 \sim 12 \pm 6 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $18 \pm 6.4 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $11 \pm 5.5 \sim 1.7 \pm 0.8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $46 \pm 11 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $28 \pm 15 \sim 3.1 \pm 1.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $1.9 \pm 0.6 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $0.9 \pm 0.5 \sim 0.3 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 11월의 경우 철이 최대 $937 \pm 142 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $595 \pm 173 \sim 139 \pm 85 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $89 \pm 27 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $64 \pm 39 \sim 9 \pm 3 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $21 \pm 8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $11 \pm 5 \sim 1.5 \pm 0.9 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $51 \pm 15 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $26 \pm 14 \sim 4 \pm 2.5 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $2.2 \pm 0.8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $1 \pm 0.6 \sim 0.4 \pm 0.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)로, 11월이 3월보다 다소 높게 나타났다.

조사정점별 퇴적물의 중금속 함량은 산업단지연안의 경우 철이 최대 $937 \pm 142 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $640 \pm 151 \sim 394 \pm 101 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $98 \pm 26 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $76 \pm 38 \sim 50 \pm 29 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $21 \pm 8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $11 \pm 5.5 \sim 10 \pm 6 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $51 \pm 15 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $28 \pm 15 \sim 21 \pm 14 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $2.2 \pm 0.8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $0.8 \pm 0.4 \sim 0.3 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 대조구의 경우 철이 최대 $336 \pm 55 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $148 \pm 46 \sim 139 \pm 85 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $21 \pm 10 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $12 \pm 6 \sim 9 \pm 3 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $3.6 \pm 0.9 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $1.7 \pm 0.8 \sim 1.5 \pm 0.9 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $11 \pm 3 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $4 \pm 2.5 \sim 3.1 \pm 1.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $0.9 \pm 0.4 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $0.4 \pm 0.2 \sim 0.3 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)로, 산업단지연안 퇴적물에서 모든 중금속의 함량이 대조구에서의 중금속 함량보다 월등히 높게 나타났다.

퇴적물에서 중금속 함량은 오염물질의 유입과 같은 인위적인 영향을 받을 경우 자연상태보다 더 농축될 가능성이 있으며(조 등 1994), 구리, 아연 및 납은 소위 오염형 원소로서 산업활동에 의해 환경으로 쉽게 유출된다(Jung *et al.* 1996; 조와 김 1998). 목포연안 산업단지 주변 퇴적물의 중금속 함량은 대조구 주변 퇴적물의 중금속 함량보다 3~8배 높은 것으로 분석되었다. 이와 같은 중금속 함량은 우리나라 연안 퇴적물에서 보고된 것들

보다도 높은 것으로, 조사지역에서 구리, 아연 및 납과 같은 중금속의 함량이 높은 것은 목포연안 주변의 산업 시설과 조석소 등으로부터의 오염물질 유입 가능성을 시사한다 하겠다.

3. 해조류의 중금속 함량

해조류의 중금속 함량은 Table 4와 같다. 해조류 종별 중금속 함량은 구멍갈파래의 경우 철이 최대 $1,522 \pm 123 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $1,103 \pm 397 \sim 358 \pm 141 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 아연이 최대 $254 \pm 55 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $203 \pm 92 \sim 56 \pm 27 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 구리가 최대 $47 \pm 5 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $31 \pm 10 \sim 7 \pm 4 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 납이 최대 $26 \pm 5 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $14 \pm 5 \sim 3 \pm 1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 카드뮴이 최대 $3.2 \pm 0.5 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $1.8 \pm 0.9 \sim 0.4 \pm 0.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 지층이의 경우 철이 최대 $1,319 \pm 135 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $854 \pm 348 \sim 236 \pm 118 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 아연이 최대 $263 \pm 66 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $173 \pm 94 \sim 68 \pm 34 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 구리가 최대 $57 \pm 12 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $27 \pm 14 \sim 10 \pm 7 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 납이 최대 $35 \pm 11 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $19 \pm 12 \sim 5 \pm 1.6 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 카드뮴이 최대 $4.2 \pm 1.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $2.8 \pm 1.5 \sim 0.3 \pm 0.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 애기가시덤불의 경우 철이 최대 $1,275 \pm 136 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $749 \pm 353 \sim 179 \pm 103 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 아연이 최대 $224 \pm 86 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $133 \pm 91 \sim 44 \pm 31 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 구리가 최대 $35 \pm 8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $19 \pm 12 \sim 6 \pm 4 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 납이 최대 $36 \pm 12 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $14 \pm 8.4 \sim 4.7 \pm 2.6 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 카드뮴이 최대 $2.9 \pm 1.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $1.6 \pm 0.8 \sim 0.3 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)로 구멍갈파래, 지층이 및 애기가시덤불 순이었다.

조사 시기별 해조류의 중금속 함량은 3월의 경우 철이 최대 $1,522 \pm 123 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $1,103 \pm 397 \sim 184 \pm 98 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $263 \pm 66 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $195 \pm 86 \sim 47 \pm 32 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $52 \pm 11 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $28 \pm 15 \sim 6 \pm 4 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $29 \pm 9 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $16 \pm 10 \sim 2 \pm 0.9 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $3.7 \pm 0.9 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $2.5 \pm 1.1 \sim 0.3 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 11월의 경우 철이 최대 $1,327 \pm 119 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $785 \pm 314 \sim 179 \pm 103 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $232 \pm 72 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $130 \pm 84 \sim 44 \pm 31 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $57 \pm 12 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $24 \pm 15 \sim 7 \pm 4 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $35 \pm 11 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $19 \pm 12 \sim 3 \pm 1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $4.2 \pm 1.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $2.8 \pm 1.5 \sim 0.3 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)로, 3월이 11월보다 다소 높게 나타났다.

조사정점별 해조류의 중금속 함량은 산업단지 연안의

경우 철이 최대 $1,522 \pm 123 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $1,103 \pm 397 \sim 483 \pm 264 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $263 \pm 66 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $203 \pm 92 \sim 97 \pm 64 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $52 \pm 11 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $28 \pm 15 \sim 16 \pm 10 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $35 \pm 11 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $19 \pm 12 \sim 9.2 \pm 6 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $4.2 \pm 1.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $2.8 \pm 1.5 \sim 0.6 \pm 0.2 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$), 대조구의 경우 철이 최대 $728 \pm 93 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $583 \pm 116 \sim 85 \pm 37 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 아연이 최대 $162 \pm 15 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $103 \pm 76 \sim 44 \pm 31 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 구리가 최대 $19 \pm 8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $10 \pm 7 \sim 2.5 \pm 0.8 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 납이 최대 $9 \pm 3 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $5 \pm 1.9 \sim 3 \pm 1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)였고, 카드뮴이 최대 $1 \pm 0.5 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$ (평균 $0.4 \pm 0.3 \sim 0.3 \pm 0.1 \mu\text{g g}^{-1} \text{ dw}$)로, 산업단지 연안에서 해조류의 모든 중금속의 함량이 대조구에서의 중금속 함량보다 월등히 높게 나타났다.

해조류의 중금속 축적은 지역, 계절별, 년도별, 중금속의 종류와 해조류의 종류에 따라 차이를 보인다(Topcuoglu et al. 2001). 본 연구에서도 목포연안에 서식하는 해조류의 중금속 함량은 해조류의 종에 따라 중금속의 함량이 달라 구멍갈파래는 철과 아연의 함량이 높았고, 지층이는 구리, 카드뮴 및 납의 함량이 높았다. 그러나 애기가시덤불의 중금속 함량은 구멍갈파래와 지층이의 중금속 함량 보다 모두 낮은 것으로 분석되었다. 해조류의 생육시기에 따라 중금속 함량은 차이를 보였는데, 구멍갈파래의 경우는 11월의 중금속 함량보다 3월의 중금속 함량이 대체로 높은 것으로 분석되었고, 지층이의 경우 철과 아연의 함량은 3월에 높았으며, 구리, 카드뮴 및 납의 함량은 11월에 높았다. 애기가시덤불의 경우는 3월의 중금속 함량보다 11월의 중금속 함량이 높은 것으로 분석되었다. 조사정점에 따라서도 중금속의 함량은 큰 차이를 보였다. 산업단지 인근 해조류의 중금속 함량은 대조구 인근 해조류의 중금속 함량에 비해 4~6배 높은 것으로 분석되었다. 이와 같이 해조류의 종, 생육시기 및 서식지에 따라 중금속의 함량이 상이하게 나타나는 것은 해조류 종 자체의 중금속 축적 대사능력의 차이와 주 생육시기의 차이뿐만 아니라 해수에 포함되어 있는 중금속 함량 등의 차이로부터 기인되는 것으로 사료되었다. 또한 분석된 종들 중에서 중금속의 함량이 높았던 종은 녹조식물문에 속하는 구멍갈파래였다. 갈파래류는 범세계적 종으로 많은 국가들의 연안역 중금속 오염의 지표종으로 널리 쓰이고 있는데(Levine 1984), 본 연구의 결과에서도 목포연안역 산업단지 인근의 구멍갈파래의 중금속 함량이 비오염 지역의 구멍갈파래 보다 높은 것으로 나타나 연안역 중금속 오염의 지표종으로서 이용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

사 사

본 연구는 2006학년도 목포대학교 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- 김경태, 홍기훈, 이수형. 1994. 진해만 표층해수중의 중금속 농도 분포. 한국해양학회지. 16:19-27.
- 김신영, Sidharthan M, 유용훈, 임치영, 진형주, 유종수, 신현웅. 2003. 해조류의 중금속 축적에 관한 연구. Algae 18:349-354.
- 이인숙, 노분조, 송준임, 김은정. 1996. 한국 임해 공단 연안에서 퇴적물, 해수 및 굴(*Crassostrea gigas*)의 중금속 함량. 한국생태학회지. 19:261-270.
- 조영길, 김주용. 1998. 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국환경과학회지. 7:281-290.
- 조영길, 이창복, 최만식. 1994. 남해 대륙붕 표층퇴적물 중 중금속 원소의 분포 특성. 한국해양학회지. 29:338-356.
- 전수경, 조영길. 2002. 서남해안 연근해저 퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국환경과학회지. 11:1299-1305.
- Buridin KS and KT Bird. 1994. Heavy metal accumulation by carrageenan and agar producing algae. Bot. Mar. 37:467-470.
- Chung IK and JA Lee. 1989. The effects of heavy metals in seaweeds. Kor. J. Phycol. 4:221-238.
- Dawes CJ. 1998. Marine botany. John Wiley & Sons, Inc. NY. 480pp.
- Danielsson LG, S Magnusson, S Westerlund and K Zhang. 1982. Trace metal determinations in estuarine waters by AAS after extraction of dithiocarbamate complexes into freon. Anal. Chim. Acta. 144:183-188.
- IMWC. 1990. The international mussel watch committee Cochinchina estuary determined using chemical extraction techniques. Sci. Total Environ. 102:113-128.
- Jung HS, YG Lee, YG Cho and JK Kang. 1996. A mechanism for the enrichments of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Banweol intertidal flat in Korea. Mar. Pollution Bull. 32:782-787.
- Keeney WL, WG Breck, GW Van Loon and JA Page. 1976. The determination of trace metals in *Cladophora glomerata-C. glomerata* as a potential biological monitor. Water Res. 10:981-984.
- Leal MFC, MTSD Vasconcelos, I Sousa-Pinto and JPS Cabral. 1997. Biomonitoring with benthic macroalgae and direct assay of toxic metals in seawater of the Oporto Coast (Northwest Portugal). Mar. Pollut. Bull. 34:1006-1015.

- Levine HG. 1984. The use of seaweeds for monitoring coastal waters pp. 189-210. In *Algae as ecological indicators* (Shubert EL ed.). Academic Press.
- Murugadas TL, SM Phang and SL Tong. 1995. Heavy metal accumulation patterns in selected seaweed species of Malaysia. *Asia Pac. J. Mol. Biol. Biotechnol.* 3:290-310.
- Sandau E, P Sandau, O Pulz and M Zimmermann. 1996. Heavy metal sorption by marine algae and algal by-products. *Acta Biotechnol.* 16:103-119.
- Topcuoğlu S, KC Güven, Ç Kirbaşoğlu, N Güngör, S Ünlü and YZ Yilmaz. 2001. Heavy metals in marine algae from Şile in the Black Sea. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 67:288-294.
- Vasconcelos MTSD and MFC Leal. 2001. Seasonal variability in the kinetics of Cu, Pb, Cd and Hg accumulation by macroalgae. *Mar. Chem.* 74:65-85.

Manuscript Received: August 7, 2008
Revision Accepted: November 15, 2008
Responsible Editor: Jae-Seok Lee