

## 목포연안 갯벌 및 서식생물에서의 중금속 함량

나춘기\*

목포대학교 환경공학과

### Heavy Metals in Sediments and Organisms from Tidal Flats along the Mokpo Coastal Area

Choon Ki Na

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea

Total and extractable contents of heavy metals were measured in sediment and seafood from Bukhang and Boggil-ri tidal flats along the Mokpo coastal area, south-western part of Korean peninsular in order to assess the degree of metal pollution, metal bioavailability and metal bioaccumulation. The metal concentrations, except Pb were found to be greater than the background concentrations of sediments indicating the progress of cumulative contamination by anthropogenic origin of metals. The order of extractable metal concentrations in sediments were Mn(32-53 mg/kg)>Zn(14-42 mg/kg)>Cu(2.5-17.0 mg/kg)>Pb(2.4-6.8 mg/kg)>Cd(0.5-0.7 mg/kg). However, the amount of metals associated with extractable fraction of sediments were significantly high in Bukhang relative to Boggil-ri. Significant bioaccumulation of all metals, except Pb were observed in seaweed and benthos. The order of bioaccumulation of metals were: in concentration; all biota commonly, Mn(129-374 mg/kg)>Zn(19-106 mg/kg)>Cu(6-87 mg/kg)>Cd(4.6-7.6 mg/kg)>Pb(0.2-3.7 mg/kg), in BCF; *Enteromorpha*, Cd>Mn>Cu>Zn>Pb, *Ilyoplax deschampsii*, Cu>Cd>Mn>Zn>Pb, *Urechis unicinctus*, Cd>Zn>Mn>Cu>Pb. Some metal concentrations of *Enteromorpha*, especially Cu, Zn, weakly Pb in bukhang, Mn, Cd in boggili-ri, were correlate well with concentrations in sediment, indicating relatively more contaminated by the anthropogenic origin of metals in each tidal flat. The results clearly indicate that the seafood of bukhang, even of Boggili-ri known as clean area, are contaminated with metals.

**Key words** : tidal mudflat, sediments, heavy metal, bioavailability, bioaccumulation

목포연안 갯벌의 중금속 오염 및 생물농축정도를 평가하기 위하여 북항 및 북길리 갯벌의 퇴적물 및 서식생물 중의 중금속 함량을 측정하였다. 갯벌 퇴적물중의 중금속 함량은 Pb를 제외하고는 모두 배경값에 비해 매우 높게 나타나 조사지역 갯벌이 인위적인 금속 오염원에 의한 누적오염이 진행되었음을 시사하였다. 퇴적물에서 가용성 금속함량은 갯벌에 관계없이 공통적으로 Mn(32-53 mg/kg)>Zn(14-42 mg/kg)>Cu(2.5-17.0 mg/kg)>Pb(2.4-6.8 mg/kg)>Cd(0.5-0.7 mg/kg)순으로 높았다. 그러나 가용성염으로 존재하는 중금속 함량은 북길리 갯벌에 비해 북항 갯벌쪽이 높았다. 갯벌내에서 서식하는 해조류 및 저서생물에서 Pb를 제외한 모든 중금속들이 높은 비율로 축적되어있음을 보였다. 중금속의 생물축적 정도는, 농도면에서는 모든 생물이 공통적으로 Mn(129-374 mg/kg)>Zn(19-106 mg/kg)>Cu(6-87 mg/kg)>Cd(4.6-7.6 mg/kg)>Pb(0.2-3.7 mg/kg) 순이었으나, 생물축적률면에서는 파래가 Cd>Mn>Cu> Zn>Pb, 개불이 Cu>Cd>Mn>Zn>Pb, 털콩게가 Cd>Zn>Mn>Cu>Pb 순을 나타냈다. 파래중의 일부 중금속들 특히 북항의 Cu, Zn 그리고 미약하게 Pb, 북길리의 Mn, Cd은 퇴적물중의 중금속 함량과 비례적인 관계를 보여, 각 갯벌에서 이들 중금속들이 인위적 오염원에 의해 상대적으로 더 오염되어있음을 시사하였다. 이상의 결과들은 북항은 물론 청정 지역으로 알려진 북길리 갯벌의 해산물이 중금속에 의해 오염되어 있음을 나타내었다.

**주요어** : 갯벌, 퇴적물, 중금속, 생물이용도, 생물축적

\*Corresponding author: nack@mokpo.ac.kr

## 1. 서 론

우리나라 서·남해안에는 약 2,393 km<sup>2</sup>의 갯벌이 분포되어 있으며, 이는 국토면적의 2.4%에 해당된다. 그 중 서해안 지역에 전체 갯벌면적의 약 83%인 1,980 km<sup>2</sup>가 분포되어 있으며 나머지는 남해안에 산재되어 있다. 갯벌은 다양한 생물종의 서식처로 생산능력이 매우 높을 뿐만 아니라 오염정화, 홍수 및 태풍조절 등 그 기능의 중요성이 높이 평가되고 있다. 그러나 우리나라 갯벌은 국토확장 또는 농경지 및 산업단지 개발이란 명목 하에 이미 30% 이상이 간척매립공사에 의해 훼손되었거나 상실되었으며, 현재도 새만금을 포함한 9개 지역에서 매립사업이 진행될 정도로 갯벌이 보전의 대상이라기 보다는 오히려 개발의 대상이 되고 있다. 간척매립사업은 국토 확장이나 지역발전이라는 측면에서 보면 긍정적인 면도 있지만 자연환경의 변화라는 측면에서는 그 정도가 심각함에도 불구하고 과소 평가되고 있다. 더구나 공업화와 도시화가 진행되면서 연안환경, 특히 도시 및 공업단지 주변 하구 및 갯벌에 유기오염과 더불어 중금속 오염을 증가시키는 결과를 초래하여 오염정화는 물론 생물생산기반으로써 그 기능이 점차 상실되어 가고 있는 실정이다.

중금속은 지각의 구성분으로 존재하기 때문에 지질 환경에 따라 다양한 수준의 배경농도를 갖는다. 많은 중금속들은 생명체를 위한 필수원소이기도 하지만 그 농도가 적절한 수준을 초과할 경우 대부분 독성을 나타낼 뿐만 아니라 생태계에 영향을 끼치지 않는 농도에서도 생물축적과 먹이사슬을 통해 인체에 중독장애를 유발하기도 한다. 이에 따라 연안해역에 유입 또는 퇴적층에 축적되어있는 중금속이 생태계에 미치는 위해성과 환경에 미치는 영향의 평가는 많은 관심사가 되고있다. 일반적으로 퇴적물 중의 중금속은 그 존재 형태 및 주변환경(온도, pH, Eh 등)에 따라 생물이용도(bioavailability)가 상당히 달라질 수 있기 때문에 중금속의 잠재적인 독성효과를 평가하기 위한 지표로서 총합량적인 차원의 접근은 그 효용성이 낮은 것으로 알려져 있다(Chapmann *et al.*, 1998; Pemkowiase *et al.*, 1999; Borgmann *et al.*, 2001). 따라서 어패류를 이용하는 생물모니터링이 연안환경의 중금속 오염을 평가하는데 있어 널리 이용되고 있다(Goldberg *et al.*, 1978; NOAA, 1989; O'Coner, 1992; Addison, 1996; Hung *et al.*, 2001, 황갑수 등, 2002).

목포연안에는 임자도, 지도 및 함평 해안가를 따라 수많은 갯벌이 분포되어 있으며, 굴곡이 많은 해안선

의 특성상 소규모의 갯벌로 이루어져 있지만 총면적이 900 km<sup>2</sup>에 이를 정도로 넓다. 목포시 주변에 산재되어 있는 갯벌은 1980년대부터 이루어진 방조제 공사, 산업단지 및 신도시 조성 등으로 대부분 상실되었으며, 남아있는 갯벌 역시 도시의 하·폐수 영향으로 대부분 오염되어있어 생물생산기반으로서의 그 가치가 점차 상실되어가고 있다. 그럼에도 불구하고 목포연안에 분포하고 있는 갯벌환경에 대해서는 아직까지 기초적 조사도 이루어진 바 없는 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 목포연안 갯벌환경의 기초적 자료를 축적하기 위한 일환으로 도시를 배후로 하는 목포시 북항갯벌과 전형적인 농어촌 지역으로 비교적 청정도를 유지하고 있는 청계면 복길리 갯벌의 퇴적물 및 서식생물을 대상으로 갯벌의 물리적 특성 및 중금속의 오염도, 서식 생물체내의 중금속 부화정도를 조사하였으며, 그 결과를 바탕으로 목포연안 갯벌의 환경오염도를 비교 평가하였다.

## 2. 시료채취 및 실험방법

### 2.1. 시료채취

갯벌시료와 생물시료는 2003년 6월에 북항과 복길리의 총 11개 지점에서 채취하였다(Fig. 1). 갯벌시료는 각 채취점의 국부적 불균일성을 극복할 수 있도록 최소 1 m<sup>2</sup>의 면적에서 일정량씩 5지점의 시료를 채취하여 혼합한 시료를 1개 시료로 하였다. 시료채취는 직경 5 cm의 플라스틱제 채취관을 이용하여 깊이 5-20 cm의 갯벌을 대상으로 하였다. 채취된 갯벌시료는 플라스틱 용기에 넣어 실험실로 운반하여 냉동 보관하였다. 생물시료로는 해조류인 파래(*Enteromorpha*), 연체류인 개불(*Urechis unicinctus*), 갑각류인 필콩게(*Ilyoplax deschampsii*)를 대상으로 하였으며 파래와 개불은 갯벌 시료와 동일한 지점에서 각각 채취하였고, 필콩게는 활동반경이 넓다는 점을 감안하여 갯벌시료 채취점과 상관없이 각 지역에서 무작위로 채취하여 혼합한 시료를 각 지역의 대표시료로 하였다. 각 생물시료는 비닐 팩에 넣어 실험실로 운반한 다음 증류수로 충분히 세척하고, 전기건조기를 이용하여 완전히 건조시킨 후 분쇄하여 분말시료로 보관하였다.

### 2.2. 시료의 전처리 및 분석

#### 2.2.1. 갯벌시료

##### 1) 입도분석

채취된 퇴적물은 전처리 과정으로서 증류수로 탈염

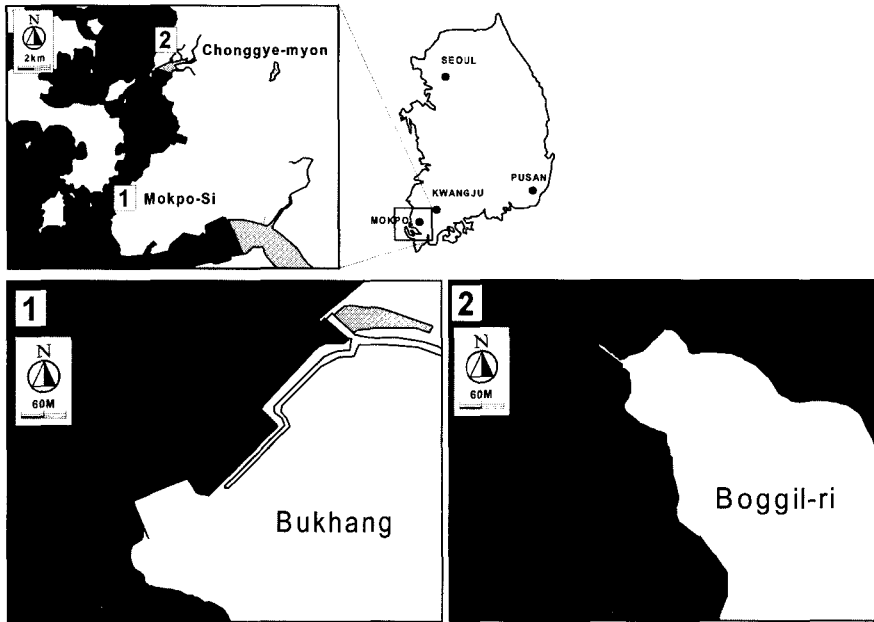


Fig. 1. Map showing sampling sites (1: Bukhang, 2: Boggil-ri, Longitude: 126°18'32~126°29'33, Latitude : 34°46'27~34°56'38).

시키고, 30% 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)로 유기물을 분해시켰다. 전처리가 끝난 시료를 대상으로 Sedigraph 5100을 이용하여 입도분포를 분석하였다.

2) 강열감량

유기물 함량을 조사하기 위하여 강열감량을 측정하였다. 강열감량이 곧 유기물 함량을 의미하는 것은 아니지만 간접적인 지표로서 쓰인다. 젖은 시료 약 50g을 플라스틱 손가락을 이용하여 125 ml 광구 플라스틱 병에 분취하고 냉동고에서 완전히 얼린다. 이를 동결 건조기에 넣고 완전히 건조시킨 후 230 mesh(0.063 mm)이하의 크기로 분쇄하였다(이하 분말시료). 분말시료 5g을 25 ml 도가니에 넣고 110°C 건조기에서 향량이 될 때까지 건조한 후 전기로를 이용하여 550°C에서 2시간 가열한 다음 무게변화로부터 강열감량(%)을 구하였다.

3) 완전용해

분말시료 0.2g을 테프론 용기에 칭량한 후 HNO<sub>3</sub> (1.4 ml)+HF(2 ml)+HClO<sub>4</sub>(0.6 ml)을 첨가하고 밀폐한 다음 100±5°C 건조기에서 12시간 가열하였다. 그 후 상온까지 방냉하고 200°C 열판 상에서 증발 건조시킨 다음 0.1N HCl 20 ml를 넣고 다시 밀폐하여 건조기 (100±5°C)에서 12시간 이상 가열하여 재용해시킨 후 0.45 μm 막박여과지를 이용하여 여과하였다. 그 여액을 대상으로 AAS 및 ICP-AES를 이용하여 중금속 농도를

측정하였다.

4) 용출 실험

용출실험은 각 원소별로 해양환경공정시험방법(1997)에 의거하여 다음과 같이 실시하였다.

Cu: 분말시료 0.2g의 무게를 정확히 칭량하여 50 ml 원심관에 넣고 1N HNO<sub>3</sub> 20 ml를 첨가한 다음 교반기를 이용해 1시간동안 실온에서 교반시켰다. 교반이 끝난 후 4000 rpm에서 10분간 원심분리하는 방법으로 분석용액을 제조하였다.

Pb: 분말시료 0.2g을 정확히 칭량하여 50 ml 원심관에 넣고 1N HNO<sub>3</sub> 5 ml와 1N HCl 5 ml를 첨가한 다음 교반기를 이용해 1시간동안 실온에서 교반시켰다. 교반 후 4000 rpm에서 10분간 원심분리한 상등액을 열판 위에 놓고 모두 증발시킨 다음 1N HNO<sub>3</sub> 10 ml를 넣어 재용해시키는 방법으로 분석용액을 제조하였다.

Mn: 분말시료 0.1g을 50 ml 원심관에 정확히 취하고 1N HCl 20 ml를 첨가한 다음 교반기를 이용해 1시간동안 실온에서 교반한 후 4000 rpm에서 10분간 원심분리하였다. 상등액을 열판 위에 놓고 모두 증발시킨 후 1N HNO<sub>3</sub> 20 ml를 넣어 재용해시키는 방법으로 분석용액을 제조하였다.

Zn: 분말시료 0.2g을 정확히 칭량하여 50 ml 원심관에 넣고 1N HNO<sub>3</sub> 10 ml와 1N HCl 10 ml를 첨가한 다음 교반기를 이용해 1시간동안 실온에서 교반

시켰다. 교반 후 4000 rpm에서 10분간 원심분리한 상등액을 열판 위에 놓고 모두 증발시킨 다음 1N HNO<sub>3</sub> 20 ml를 넣어 재용해시키는 방법으로 분석용액을 제조하였다.

Cd: 분말시료 0.5 g을 50 ml 원심관에 넣고 1N HNO<sub>3</sub> 5ml를 첨가하여 교반기를 이용해 1시간동안 실온에서 교반시킨 다음 4000 rpm에서 10분간 원심분리하는 방법으로 분석용액을 제조하였다.

제조된 각각의 분석용액을 대상으로 AAS 및 ICP-MS를 이용하여 해당 중금속 농도를 정량 분석하였다.

### 2.2.2. 생물시료

분말시료 0.5 g을 테프론 용기에 취하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5ml를 첨가하고 200°C 열판상에서 증발 건조하는 방식으로 유기물을 분해시킨 후 HNO<sub>3</sub>(1.4 ml)+HClO<sub>4</sub>(0.6 ml)을 첨가하고 밀폐한 다음 100±5°C 건조기에서 12시간 가열하였다. 그 후 상온까지 방냉하고 200°C 열판 상에서 증발 건조시킨 다음 0.1N HCl 20 ml를 넣고 다시 밀폐하여 건조기(100±5°C)에서 12시간 이상 가열하여 재용해시킨 후 0.45 µm 막박여과지를 이용하여 여과하였다. 그 여액을 대상으로 AAS 및 ICP-AES를 이용하여 중금속 농도를 측정하고 건조중량당 함유량(mg/kg·dry weight)으로 환산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 갯벌 퇴적물의 물리적 특성

갯벌에서의 입도조성은 갯벌의 물리화학적 특성을 결정하는 중요한 인자이다. 조사지역 갯벌의 입도분포 특

성을 파악하기 위하여 각 갯벌시료를 대상으로 입도분석을 실시한 결과, Table 1과 같았다. 북길리와 북항 갯벌은 clay질이 우세한 B-5를 제외하고는 대부분 silt질이 우세하여 김종구와 유선재(2000)가 보고한 어은리 갯벌의 경우와 비슷한 분포를 보이고 있다. 지역적으로는 북항 갯벌의 경우 모든 시료가 silt질에 속하는 반면 북길리 갯벌의 경우 silt질과 silty clay질이 혼재하는 양상을 보여 북항에 비해 상대적으로 clay 함량이 높은 갯벌특성을 보였다. 유기물 함량의 간접적 지표가 되는 강열감량은 북길리가 4.3-5.8%, 북항이 3.2-4.7%의 범위를 보여 도시를 배후로 하는 북항 갯벌에 비해 전형적인 농어촌 기반을 갖는 북길리 갯벌 쪽이 약간 높은 경향을 보였다. 그럼에도 불구하고 육안적 관찰에서는 북항의 갯벌은 표층하 5-10cm 부근에서 검은 색의 환

**Table 1.** Physical properties of sediments collected from Boggil-ri(B) and Bukhang(N) tidal flat.

Location Site	Grain-size Distribution (%)				Ignition Loss(%)	
	Sand	Silt	Clay	Type		
Boggil-ri	B-1	0.4	62.6	34.0	Silty-Clay	5.779
	B-2	0.8	64.5	32.5	Silty-Clay	4.878
	B-3	7.9	81.1	8.4	Silt	4.917
	B-4	0.7	78.4	19.3	Silt	4.980
	B-5	0.0	5.0	94.2	Clay	5.247
	B-6	0.3	64.1	32.2	Silty-Clay	4.329
Bukhang (north harbor)	N-1	1.1	80.8	17.3	Silt	3.899
	N-2	0.0	97.3	1.1	Silt	4.668
	N-3	0.8	81.4	15.6	Silt	3.249
	N-4	0.3	80.2	17.6	Silt	3.784
	N-5	0.5	87.6	10.2	Silt	4.126

**Table 2.** Total and extracted heavy metal contents in sediments collected from Boggil-ri(B) and Bukhang(N) tidal flat (mg/kg·dry).

Site	Pb		Zn		Mn		Cu		Cd	
	Total	Extract	Total	Extract	Total	Extract	Total	Extract	Total	Extract
B-1	6.00	3.56	139.8	19.1	303.5	38.8	16.76	2.75	10.07	0.68
B-2	11.06	2.41	267.3	14.2	254.9	32.4	15.03	2.48	6.75	0.51
B-3	7.56	3.42	330.2	25.7	316.6	53.1	17.40	3.83	10.88	0.51
B-4	10.19	4.05	365.3	23.9	267.6	32.5	16.35	8.20	10.15	0.63
B-5	6.49	2.74	94.6	19.8	280.2	33.8	16.10	2.77	10.08	0.56
B-6	10.58	4.39	81.4	16.9	250.4	30.2	14.36	2.94	10.02	0.57
average	8.65	3.43	213.1	19.9	278.8	36.8	16.00	3.83	9.66	0.57
±std	2.22	0.75	123.8	4.3	26.6	8.5	1.12	2.19	1.46	0.07
N-1	7.50	4.63	106.9	25.2	315.1	39.0	60.47	7.64	9.36	0.55
N-2	9.30	6.50	134.5	35.5	309.4	46.7	82.31	15.20	9.70	0.59
N-3	9.56	6.92	113.6	33.1	298.0	46.3	73.63	16.99	9.11	0.59
N-4	6.39	4.08	99.3	16.4	328.8	36.7	32.96	4.74	10.26	0.59
N-5	45.46	5.70	149.3	41.6	307.4	45.5	121.43	12.52	9.22	0.53
average	15.64	5.57	120.7	30.4	311.8	42.8	74.16	11.42	9.53	0.57
±std	16.72	1.21	20.7	9.8	11.3	4.7	32.35	5.13	0.46	0.03

원성 때가 나타나는 등 북길리 갯벌에 비해 유기 오염도가 상대적으로 심화되어 있는 양상을 나타냈다.

### 3.2. 갯벌 퇴적물의 중금속 함량

갯벌의 중금속 오염은 인체에 직접적인 위해를 끼치는 것은 아니지만 해산물에 의한 생물학적 축적으로 인해 인간의 건강에 위해 문제가 간접적으로 초래될 수 있다. 본 연구에서 갯벌의 중금속 오염정도를 파악하기 위해 북길리와 북항 갯벌에서 채취한 퇴적물의

중금속 총합량과 용출함량을 측정하였다(Table 2). 갯벌의 중금속 함량은 전체적으로 북길리에 비해 북항쪽이 부화되어 있는 경향을 보였다. 총합량면에서는 Pb와 Cd은 지역적 차이가 거의 없었으며, Zn은 북길리쪽이, Mn과 Cu는 북항쪽이 더 높은 값을 보였다. 반면 용출함량은 지역적 차이가 없는 Cd을 제외하고는 모두 북항쪽이 높게 나타났다. 총 중금속에 대한 가용성 중금속 용출비는  $Pb(48 \pm 19\%) > Cu(20 \pm 11\%) > Zn(18 \pm 9\%) > Mn(13 \pm 2\%) > Cd(6 \pm 1\%)$ 으로 나타났으나, 그

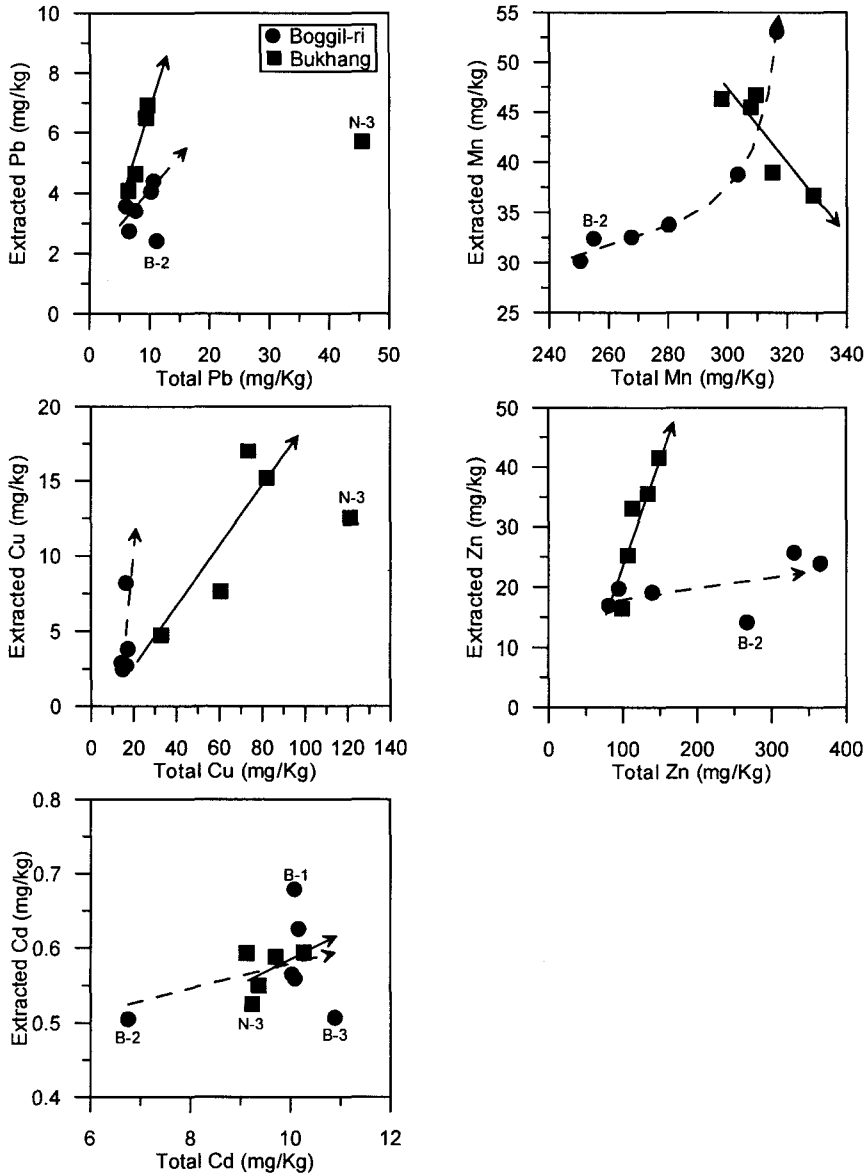


Fig. 2. Relationship of total versus extracted heavy metals in sediments collected from Bukhang and Boggil-ri tidal flat.

양태는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 원소에 따라, 지역에 따라 매우 다양한 차이를 보였다.

Pb 총 함량은 소규모 조선소 및 선박수리센터에 의한 국부적 오염특성을 보이는 N-5(45.46 mg/kg)를 제외하면 6.0-10.6 mg/kg의 범위로 지역간 차이가 거의 없었으며, 황갑수 등(2002)이 제시한 새만금 지역(이하 새만금 지역) 6.1-13.2 mg/kg과 유사하였다. 반면 용출함량은 북항쪽이  $5.57 \pm 1.21$  mg/g으로 북길리의  $3.43 \pm 0.75$  mg/g에 비해 높게 나타나 상대적으로 많은 Pb가 가용성염으로 존재하고 있음을 시사하였다.

Zn의 경우 총 함량면에서는 81-365 mg/kg의 범위로 새만금지역 19.7-38.3 mg/kg, 노르웨이 연안  $110 \pm 27$  mg/kg(Lanne, 1992)에 비해 높은 수준이었으며, 지역별로는 북길리쪽이  $213 \pm 124$  mg/kg으로 북항  $120 \pm 21$  mg/kg에 비해 높았다. 그러나 가용성 중금속의 척도인 용출량에서는 오히려 북항쪽이  $30.4 \pm 9.8$  mg/kg으로 북길리쪽  $19.9 \pm 4.3$  mg/kg에 비해 높은 값을 보여 Pb와 마찬가지로 생태환경에 미치는 Zn의 영향은 북항쪽이 더 심각함을 나타내었다. 이들 용출량은 기존연구와 비교할 때, 용출방법이 달라 직접 비교할 수는 없지만, 대략 이진하 등(1997)이 제시한 군산·장항 지역 해안저질토의 0.1N HCl 추출값(이하 군장저질)과 비교할 경우 북길리쪽은 그 평균값인 20.1 mg/kg과 유사하였으나 북항쪽은 상대적으로 오염도가 높은 군산공업단지 인근 저질토의 29.3 mg/kg과 유사한 수준이었다.

Mn 총 함량은 북길리가 250-317 mg/kg( $279 \pm 27$  mg/kg), 북항이 298-329 mg/kg( $312 \pm 11$  mg/kg)으로 북항이 약간 부화되어있는 경향을 보였으나 전체적으로 새만금 지역 116.7-397 mg/kg과 유사한 수준이었다. 용출량 역시 북항쪽이  $43 \pm 5$  mg/kg으로 북길리쪽  $37 \pm 8$  mg/kg에 비해 약간 높은 수준을 보였다.

Cu 총함량은 북항이 33-121 mg/kg( $74 \pm 32$  mg/kg)으로 새만금 지역의 3.7-7.8 mg/kg은 물론 노르웨이 연안의  $17 \pm 6$  mg/kg에 비해 월등히 높은 수준을 보여 다량의 Cu가 축적되어있음을 나타냈다. 반면 북길리는 14-17 mg/kg( $16 \pm 1$  mg/kg)으로 새만금 지역보다는 높은 수준이었지만 노르웨이 연안과 유사한 수준을 보였다. 용출함량은 북항쪽이  $11.4 \pm 5.1$  mg/kg으로 북길리의  $3.8 \pm 2.2$  mg/kg에 비해 역시 3배 이상 높은 수준을 보여 상대적으로 그 오염도가 높았으나, 군장저질의 평균값 9.3 mg/kg과 유사한 수준이었으며 상대적으로 오염도가 높은 군산공단 인근 저질토의 29.3 mg/kg(이진하 등, 1997)에 비해서는 낮은 수준이었다.

Cd 총함량 범위는 6.8-10.9 mg/kg으로 북항과 북길리 갯벌이 거의 같은 수준을 보였으나 새만금 지역 0.012-0.040 mg/kg은 물론 노르웨이 연안  $0.08 \pm 0.02$  mg/kg에 비해 월등히 높은 수준을 나타내었다. 용출량은 0.51-0.68 mg/kg의 범위로 나타나 총 함량의 6%에 불과할 정도로 대부분이 불용성 형태로 존재하였다. 그럼에도 불구하고 그 범위는 군장저질의 평균값 0.15 mg/kg에 비해 월등히 높았으며 상대적으로 오염도가 높은 군산공단 인근 저질토의 0.67 mg/kg에 근접하는 수준으로 북항과 북길리 갯벌 모두 가용성 Cd를 오염지역 수준으로 함유하고 있음을 나타내었다.

### 3.3. 중금속간 상관관계

북길리와 북항 갯벌의 퇴적물내에 함유되어있는 중금속들의 상호 수반성을 고찰하기 위하여 완전용해에 의한 총 중금속 함량간 및 해양공정법에 의해 추출된 가용성 중금속 함량간 상관계수를 구해본 결과 Table 3과 Table 4에 나타낸 바와 같이, 중금속간 상관성은 지역 및 전처리 방법에 따라 매우 달라지는 특성을 보였다. 북길리의 경우 총 함량에서는 Mn-Cu가 0.9이상, Cd-Mn과 Cd-Cu가 0.5이상의 양의 상관성을, Pb는 Zn을 제외한 모든 원소와 강한 음의 상관성을 나타내는 반면 용출량에서는 Zn과 Mn, Cu의 상관성이 0.6이상으로 가장 좋았으며 총 함량에서 -0.5이하의 상관성을 보였던 Pb와 Cu, Cd는 오히려 0.4이상의 양의 상관성을, 0.9이상의 상관성을 보였던 Mn-Cu는 -0.2이하의 음의 상관성을 보였다. 한편 북항의 경우 총 함량에서는

**Table 3.** Correlation coefficient between heavy metals analyzed from sediments in Boggil-ri tidal flat.

Total	Pb	Zn	Mn	Cu	Cd
Pb		0.314	-0.808	-0.699	-0.546
Zn	0.334		0.194	0.450	-0.076
Mn	-0.076	0.667		0.922	0.568
Cu	0.463	0.614	-0.061		0.543
Cd	0.460	0.108	-0.240	0.309	
Extract	Pb	Zn	Mn	Cu	Cd

**Table 4.** Correlation coefficient between heavy metals analyzed from sediments in Bukhang tidal flat.

Total	Pb	Zn	Mn	Cu	Cd
Pb		0.810	-0.270	0.857	-0.422
Zn	0.756		-0.490	0.950	-0.438
Mn	0.954	0.907		-0.646	0.878
Cu	0.998	0.797	0.968		-0.678
Cd	0.166	-0.480	-0.070	0.097	
Extract	Pb	Zn	Mn	Cu	Cd

Pb-Zn, Pb-Cu, Zn-Cu, Mn-Cd이 0.8이상의 강한 양의 상관성을 보였고 나머지는 음의 상관성을 보이는 반면 용출량에서는 Cd을 제외한 모든 원소가 강한 양의 상관성을 보여 그 차이가 뚜렷하였다. 이상의 결과로부터 북항은 총합량에서 Mn-Cd과 Pb-Zn-Cu 그룹으로 뚜렷하게 분류되고 용출량에서도 Pb-Zn-Mn-Cu가 강한 수반성을 보이는 반면 북길리는 총 합량에서의 Mn-Cu를 제외하면 전반적으로 중금속간 상관성이 낮게 나타나는 특성을 보이는 등 지역별로 중금속간 수반성이 서로 다른 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

**3.4. 생물체의 중금속 함량**

갯벌에 서식하는 생물체중의 중금속 축적정도를 조사하기 위하여 해조류인 파래, 연체류인 개불 및 갑각류인 게를 대상으로 생체내 중금속 함량을 측정하고 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 대상 생물체 중 파래와 게는 북항과 북길리 갯벌에서 공통적으로 서식하였으나 개불은 북길리 갯벌에서만 서식하였다. 생물체내의 중금속 함량은 지역 및 생물종에 관계없이 Mn>Zn>Cu>Cd>Pb 순으로 높게 나타나 대체로 갯벌내 중금속 함량순과 일치하였다. 지역별로는 북항쪽 생물에서는 Pb, Zn, Cu가, 북길리쪽 생물에서는 근소한 차이지만 Mn과 Cd이 상대적으로 높았으며, 생물종별로는 대체로 Pb와 Cu는 게>파래>개불, Zn과 Cd는 개불>게>파래, Mn은 파래>게>개불 순으로 높아지는 경향을 보였다. 특히 갯벌내에서 소비자 역할을 하는 게의 생체내 중금속 함량의 지역간 차이는 농도 변화가 극심한 Mn을 제외하고는 각 지역 갯벌의 생산자 역할을 하는 파래의 중금속 농도차이를 그대로 반

영하는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

Pb는 파래와 게에서 북항이 0.65±0.08 mg/kg과 3.74 mg/kg으로 북길리 0.31±0.07 mg/kg와 0.74 mg/kg에 비해 2배 이상 높은 함량을 보였다. 북길리에서 채취한 개불은 0.28±0.12 mg/kg으로 파래에 비해 낮았다. 조사 지역 생물체내의 Pb 함량은 북항의 게 3.74 mg/kg을 제외하고는 기존 연구자들이 보고한 국내연안 어패류의 농도범위인 0.27-2.75 mg/kg과 중복되는 수준이었다. Pb는 신경 및 신장독성물질로서 어패류중 허용함량값을 1 mg/kg 이하로 권고하고 있는 점(Andersen, et al., 1996)을 고려할 때 조사지역 생물체내의 농도수준은 북항의 게를 제외하고는 모두 이 권고값을 만족하는 것으로 나타났다.

조사지역 생물체내 Zn 함량은 북항의 파래 45.0±17.3 mg/kg, 게 97.1 mg/kg, 북길리의 파래 25.9±7.0 mg/kg, 개불 92.1±12.2 mg/kg, 게 78.7 mg/kg으로 군산·장항해안 어류중의 32-58 mg/kg(이진하 등 1997), 동남해연안 진주담치의 50-72 mg/kg(이수행, 이광우, 1984), 군산연안 피랏고등중의 40.15 mg/kg(유일수 등, 1991), 새만금 지역 패류중의 97-157 mg/kg(황갑수 등, 2002)과 거의 유사한 수준을 나타냈다.

Mn은 북항의 파래에서 169±45 mg/kg, 게에서 168 mg/kg, 북길리의 파래에서 240±102 mg/kg, 개불에서 137±18mg/kg, 게에서 164 mg/kg으로 새만금 지역 패류중의 14-49 mg/kg, 동남해 연안 진주담치의 55-35 mg/kg은 물론 Bryan 등(1978)이 제시한 오염지역 패류중의 57-86 mg/kg에 비해 전체적으로 2배 이상 높은 수준을 나타냈다. 특히 북길리 갯벌의 파래는 최저 132 mg/kg에서 최고 374 mg/kg의 범위를 나타낼

**Table 5.** Heavy metal contents of biomass from Boggil-ri and Bukhang tidal flat and its bioaccumulation factors.

Biomass	Site	Pb		Zn		Mn		Cu		Cd	
		mg/kg	BCF	mg/kg	BCF	mg/kg	BCF	mg/kg	BCF	mg/kg	BCF
Enteromorpha	B-2	0.25	0.11	29.6	2.09	249.8	7.7	12.0	4.85	5.33	10.5
	B-3	0.25	0.07	19.1	0.74	374.1	7.1	10.0	2.60	5.26	10.4
	B-5	0.34	0.12	21.0	1.06	202.4	6.0	11.0	3.98	5.66	10.1
	B-6	0.40	0.09	33.8	2.00	132.5	4.4	14.7	5.00	5.67	10.0
	N-3	0.62	0.09	40.6	1.23	160.6	3.5	20.0	1.18	5.13	8.7
	N-4	0.59	0.15	30.3	1.84	217.1	5.9	17.9	3.77	4.74	8.0
	N-5	0.75	0.13	64.1	1.54	129.2	2.8	19.1	1.53	5.23	10.0
Urechis uncinatus	B-2	0.42	0.17	106.1	7.50	157.2	4.9	13.4	5.42	7.60	15.1
	B-3	0.20	0.06	85.5	3.32	124.1	2.3	7.1	1.84	5.54	10.9
	B-5	0.21	0.07	84.6	4.28	128.3	3.8	6.4	2.30	5.73	10.2
Ilyoplax deschampsii	B	0.74	0.22	78.7	3.96	163.8	4.4	68.2	17.80	5.67	9.9
	N	3.74	0.67	97.1	3.19	168.1	3.9	86.9	7.61	4.64	8.1

\*Contents: dry weight base, BCF: based on extracted content of sediments(=C<sub>biomass</sub>/C<sub>extract</sub>)

정도로 Mn 함량차이가 심하면서도 전반적으로 북항에 비해 높은 농도수준을 보였다. Mn은 만성적으로 노출될 경우 그 증독증상으로 추체외로(extrap-yrarnidal)계의 장애를 초래하는 것으로 알려져 있다. 따라서 조사지역의 갯벌에서 산출되는 생물체를 장기간 섭취할 경우 Mn 증독장애의 가능성이 우려되었다.

Cu는 북항의 파래에서  $19.0 \pm 1.1$  mg/kg, 계에서 87 mg/kg, 북길리의 파래에서  $11.9 \pm 2.0$  mg/kg, 개불에서  $9.0 \pm 3.9$  mg/kg, 계에서 68 mg/kg의 농도수준을 보여 새만금 지역 패류종의 8.9-21.2 mg/kg, 군산·장항연안 어패류종의 1.5-6.8 mg/kg, 동남해 연안 진주담치종의 3.7-6.6 mg/kg 등과 비교하여 파래와 개불은 비슷하였으나 계는 훨씬 높은 수준으로 나타났다. 특히 조사지역내 계는 영국에서 식품종의 Cu 함량 제한값으로 권고하고 있는 20 mg/kg(황갑수 등, 2002)과 비교해도 3배 이상 초과하는 Cu 농도수준을 나타내고 있어 이를 식용으로 섭취할 경우 세심한 주의가 요구되었다.

조사지역 생물체내 Cd 농도수준은 북항의 파래에서  $5.03 \pm 0.26$  mg/kg, 계에서 4.64 mg/kg, 북길리의 파래에서 5.48 mg/kg, 개불  $6.29 \pm 1.14$  mg/kg, 계에서 5.67 mg/kg을 보여 지역간 차이가 크지 않았지만 북길리쪽이 북항쪽에 비해 약간 높게 나타나는 경향을 보였다. 조사지역 생물체중의 Cd 농도수준은 새만금 지역 패류종의 0.13-0.30 mg/kg, 동남해 연안 진주담치종의 1.9-2.9 mg/kg을 초과하는 수준으로 타지역에 비해 조사지역에서의 Cd 생물축적이 심화되어있음을 시사하였다. 식품종의 Cd 농도 규제값으로 호주에서는 연체동물로서 2.0-5.5 mg/kg의 수준을 정하고 있음에 비추어 볼 때 본 조사지역에서의 생물체내 Cd 농도수준은 이를 크게 상회하지는 않았지만 역시 식용으로 섭취시 Cd 증독장애에 대한 주의가 요구되는 수준이었다.

### 3.5. 중금속의 생물체내 축적률

중금속들의 생물내 축적에 관한 정보를 얻고자 동일 채취지점에서의 갯벌중의 가용성 중금속 농도(해양공정시험법에 의한 추출량)에 대한 생물내 농도비로서 정의되는 생물축적률(bioaccumulation)을 계산해보았다. 그 결과 Table 5에 나타낸 바와 같이 해조류인 파래의 경우 북길리와 북항 모두  $Cd > Mn > Cu > Zn > Pb$  순으로 축적률이 높았으며, 갑각류인 계의 경우 북길리는  $Cu > Cd > Mn > Zn > Pb$  순의 축적률을 보였으나 북항에서는  $Cd > Cu > Mn > Zn > Pb$  순으로 Cu에 비해 Cd의 축적률이 높게 나타났다. 또한 연체류인 북길리의 개

불은  $Cd > Zn > Mn > Cu > Pb$ 의 순으로 축적률이 높아지는 등 지역 또는 생물종에 따라 생체내에 중금속이 축적되는 특성이 다르게 나타났다. 이러한 결과는 각 중금속마다 생체내 축적정도가 생물종은 물론 서식지의 환경에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문이다(Hung *et al.*, 2001; Borgmann *et al.*, 2004). 각 중금속의 생물내 축적률은 평균적으로 Pb가  $0.22 \pm 0.19$ 으로 가장 낮았으며, Zn이  $3.37 \pm 1.78$ , Mn이  $4.97 \pm 1.78$ , Cu가  $6.39 \pm 5.37$ , Cd이  $10.25 \pm 1.61$  순으로 높게 나타났다. 황갑수 등(2002)은 Mn과 Pb가 생물체의 대사 활동에 필요한 미량 원소들로, 이들의 생물체내 흡수, 대사과정의 생물학적 기전에 의해 조절되어짐으로서 생물체내 축적경향이 유사하다고 하였다. 그러나 본 연구의 결과에서 Pb는 낮은 축적성을 보이는데 반해 Mn은 높은 축적성을 보여 서로 다른 거동을 나타냈다. Pb의 낮은 축적성은 조사지역 갯벌의 가용성 Pb 함량이 낮은데다 Pb와 갯벌 토양입자간의 높은 흡착력으로 생물체내에 흡수될 수 있는 Pb 함량이 더욱 낮아졌기 때문으로 판단된다.

갯벌내 생물의 중금속 함량과 갯벌의 중금속 함량의 상호 연관성을 살펴보기 위해 북길리와 북항에서 채취한 파래중의 중금속 함량과 동일 지점 갯벌중의 중금속 함량을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보여지듯이 파래중의 중금속 농도수준이 북항쪽에서 상대적으로 높은 Cu와 Zn의 경우 북항쪽에서는 전처리 방법에 관계없이 갯벌중의 농도가 높아질수록 파래중의 농도도 증가하는 비례적인 경향이 보여지는 반면 북길리쪽에서는 오히려 반비례적인 경향이 강하게 나타나는 특성을 보였다. 한편 Pb의 경우 퇴적물중의 가용성 함량과 파래중의 함량은 분산상을 보이면서도 북항과 북길리를 합친 전체적인 경향에서는 대체로 비례적인 관계를 찾아볼 수 있는 반면 총 함량대비에서는 북항쪽은 비례적인 관계를 보였으나 북길리쪽은 분산되는 경향을 보여 퇴적물의 전처리 방법에 따라 서로 다른 경향을 나타내었다. 한편 북길리쪽 갯벌의 파래에서 높은 농도수준을 보이는 Mn의 경우, 북길리쪽에서는 비례적인 경향이 강한 반면 북항쪽은 가용성 함량에 대해서는 반비례적인 경향, 총함량에 대해서는 비례적인 경향을 보여 역시 퇴적물의 전처리 방법에 따라 서로 다른 경향을 나타내었다. Cd의 경우 북길리쪽에서는 대체로 비례적인 관계를 보이는 반면 북항쪽은 반비례적인 관계가 상대적으로 강하게 나타나는 특성을 보였다.

중금속의 생물축적은 생물종은 물론 체장, 체중 등 생



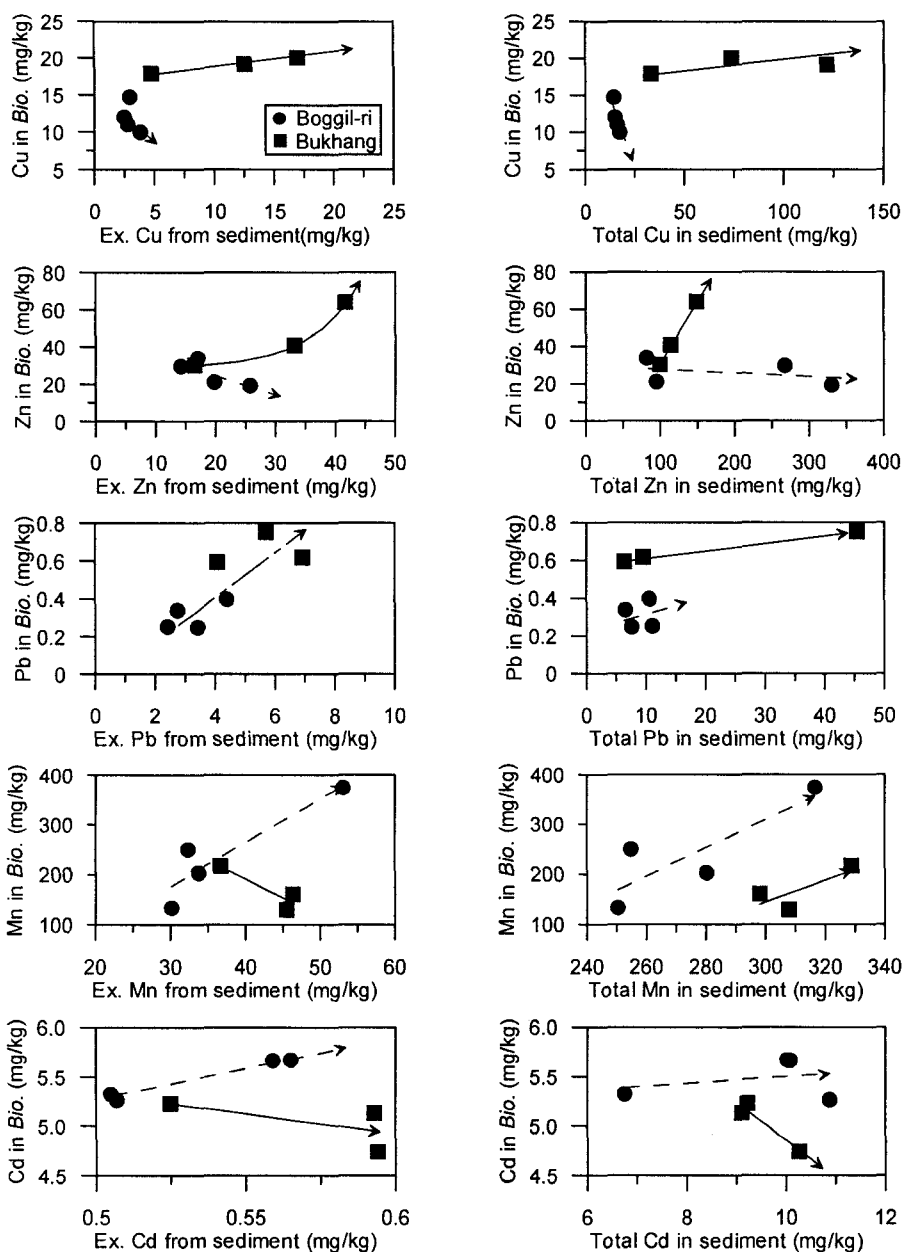


Fig. 3. Relationship of heavy metal contents of *Enteromorpha* versus sediment collected from Bukhang and Boggil-ri tidal flat.

물학적 조건과 영양상태, 이온농도, 온도, 염분도 등을 포함하는 서식환경 조건에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Mouneyrac *et al.*, 1998; Wang and Dei, 1999). 또한 퇴적물의 중금속 오염정도는 물론 오염 중금속의 생물축적성을 평가하는데 있어서도 퇴적물의 총 중금속 함량보다는 오히려 가용성으로 존재하는 중금속

함량이 더 유효한 척도가 된다(Pempkowiase *et al.*, 1999; Yap *et al.*, 2002). 퇴적물중의 중금속 중 생물이 이용할 수 있는 형태는 퇴적물 표면에 약하게 흡착되어 있는 교환성과 탄산염을 형성하여 존재하는 것들이다(Forstner, 1989; Han *et al.*, 1996; Sekhar *et al.*, 2003). 일반적으로 인위적 오염원으로부터 유입된 중금

속들은 무기화합물 또는 수화이온상으로 환경중에 유입되며, 이들은 비교적 약한 물리·화학적 결합을 통해 퇴적물 입자표면에 쉽게 흡착된다(Fostner *et al.*, 1989; Horowitz, 1985). 따라서 인위적 오염원의 중금속은 대부분 퇴적물에서 불안정하고 용출되기 쉬운 형태로 존재한다(Pempkowiase *et al.*, 1999). 이러한 기존연구들을 바탕으로 볼 때 조사지역에서 보여지는 갯벌·파래 중금속 상호관계의 차이는 퇴적물내 중금속중 생물이 이용 가능한 존재형태의 상대적 함량 즉 인위적 오염원으로부터 유입되는 중금속 함량의 차이와 성장기간 및 속도 등 생물개체 차이를 반영한 결과로 판단된다. 즉, 서식환경을 제공하는 갯벌과 그 환경에서 서식하는 파래 중의 중금속 농도가 서로 비례적인 관계를 보이는 원소들(북항의 Cu, Zn, Pb, 북길리의 Mn, Cd, Pb)은 각각의 생물축적률이 생물개체의 차이보다는 서식환경인 갯벌내로 유입된 인위적 오염원에 의해 상대적으로 많은 영향을 받았기 때문으로 추론할 수 있다. 반면 이들 중금속들과는 달리 갯벌과 파래간의 중금속 농도가 오히려 반비례적 관계를 보이는 북길리의 Cu, Zn, 북항의 Cd는 상대지역에 비해 생물축적농도가 낮은 원소들이라는 공통점을 가진다. Hung *et al.* (2001)이 타이완 연안에서 30여종의 연체류와 해수 및 퇴적물의 중금속 함량을 조사한 결과, 중금속의 생물축적량은 체장(body size)에는 큰 영향을 받았으나 해수중의 함량과는 Pb( $r=0.1718$ ), 퇴적물의 총함량과는 Zn( $r=0.1845$ )과 Cd( $r=0.1513$ )만이 비례적 관계를 보였을 뿐 대부분 음의 상관성을 보이는 등 서식환경의 중금속 농도와는 상관성이 거의 없거나 반비례적인 경향이 우세하였다. 다만 Cu 오염지역의 생물과 서식환경인 퇴적물 및 해수중의 Cu 함량은 정화사업이 진행되는 동안 비례적으로 감소하는 경향이 뚜렷하였다고 보고하였다. 이는 인위적인 오염원이 없거나 크지 않은 서식환경에서는 중금속의 생물축적에 미치는 영향은 서식환경보다는 오히려 생물개체 차이가 더 지배적임을 의미한다.

#### 4. 결 론

목포연안 갯벌의 환경오염도를 평가하기 위하여 도시환경에 직접 영향을 받고 있는 목포시 북항의 갯벌과 전형적인 농어촌 환경을 배경으로 하는 청계면 북길리의 갯벌을 대상으로 퇴적물 및 서식생물 중의 중금속 함량을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 북항 및 북길리 갯벌은 모두 sand 함량이 매우

낮은 필갯벌에 해당하였으며, 공통적으로 silt질이 우세한 가운데 북길리 갯벌은 clay함량이 상대적으로 높아 silty-clay질로, 북항 갯벌은 silt질 갯벌로 분류되었다.

2) 퇴적물중의 각 중금속 총함량은 북길리쪽에서는 Zn이, 북항쪽에서는 Mn과 Cu가 상대적으로 더 높았으나 가용성염을 나타내는 용출함량으로는 지역적 차이가 없는 Cd를 제외하고 모두 북항쪽이 높았다. 총함량에 대한 중금속 용출비는 Pb( $48 \pm 19\%$ ) > Cu( $20 \pm 11\%$ ) > Zn ( $18 \pm 9\%$ ) > Mn( $13 \pm 2\%$ ) > Cd( $6 \pm 1\%$ ), 중금속별 용출함량은 Mn( $32-53$  mg/kg) > Zn( $14-42$  mg/kg) > Cu( $2.5-17.0$  mg/kg) > Pb( $2.4-6.8$  mg/kg) > Cd( $0.5-0.7$  mg/kg)순이었다.

3) 생물체의 중금속별 축적량은 지역 및 생물종에 관계없이 Mn > Zn > Cu > Cd > Pb순이었으며, 퇴적물의 용출함량 대비 생물축적률은 생물에 따라 다양하여 Pb와 Cu는 계에서, Zn과 Cd는 개물에서, Mn은 파래에서 가장 높았으나 평균적으로는 지역에 관계없이 Cd > Cu > Mn > Zn > Pb순이었다.

4) 생물종에 관계없이 북항쪽은 Pb, Zn, Cu가, 북길리쪽은 근소하게나마 Mn, Cd이 상대적으로 높은 생물축적량을 나타내었다. 특히 각 지역에서 생물축적량이 더 높은 중금속들은 해조류인 파래와 퇴적물내 중금속 함량이 서로 비례적인 관계를 보이는 반면 상대적으로 생물축적량이 낮은 중금속은 오히려 반비례적 관계가 더 우세하게 나타나는 등 상반된 특성을 보였다.

5) 이상의 결과로부터 갯벌의 중금속 오염도는 북항쪽이 상대적으로 높았으며 특히 이 지역의 갯벌에서 Zn과 Cu, 미약하지만 Pb의 오염이 축적되고 있음을 알 수 있었다. 반면 북길리쪽은 뚜렷한 중금속 오염징후는 나타나지 않았으나 미약하게나마 Cd의 생물축적이 상대적으로 높은 경향을 보였다. 중금속의 생물축적에 따른 위해성은 Cd와 Mn의 경우 양지역 모든 생물에서, Pb의 경우 북항의 계, Cu의 경우 양지역 계에서 식용시 중독장애에 대한 주의가 요구되는 수준이었다.

#### 참고문헌

- 김종구, 유선재 (2000) 갯벌의 수직적 환경 특성. 한국환경과학회지, 9권 2호, p. 125-129.  
 유일수, 이종섭, 소진탁, 김재진 (1991) 만경강 및 금강하구지역 패류의 중금속 함량. 한국패류학회, 7권, p. 87-93.  
 이수행, 이광우 (1984) 한 국해안 진주담치의 중금속 함량. 한국해양소보, 19권, p. 111-117.  
 이진하, 한강완, 조재영 (1997) 군산·장항 해안지역 해수,

- 해안저질토 및 어패류 중 중금속함량. 한국농화학회지, 40권, p. 347-351.
- 한국해양학회 (1997) 해양환경공정시험방법. 국립수산진흥원, p. 316.
- 황갑수, 신형선, 김강주, 여성구, 박성민, 임규재 (2002) 새만금지역 갯벌 환경(퇴류, 저질)에서의 중금속 분포 특성. 한국물환경학회지, 18권, p. 341-351.
- Andersen, V., Maage, A. and Johannessen, P.J. (1996) Heavy metals in blue mussels(*Mytilus edulis*) in the Bergen harbor area, western Norway. Bull. Environ. Contam. Toxicol., v. 57, p. 589-596.
- Borgman, U., Neron, R. and Norwood, W.P. (2001) Quantification of bioavailable nickel in sediments and toxic threshold to *Hyalella azteca*. Environ. Poll., v. 111, p. 189-198.
- Borgmann, U., Nowierski, M., Grapentine, L.C. and Dixon, D.G. (2004) Assessing the cause of impacts on benthic organi near Rouyn-Noranda, Quebec. Environ. Pollut. v. 129, p. 39-48.
- Bryan, G.W. and Hummerstone, L.G. (1978) Heavy metals in the burrowing bivalve *Scrobicularia plana* from contaminated and uncontaminated estuaries. J. Mar. Bol. Ass. U.K., v. 58, p. 13-25.
- Chandra Sekhar, K., Chary, N.S., Kamala, C.T., Suman Raj, D.S. and Sreenivasa Rao, A. (2003) Fractionation studies and bioaccumulation of sediment-bound heavy metals in Kolleru lake by edible fish. Environ. Int., v. 29, p. 1001-1008.
- Chapman, P.M., Wang, F.Y., Janssen, C., Persoone, G. and Allen, H.E. (1998) Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: binding and release, bioavailability, risk assessment, and remediation. Can. J. Fish. Aquat. Sci., v. 55, p. 2221-2243.
- Forstner, U. (1989) Contaminated sediments. Berlin: Springer, p. 157.
- Goldberg, E.D., Bowen, V.T., Farrington, J.W., Harvey, G., Martin, J.H., Parker, P.L., Resebrough, R.W., William, M.A., Schneider, E. and Gemble, E. (1978) The mussel watch. Environ. Cons., v. 5, p. 101-125.
- Han, B.C., Jeng, W.L., Hung, T.C. and Wen, M.Y. (1996) Relationship between copper speciation in sediments and bioaccumulation by marine bivalves of Taiwan, Environ. Pollut. v. 91, p. 35-39.
- Horowitz, A. (1985) A primer on trace metal sediment chemistry. Denver U.S. Geological Survey, p. 319.
- Hung, T.C., Meng, P.J., Han, B.C., Chuang, A. and Huang, C.C. (2001) Trace metals in different species of mollusca, water and sediments from Taiwan coastal area. Chemosphere, v. 44, p. 833-841.
- Laane, R.W. (1992) Background concentrations of natural compounds in rivers, sea water, atmosphere and mussels. Tidal Water Division, Ministry of Transport, Public Waorks and Water Management, The Hague, v. 84.
- Mouneyrac, C., Amiard, J.C. and Amiard-Triquet, C. (1998) Effects of natural factors(salinity and body weight) on cadmium, copper, zinc and metallothionein-like protein levels in resident population of oysters *Crassostrea gigas* from a polluted estuary. Mar. Ecol. Prog. Ser. v. 162, p. 125-135.
- NOAA (1989) A summary of data on tissue contamination from the first three years(1986-1988) of the Mussel Watch Project. NOAA Tech. Mem. NOS OMA 49, National Oceanic and Atmospheric Adm., USA, p. 22, +Appendices.
- O'Connor, T.P. (1992) Recent trends in coastal environmental quality: results from the first years of the NOAA mussel Watch Project. US Dept. Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Maryland, USA, p. 46.
- Pempkowiase, J., Sikora, A. and Biernacka, E. (1999) Speciation of heavy metals in marine sediments vs. their bioaccumulation by Mussels. Chemosphere, v. 39, p. 313-321.
- Yap, C.K., Ismail, A., Tan, S.G. and Omar, H. (2002) Correlation between speciation of Cd, Cu, Pb and Zn in sediments and their concentrations in total soft tissue of green-lipped mussel *Perna viridis* from the west coast of Peninsular Malaysia. Environ. Int., v. 28, p. 117-126.
- Wang, W.X. and Dei, R.C.H. (1999) Factors affecting trace element uptake in the black mussel *Septifer virgatus*. Mar. Ecol. Prog. Ser., v. 186, p. 161-172.