한국생태학회지 24(5): 297~301, 2001 Korean J. Ecol.

광양만 조간대의 퇴적토 및 바지락(*Ruditapes philippinarum*)내 중금속 분포

곽영세† · 황보 준권 · 이충일
포항산업과학연구원 광양분소 환경보전연구팀

적 요: 광양만 조간대 주요 10지점과 청정해역으로 알려진 남해와 고흥 2곳의 대조구를 선정하여 퇴적토의 중금속(As, Pb, Cd, Hg)과 바지락(*R. philippinarum*) 근육조직내 중금속(As, Pb, Cd, Hg) 농도분포를 조사하였다. 전체적으로 여천공단 연안지역(SY-지점 G, H, I, J)의 퇴적토내 중금속함량은 광양제철소 인접 연안지역(SP-지점 A, B, C)의 값보다 유의하게 높았으며, 이는 여천공단 지역의 장기적이고도 활발한 연안 산업활동 때문인 것으로 판단된다. 또한 광양제철소 인접 연안지역의 중금속 함량은 대조구 지역(CS)의 그것과 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 광양만 연안과 대조구 지역에서 채취한 바지락 생체조직 내 중금속 함량은 전 지점에서 검출되지 않은 Hg를 제외하고, As가 1.32 ± 0.92~3.65 ± 0.10, Pb이 0.69 ± 0.52~2.49 ± 0.57, Cd이 0.07 ± 0.07~0.31± 0.05(mg/kg, FW)이었다. 바지락 생체조직 내 중금속 함량을 4개의 지역으로 나누어 비교했을 때 여천공단 지역(지점 G, H, I, J)과 대조구 지역(지점 K, L)의 값이 다른 두 지역(광양제철소 인접 연안지역과 광양시 호안)보다 유의하게 높게 나타났지만, 전체적으로 조간대 퇴적토과 그곳에 서식하는 바지락 근육조직 간의 중금속(As, Pb, Cd) 분포는 유의한 상관성을 보이지 않았다.

검색어: 광양만, 바지락, 생물농축, 중금속, 퇴적토

서 론

우리나라 조간대는 1960년대 부터 시작된 중화학공업의 육성과 경제성장에 따른 제반산업의 발전으로 인해 환경오염이 점차 심화되고 있다. 그럼에도 조간대에서 중금속을 포함한 오염물질의 분포 및 축적에 관한 연구는 아직까지 체계적으로 수행되고 있지 못하다. 특히, 광양공단, 여천공단, 광양제철소 및 율촌공단을 포함하는 광양만권 산업단지의 가동으로 인한 조간대 퇴적물내에 산업오염물질의 축적, 인근지역에서 유입되는 생활하수 및 농축산 폐수에 의한 오염물질의 축적과 저서동물 군집을 연계시켜 제반 오염환경에 대한 과학적인 조사는 미약하였다.

1970년대 말부터 광양만권 산업화에 따른 연안매립이 급속도로 진행됨에 따라 수리역학적 환경 및 퇴적환경이 심하게 변모되었다. 중금속의 경우, 1970년대 초반까지는 주로 수산생물에 대한 중금속 조사가 몇번 수행되었고(원 1973), 1980년대 이후에야 지표생물을 이용하여 연안해역의 오염도를 평가하고자 하는 연구가 간헐적으로 수행되었을 뿐이다 (환경부 1997, 여수대 1997, Song *et al.* 1997, 국립환경연구원 1996, 수산연구소 1996, 李 1993, Lee and Lee 1993, Choi *et al.* 1992).

연안환경에서 미량중금속은 가장 유해한 오염물질로 알려져 있으며, 해양환경내 이들의 분포파악 및 축적모니터링은 해수와 퇴적물 및 생물을 종합적으로 비교, 분석함으로써 가능하다 (환경부 1997, Reish *et al.* 1996, Kramer 1994). 이는 해수의 오염성분이 이화학적인 과정을 통해 퇴적물의 일부를 구성하게 되고, 그 퇴적물 내 오염물질의 분포 및 성분을 연구함으로써 오랜 기간 동안의 오염 양상이 파악될 수 있으며, 생체내 중금속 함량은 비록 계절, 연령 및 염분도에 의한 변이가 나타나기는 하지만, 주변 해수의 중금속농도를 파악할 수 있는 오염지시자로서의 활용성이 매우 높기 때문이다 (Phillips 1980).

본 연구의 목적은 여천공단, 율산공단, 광양제철소 등 대규모 산업단지가 조성되어 있는 광양만 연안역의 중금속 오염도를 평가하고자 주요 조간대 10곳과 대조지역으로 청정해역으로 알려진 남해와 고흥 2곳에서 퇴적토양과 그곳에 서식하는 우점패류인 바지락(*Ruditapes philippinarum*)을 대상으로 중금속 농도를 비교하였다.

재료 및 방법

광양만 퇴적토양 및 패류의 중금속 분포를 조사하기 위하여 광양만내의 주요정점 10개 지점과 청정지역으로 알려진 고흥과 남해에 대조구 2지점을 선정하였다 (Fig. 1). 퇴적토양 및 패류의 시료채취는 1999년 3월, 7월, 10월 그리고 2000년 1월에 계절별로 4회에 걸쳐 이루어졌다. 퇴적토양은 썰물시 조간대 개펄에서 토양오염공정시험법(환경부고시 제 96-32)에 따라 채토하였고, 중금속 분석을 위한 시료의 전처리는 음건토양 5 g에 0.1N HCl 50 ml을 넣어 1시간 동안 100 rpm으로 진탕하였고, 여

†Author for correspondence; Phone: 82-61-790-8754, e-mail: kwakys@risnet.re.kr

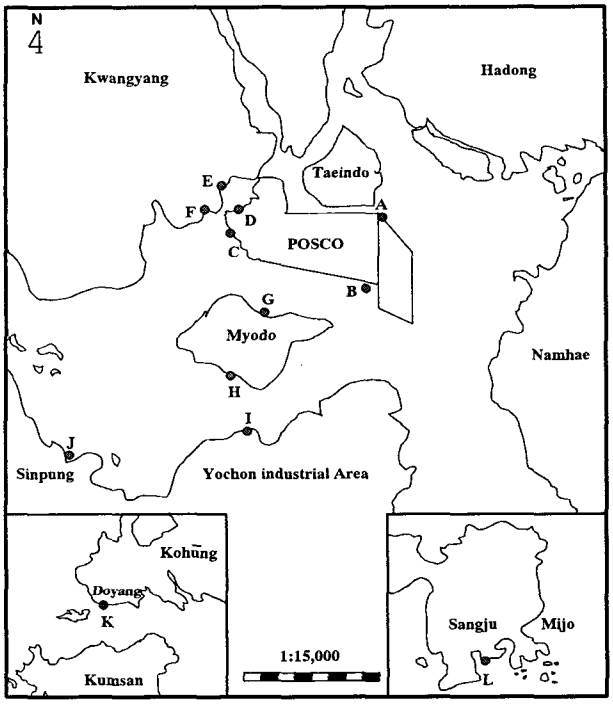

Fig. 1. An index map of sampling stations. A to J: stations in Kwangyang Bay. K and L: control stations

과지(Watman No. 42)로 여과한 후 50 ml로 정용하였다. 각 조사 정점에서 퇴적토양과 같이 채집한 바지락 시료의 전처리는 digestion tube에 근육조직 10 g과 유해금속측정용 고순도 HNO_3, H_2SO_4 및 HCl을 넣어 150℃에서 분해시켰고, 여과지(Watman No. 42)로 여과한 후 25 ml로 정용하였다 (Singh *et al.* 1991). 전처리한 퇴적토양과 생체시료의 As, Pb, Cd, 및 Hg 등의 중금속 농도는 ICP(Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)를 이용하여 측정하였다. 측정자료는 Tukey test($P<0.05$)와 회귀분석을 실시하여 그 유의성을 검증하였다 (Minitab).

결과 및 고찰

광양만 조간대 퇴적토양의 중금속 분포

광양만 조간대 10개 지점과 대조구 2개 지점(K, L)의 퇴적토내 4계절 평균 중금속함량은 다음과 같다 (Table 1). 광양만 조간대의 퇴적토내 중금속함량은 As가 2.20 ± 0.59~4.94 ± 0.85 ppm, Pb이 3.52 ± 0.61~20.7±1.61 ppm, Cd이 0.36 ± 0.13~1.68 ± 0.16 ppm, 그리고 Hg이 0.14 ± 0.14~0.83 ± 0.72 ppm으로 지점별로 매우 큰 변이를 보였다. 그리고 이러한 광양만에서의 퇴적토내 중금속 분포량은 대조구 지점인 고흥(K)과 남해(L)의 그것과 유의적인 차이를 나타내지 않았다 (Table 1).

광양만 퇴적토내의 중금속 분포에 대한 전체적인 경향을 파악하기 위하여 대조구를 포함하는 12개의 조사지점을 4개의 지역(지점 A, B, C- 광양제철소 인접 연안지역(SP); 지점 D, E, F-

Table 1. Heavy metal concentrations(ppm) in sediments collected from 10 stations in Kwangyang Bay and 2 control stations. Values represent annual means ± 1 s.e. n means number of samples measured (N.D.; not detected).

Stations		Heavy metals(ppm)			
		As(n=4)	Pb(n=4)	Cd(n=4)	Hg(n=4)
Kwang Yang Bay	A	2.20 ± 0.59	6.29 ± 1.92	0.36 ± 0.13	0.19 ± 0.19
	B	2.29 ± 0.30	3.52 ± 0.61	1.11 ± 0.36	0.14 ± 0.14
	C	2.64 ± 0.63	6.27 ± 1.04	0.84 ± 0.34	0.31 ± 0.31
	D	4.19 ± 0.69	8.53 ± 1.83	1.04 ± 0.15	0.83 ± 0.72
	E	4.94 ± 0.85	16.9 ± 1.81	0.76 ± 0.18	0.38 ± 0.38
	F	4.15 ± 0.38	14.6 ± 0.87	0.74 ± 0.06	0.34 ± 0.28
	G	4.26 ± 0.65	12.4 ± 1.41	0.99 ± 0.08	0.58 ± 0.44
	H	4.94 ± 0.65	20.7 ± 1.61	1.07 ± 0.18	0.44 ± 0.44
	I	4.80 ± 0.89	19.2 ± 4.25	1.68 ± 0.16	0.81 ± 0.63
	J	4.04 ± 0.68	11.9 ± 1.12	0.93 ± 0.15	0.36 ± 0.36
Control	K	4.53 ± 0.11	5.99 ± 0.07	2.30 ± 0.02	0.85 ± 0.01
	L	5.73 ± 0.09	16.9 ± 0.52	1.27 ± 0.01	N.D.

광양시 호안 지역(SK); 지점 G, H, I, J- 여천공단 지역(SY); 지점 K, L- 대조구 지역(CS))으로 나누어 퇴적토내 중금속을 비교하였다 (Fig. 2).

분석결과 Cd과 Hg을 제외하고는 광양제철소 인접 연안(SP: 지점 A, B, C)의 퇴적토내 중금속함량이 광양시 호안 지역(SK: 지점 D, E, F), 여천공단지역(SY: 지점 G, H, I, J) 그리고 대조구 지역(CS: 지점 K, L)보다 통계적으로 유의하게 낮았다 (Fig. 1, Tukey test, $P<0.05$).

퇴적물의 중금속 함량은 일반적으로 퇴적물 입자의 크기, 즉 입도에 따라 차이를 보이지만(Horowitz 1991, Cho *et al.* 1999), 조(2000)등에 의하면 광양만에 분포하는 해저퇴적물은 시료전체의 93%가 4 ϕ(63.5 μm)보다 작은 입도에 해당되는 세립퇴적물이었기 때문에 광양제철소 인접 연안(SP)의 퇴적토와 광양시 호안지역(SK)의 퇴적토내 중금속 분포 차이를 입도의 차이로 설명하기에는 부족한 것으로 사료된다. 본 조사에서 광양시 호안 지역(SK)이 높은 중금속함량을 나타내었는데, 이는 광양시 생활하수의 유입과 묘도 북단지역에서 타원형의 조류이동에 의한 여천공단의 영향을 받은 것으로 판단된다 (여수대 1997). 한편, 조(2000)등의 결과에 의하면 퇴적토내 중금속 함량은 여천공단을 포함하는 광양만의 서부와 여수반도에 인접한 해역에서 높았으며, 이는 본 실험의 조사지점(SY: 지점 G, H, I, J)과도 잘 일치한다. 이 지역의 높은 중금속 함량은 아마도 여천공단과 율촌공단지역에서의 장기적이고도 활발한 연안 산업활동 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 조사된 4개 지역의 퇴적토양내 중금속 농도범위를 국내 여러 기관의 연구결과와 비교할 때 Cd을 제외한 기타 중금속함량은 기존의 발표된 자료의 여러 가지 중금속 guideline 수치보다 낮았다 (USEPA 1977, 여

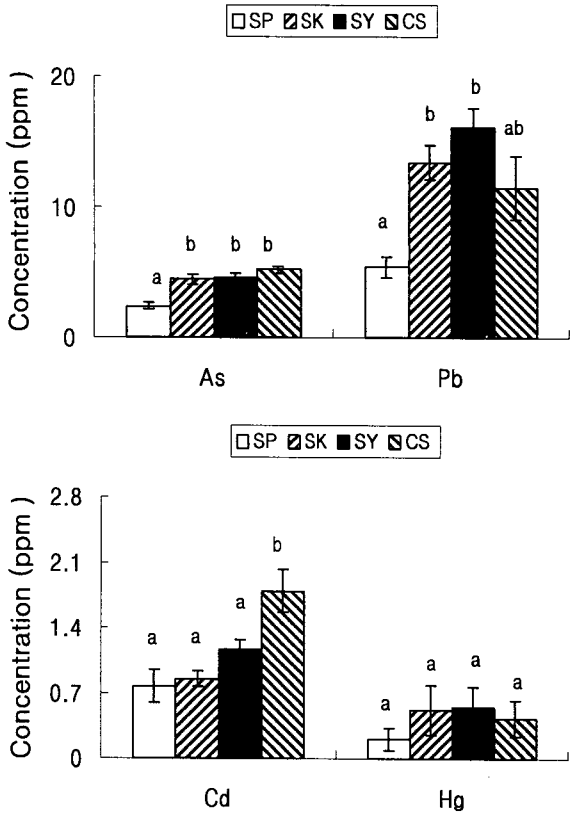

Fig. 2. Annual mean heavy metal concentrations of sediments collected from SP(Stations A, B, C close to POSCO), SK(Stations D, E, F close to Kwangyang City), SY(Stations G, H, I, J close to Yochon Industrial Area), and CS(Control Stations K, L). Bars indicate means ± 1 s.e. Bars with the same letters are not significantly different for each heavy metal at the level of 0.05(Tukey test).

수대 1997, 수산연구소 1996, 한국과학기술원 1996, 국립환경연구원 1996).

바지락 근육조직내 중금속 분포

광양만 조간대 10개 지점 및 대조지역 2 지점(고흥(K), 남해(L))에 서식하는 바지락 생체조직 내 4계절 평균값 중금속함량은 다음과 같다 (Table 2). 광양만연안에 서식하는 바지락 조직내 중금속함량은 As가 1.32 ± 0.92~2.87 ± 0.13, Pb가 0.69 ± 0.52~2.49 ± 0.57, Cd이 0.07 ± 0.07~0.20 ± 0.03(mg/kg, fresh weight(FW))이었고, Hg은 전지점에서 검출되지 않았다 (Table 2). 또한 퇴적토의 경우와 마찬가지로 광양만 바지락의 생체내 중금속 함량은 대조구 지점인 고흥(K)과 남해(L)의 그것과 크게 다르지 않았다.

주요 중금속의 영향을 보면, As는 강한 독성을 나타내는 중금속으로, 주로 생체내 전자전달계 활성을 억제하는 것으로 알려져 있다 (Amdur *et al.* 1991). Pb은 자연함유량은 많지 않으나 공장폐수 등에 의해 오염된 생태계에 서식하는 생물체에 축적

Table 2. Heavy metal concentrations(mg/kg, FW) in shellfish(*R. philippinarum*) collected from 10 stations in Kwangyang Bay and 2 control stations. Values represent annual means ± 1 s.e. n means number of samples measured

Stations		Heavy metals(mg/kg, FW)			
		As(n=4)	Pb(n=4)	Cd(n=4)	Hg(n=4)
Kwang Yang Bay	A	2.87 ± 0.13	2.42 ± 0.26	0.20 ± 0.03	N.D.
	B	2.03 ± 0.69	1.60 ± 0.59	0.13 ± 0.07	N.D.
	C	2.04 ± 0.77	1.64 ± 0.68	0.13 ± 0.05	N.D.
	D	1.32 ± 0.92	0.69 ± 0.52	0.07 ± 0.07	N.D.
	E	1.54 ± 0.89	1.39 ± 0.85	0.11 ± 0.07	N.D.
	F	1.89 ± 0.69	1.54 ± 0.67	0.10 ± 0.06	N.D.
	G	2.76 ± 0.12	2.49 ± 0.57	0.20 ± 0.04	N.D.
	H	2.58 ± 0.18	2.35 ± 0.14	0.19 ± 0.02	N.D.
	I	2.47 ± 0.19	2.21 ± 0.39	0.19 ± 0.04	N.D.
	J	2.65 ± 0.28	2.36 ± 0.54	0.18 ± 0.01	N.D.
Control	K	3.65 ± 0.10	2.21 ± 0.12	0.31 ± 0.05	N.D.
	L	3.02 ± 0.17	2.20 ± 0.31	0.29 ± 0.06	N.D.

현상이 현저히 나타나는 금속 원소로 알려져 있고, Cd은 일본에서 대표적인 공해병인 이따이이따이병을 일으킨 원인 물질로 잘 알려져 있다 (이 1993).

광양만 조간대 10개 지점과 대조구 지점인 고흥(K)과 남해(L)에서 채취한 바지락내의 중금속 함량을 4개 지역(SP, SK, SY, CS)으로 나누어 비교했을 때의 결과는 다음과 같다 (Fig. 3). 광양제철소 인접 연안지역(SP) 및 광양시 호안지역(SK)에서 채취한 바지락내의 As와 Pb함량을 대조구 지역의 값과 비교했을 때 통계적으로 유의한 차이가 없었으며, 광양시 호안지역의 경우 여천 공단 지역(SY)보다 낮았다 (Fig. 2). 또한 Cd의 경우 오히려 대조구인 고흥 및 남해지역보다 광양만 지역의 바지락이 낮은 중금속 함량을 나타내었다 (Fig. 2, Tukey test, $P<0.05$).

본 연구에서 4개 지역, 즉 제철소 인접(SP), 광양시 호안(SK), 여천공단(SY) 및 대조구 지역(CS)의 바지락내 As함량은 각각 2.31 ± 0.33, 1.58 ± 0.44, 2.61 ± 0.09 및 3.33 ± 0.14(mg/kg, FW)로서, 이는 국내 연구결과의 최고치 범위인 3.13~7.28 mg/kg보다 낮은 값이다 (李 1993). 그리고 4개 지역의 바지락 근육조직내 Pb함량은 각각 1.89 ± 0.31, 1.21± 0.38, 2.36 ± 0.20 및 2.20 ± 0.16(mg/kg, FW)으로, 여천공단 지역과 대조구 지역을 제외하고는 수산물의 허용기준치 2.0 mg/kg보다 낮았다 (李 1993). 바지락 근육조직내 Cd함량은 각각 0.15 ± 0.03, 0.09 ± 0.03, 0.19 ± 0.01 및 0.29 ±0.04(mg/kg, FW)로서 국내 연구결과의 최고치범위인 1.86~1.93 (mg/kg, FW) 및 평균치인 0.54(mg/kg, FW)과 비교하면 4개 지역 모두 낮은 값이었고, 모두 수산물의 허용기준치 1.0(mg/kg, FW)보다 낮았다 (李 1993).

광양만 퇴적토양과 바지락내 중금속 농도와의 관계

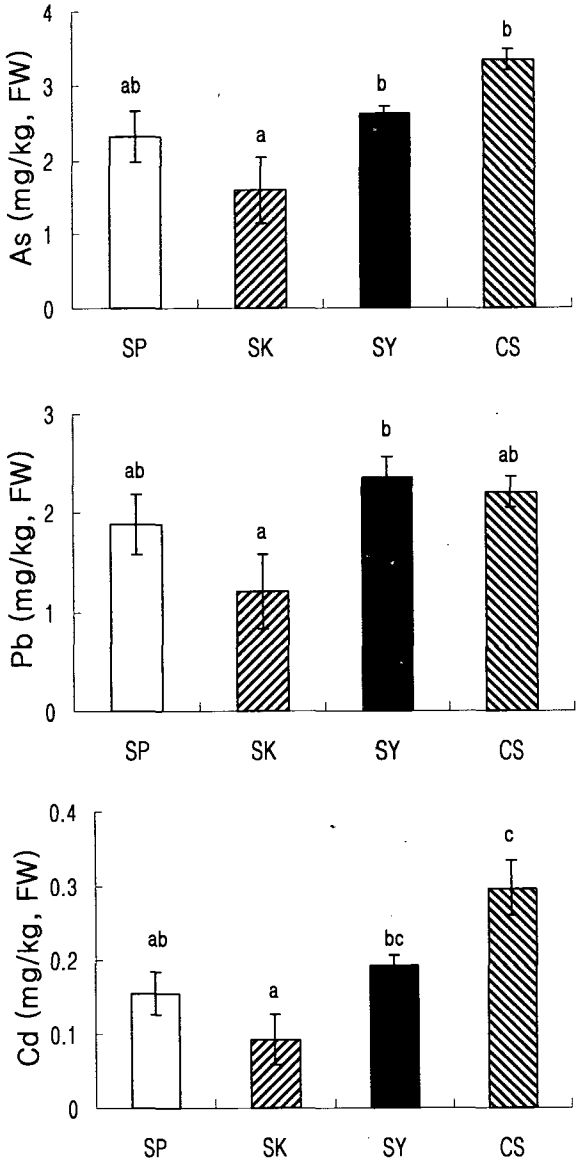

Fig. 3. Annual mean heavy metal concentrations in shellfish(*R. philippinarum*) collected from SP, SK, SY and CS. Abbreviations are referred in Fig. 2. Bars indicate means ± 1 s.e. Bars with the same letters are not significantly different for each heavy metal at the level of 0.05(Tukey test).

광양만 조간대 퇴적토와 그 곳에 서식하는 반지락 근육조직 내 중금속 함량간의 상관성을 찾아보고자 회귀분석을 실시한 결과, 바지락내 As함량 = 0.0872 × 퇴적토내 As함량 + 2.026 (R^2=0.0135), 바지락내 Pb함량 = 0.0168 × 퇴적토내 Pb함량 + 1.7439(R^2=0.0099), 그리고 바지락내 Cd함량 = 0.0719 × 퇴적토내 Cd함량 + 0.1051(R^2=0.1084) 이었고, 3금속 모두 퇴적토양과 패류간 중금속농축은 유의한 상관성이 없었다. 이는 퇴적물로 유입된 중금속이 일차적으로 퇴적물내 acid volatile sulfide (AVS)와 결합하여 금속황화물을 형성하고, 퇴적물에 존재하는 AVS가 반응성 금속들(SEM)의 농도보다 높은 농도로 존재할 때 공극수의 용존금속 농도가 낮아져 중금속의 생물이용도 (bioavailability)는 떨어진다는 연구결과와 높은 AVS농도를 유지하는 광양만의 퇴적토양환경에 기인하는 것으로 판단된다 (Pesch *et al.* 1995, 환경부 1997). 그리고 생체 내 육질부의 경우, 산란 및 성장으로 인해 계절 및 연령에 따른 체내 금속 함량의 변화가 퇴적토의 경우보다 심한 것으로 알려져 있기 때문에 (Lingard *et al.* 1992), 본 조사에서 사용된 바지락의 생체 내 중금속 함량은 그들이 서식하는 퇴적토의 중금속 함량을 반영하지 않을 가능성도 배제할 수 없다. 또한, Giusti와 Zhang (2000)에 따르면 중금속의 종류에 따라 조개류의 근육조직과 패각에 축적되는 정도가 서로 다른 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 바지락의 근육조직만을 사용하였기 때문에 바지락 체내의 중금속 함량은 퇴적토 내의 중금속 농도와 유의한 상관성을 보이지 않는 것으로 사료된다.

인용문헌

국립환경연구원, 1996. 여천공단주변 환경오염실태 현지조사 보고서(1단계). 231 p.

수산연구소, 1996. 광양만 서식수산물의 중금속함량 조사결과, 미발표보고서.

여수대학교. 1997. 광양만 환경실태 및 보전대책. 860 p.

李瑞來. 1993. 食品의 安全性 硏究. 이화여자대학교 출판부. 404 p.

원종훈, 1973. 한국산 어패류중의 수은, 카드늄, 납, 구리의 함량. 한국수질보전학회지 6: 1-19.

조영길, 이창복, 고철환. 2000. 광양만 표층퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국해양학회지 5: 131-140.

한국과학기술원. 1996. 여천공단 주변마을 환경영향 및 대책에 관한 연구 1028 p.

환경부. 1997. 해양환경감시 평가기술 : 연안저서환경 건강평가 기술 557 p.

환경부. 1996. 토양오염공정시험법. 환경부 고시 제 96-32호.

Admur, M.O., J. Doull and C.D. Klassen. 1991. Casarett and doull's toxicology: The basic science of poisons (4th ed.), Pergamon Press, 1033p.

Cho, Y.G., C.B. Lee and M.S. Choi. 1999. Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. Mar. Geol. 159: 111-129.

Choi, M.G., J.S. Park and P.Y. Lee. 1992. Studies on the heavy metal concentration in mussels and cysters from the Korean coastal waters. Bull. Korean Fish. Soc. 25: 485-494.

Giusti, L. and H. Zhang. 2000. Trace elements in the Venetian lagoon around the Island of Murano(Venice, Italy). *In* J. Nriagu (ed.). Proceedings of 11th Annual International Con-

ference on Heavy Metals in the Environment.

Kramer, K.J.M. 1994. Biomonitoring of coastal waters and estuaries. CRC Press. Boca. Raton. 327 p.

Horowitz, A.J. 1991. A primer on sediment-trace element chemistry. Lewis Publishers, INC., USA, 136 p.

Lee, S. H. and K.W. Lee. 1993. Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. J. Oceanol. Soc. Korea. 18: 49-54.

Lingard, S.M., R. Douglas Evans, B.P. Bourgôin. 1992. Method for the estimation of organic-bound and crystal-bound metal concentrations in bivalve shells. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 48: 179-184.

Pesch, C.E., D.J. Hansen, W.S. Boothman, W.J. Berry, J.D. Mahony. 1995. The role of acid-volatile sulfide and interstitial water metal concentrations in determing bioavailability of cadmium and nickel from contaminated sediments to the marine polychaete *Neanthes arenaceodentata*. Environ. Toxicol. Chem. 14: 129-141.

Phillips, D.J.H. 1980. Quantitative aquatic biological indicators. App. Sci. Publ. Ltd, London, 488 p.

Reish, D.J. 1996. Effect of pollution on marine organism. Wat. Env. Res. 68(4): 785-787.

Singh, J. G. 1991. Distribution of selected heavy metals in skin and muscle of five tropical marine fishes. Env. Pollution. 69: 203-215.

Song, M.Y., B.L. Choe, K.S. Park and I.S. Lee. 1997. Distribution of heavy metals in the sediments and periwinkles(*Littorina brevicula*) of Onsan Bay, Korea. Korean J. Ecol. 20(1): 51-59(in Korean).

USEPA. 1977. Guidelines for the pollutional Classification of Great Lakes Habor Sediments, U.S. Environmental Protection Agency. Region V. Chicago. 1382 p.

(2001년 8월 20일 접수 ; 2001년 10월 15일 채택)

Heavy Metal Concentrations of Sediment and *Ruditapes philippinarum* Inhabited in the Intertidal Zone of Kwangyang Bay

Kwak, Young-Se, Jun-Kwon Hwangbo and Choong-Il Lee

RIST, Environmental Conservation Research Team, Kwangyang 545-711, Korea

ABSTRACT : The objectives of this study were to evaluate the extent of heavy metals(As, Pb, Cd, Hg) accumulated in sediments of the Kwangyang Bay, and to investigate bioaccumulation of heavy metals(As, Pb, Cd, Hg) in shellfish(*Ruditapes philippinarum*) commonly found in the intertidal zone of the Kwangyang Bay. The data was also compared with that of Namhae and Kohung intertidal zones, which were regarded as control stations in this study. Substantial geographical variations in heavy metal concentrations in the sediment samples were found. However, heavy metal concentrations in the sediment collected from the intertidal zones of Yochon(stations I, J) and Myodo(stations G, H) close to Yochon Industrial Area exhibited relatively higher heavy metal concentrations, compared to those from other intertidal zones(stations A, B, C) adjacent to POSCO at Kwangyang Bay. In addition, stations A, B, C showed lower heavy metal concentrations in the sediments than controls(K, L). The annual mean concentrations of the heavy metals in the shellfish from the stations(G, H, I, J) were significantly higher than those from other stations(A, B, C, D, E, F). Nevertheless, heavy metal accumulation in sediments was not reflected in bioaccumulation of heavy metals in shellfish, probably indicating that interactions between the heavy metals in sediment and shellfish might be poor in the current study area, Kwangyang Bay.

Key words : Bioaccumulation, Heavy metals, Kwangyang Bay, *Ruditapes philippinarum*, Sediment