

통영연안 해역의 양식 참굴 (*Crassostrea gigas*) 의 중금속 농축에 관한 연구

조상만¹, 김영환², 정우건²

¹군산대학교 해양생명과학과, ²경상대학교 해양생명과학과 · 해양산업연구소

The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea

Sang-Man Cho¹, Yeong-Hwan Kim² and Woo-Geon Jeong²

¹Department of Aquaculture and Aquatic Science, Kunsan National University, 1170 Deahak-ro, Miryong, Kunsan, Jeonbuk 573-701, Korea

²Institute of Marine Industry & Department of Marine Biology and Aquaculture, College of Marine Science, Gyeongsang National University, 445 Inpyeong, Tongyeong, Gyeongnam 650-160, Korea

ABSTRACT

In order to investigate contamination of heavy metal in seawater and cultured oyster, samples were collected November 2003 to July 2004 from 12 sites (13 sites for seawater) along the coast of Tongyeong, Korea. The mean concentrations of metal in oyster tissues were as follows: 0.09 (0.01-0.3) µg/l for Cd, 0.47 (0.01-1.4) µg/l for Cr, 0.59 (0.2-2.3) µg/l for Ni, 1.02 (0.1-4.2) µg/l for Pb and 0.48 (0.01-3.9) µg/l for Hg in the seawater, whereas 2.45 (0-5.47) mg/kgDW for Cd, 3.63 (0.10-12.91) mg/kgDW for Cr, 3.2 (0.01-15.73) mg/kgDW for Ni, 3.51 (0.01-6.47) mg/kgDW for Pb and 0.39 (0.004-0.74) mg/kgDW for Hg, respectively. Most metal concentration values were below the permissible range for the related regulations. Mean bioconcentration factors (BCF) for each metal were as follows: 38,964 (1,771-207, 171) for Cd, 9,583 (1,231-80, 162) for Cr, 191 (3-20, 980) for Ni, 1,416 (245-5, 207) for Pb and 180 (5-716) for Hg, respectively. The BCF values from this study corresponded to the transitional phase from the pristine to the contaminated waters. Notably, Cd showed the highest BCF, which suggest that the Pacific oyster could be utilized as a useful biomarker for Cd contamination in sea water. The multidimensional scaling analysis suggested that the metal contaminants are mainly originated from combustion of fossil fuel and accumulated to oyster through food web.

Keyword: pacific oyster, *Crassostrea gigas*, heavy metal, bioconcentration factor

서 론

국민들의 생활수준의 향상과 식품산업의 발달로 인해 최근 식생활의 패턴은 양적 소비에서 질적 소비로 전환되고 있으며, 식품 안전성에 대한 관심이 집중되어 이에 관한 정부의 적극적인 개입을 요구하고 있다 (Jeong *et al.*, 2004). 또한 식품 안

전성은 수출입 수산식품에 있어서도 필수요건으로 검사가 강화되고 있는 추세이다. 세계적으로도 각종 수산관련 단체에서 국민에게 안전한 식품을 제공하기 위해 식품안전성 검사를 실시하고 있으며 (Philip, 1995), 어패류의 중금속 함량 역시 중요한 체크리스트에 포함되어 있다.

금속 원소는 크게 세 종류로 분류할 수 있다. 인체에 미량으로 존재하고 있지만 없어서는 안 될 필수 불가결한 미량금속류 (Fe, Zn, Co 등), 미량으로 분포하지만 인체에 악영향을 미치는 유해성 금속류 (Cd, Pb, Hg 등), 그리고 아직까지 생리적 특성이 알려지지 않은 금속류 (Ag, V, Sb 등) 등 3종류로 나누고 있다. 특히 두 번째 범주에 속하는 금속류는 생물체 본래의 구성성분이 아니고 동식물의 생육과정이나 식품의 가공, 저

Received Oct 22, 2009; Revised Nov 5, 2009; Accepted Nov 12, 2009

Corresponding author: Woo-Geon Jeong

Tel: +82 (55) 640-3101 e-mail: jwg@gnu.ac.kr

1225-3480/24327

The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea

장 활동 중 외부로부터 오염되어 들어온 이른바 환경유래 유해 중금속으로 인체에 독성이 강하기 때문에 식품안전성에 있어 주요 감시대상이 되어 왔다 (Philip, 1995). 또한 모든 중금속은 그 농도가 과도하게 증가될 경우 생체 내 기능이나 화학적 성질에 관계없이 생물체에 높은 독성 효과를 나타낸다.

해수에 존재하는 중금속이 해양 생물체내로 유입되는 경로로는 체표면을 통해 직접적으로 흡수되거나 먹이 섭취와 함께 체내로 유입되기도 하며, 연체동물은 아가미 (Kalk, 1963; Hobdon, 1967) 로 통하여 유입되는 경우도 있다. 또한 복족류는 발 운동에 의해 들어온 해수가 혈액과 혼합되면서 이루어지기도 한다 (Depledge and Phillips, 1986). 어떤 형태든 체내로 들어온 중금속은 다양한 경로를 통해서 체내에 축적된다. 유입된 중금속은 배변활동을 통해 장내에 포함된 중금속을 제거하거나 아가미 표면을 이용해 체외로 삼출시키고, 소화관이나 신장 세포가 중금속을 함유해 미립자를 형성, 체외로 배출시키기도 한다 (Rainbow, 1990). 그러나 대부분의 해양 무척추동물은 중금속 배출속도가 유입속도보다 느려 체내에 축적되거나 농축하게 된다. 이러한 생물학적 특성으로 인하여 이 매패류는 중금속 오염 지표 생물로 많이 이용되고 있다. 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 중금속 오염 모니터링 지표생물로는 홍합과 굴 등이 있으며 1960년대 말부터 이들을 이용한 해양 환경오염 연구가 본격적으로 시작되었으며 현재까지도 지속적으로 행해지고 있다 (Butler *et al.*, 1971; Phillips 1976).

국내 패류 총생산량은 연간 약 409,150 M/T (2005년) 에 이르고, 그 중 굴, 바지락, 진주담치 및 피조개가 총 358,329 M/T로 국내 패류생산량 가운데 약 87.5%를 점하고 있으며, 이들 생산량 중 많은 양이 경남과 전남 등 남해안에서 생산되고 있다 (MOMAF, 2006).

경상남도의 연안은 일찍부터 각종 수산생물의 서식 및 산란 장소로 수산자원이 풍부한 어장이었으며, 각종 양식산업이 성행하고 있으나 (Lee and Kim, 2000), 1960년대 후반부터 공업단지 조성과 주변도산업인구증가로 인해 산업폐수 및 도시하수 등 다양한 오염물질이 유입이 증가되고 있다 (박과 김, 1967). 그러나 복잡한 리아스식 해안의 특성으로 인하여 내만과 외해의 해수 유출입이 적어서 동해안, 서해안에 비해 오염물질이 해역에 쉽게 축적될 가능성이 높은 해역으로 알려져 있으므로 (Kwon *et al.*, 1990), 이들 해역에서 생산되는 수산물 식품 안전에 대하여 체계적인 관리가 요구되고 있다 (Lee and Kim, 2000).

지금까지 우리나라 남해안에 서식하는 패류의 중금속 오염 상태에 관한 조사 보고로는 담치와 굴 (Lee and Lee, 1984; Hwang *et al.*, 1985; Choi *et al.*, 1992) 에 대한 연구가 있지만, 대부분 연안 암반지대 서식하는 패류에 대한 연구로 한

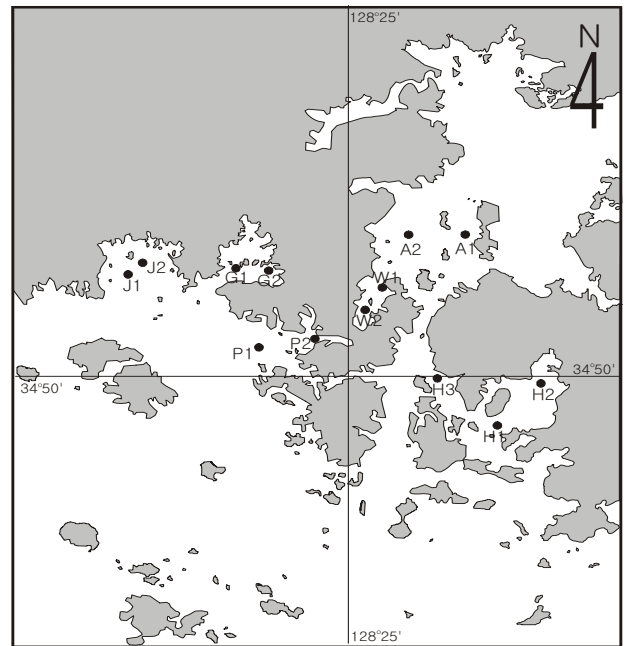


Fig. 1. Sampling sites for seawater and oysters around the coast of Tongyeong, Korea. Note: The sampling sites were allocated at least two sites in a bay where oyster culture has been extensively executed. J: Jaran Bay, G: Goseong Bay, P: Pukman Bay, A: Anjeong Bay, W: Wonmoon Bay, H: Hansan-Geoje Bay.

정되어 있거나 바지락과 같은 저서성패류의 오염상태에 관한 보고가 대부분이다 (Lee *et al.*, 1997; Kim and Han, 2000).

이 논문에서는 통영연안의 굴양식장을 중심으로 여러 가지 해양환경 특성과 중금속분포 특성을 분석하고, 참굴에 축적되는 특성을 파악하고자 하였다. 이 연구의 결과는 최근에 강화되고 있는 각종 식품규제와 HACCP 및 수산물 생산이력제와 같은 수산식품의 안전성확보를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

통영인근해역의 중금속 분포특성을 파악하기 위하여 Fig. 1 과 같이 모두 13개의 조사정점을 굴 양식장 인근에 배치하였다. 해수채집은 2003년 11월부터 2004년 7월까지 매월 1회씩 총 9회에 실시하였고, 참굴의 채취는 2003년 11월부터 2004년 2월까지 4회에 걸쳐 실시하였다. 일반 수질분석용 해수는 Niskin sampler (General Oceanics, Inc. Florida, USA)를 이용하여 표층수와 저층수를 각각 2 l씩 채수하여 쿨러에 보관한 채로 실험실로 옮겨 즉시 분석하였다. 중금속분석용 해수는 현장에서 농질산 5 mg/l첨가하여 (pH 4-5이하로 유지) 쿨러에 보관한 채로 실험실로 옮겨 즉시 분석하였다. 참

굴은 채취 즉시 현장수로 패각을 깨끗이 세척하였고, 아이스박스에 넣은 채로 실험실로 옮겨 분석하였다.

수온, 염분 및 용존산소 (DO) 는 현장에서 수질연속측정기 (SBE-19, Sea Bird, USA) 를 연직으로 내려 측정하였고, 투명도는 직경 30 cm의 투명도판을 수직으로 내려 조사하였다. 또한 수소이온농도 (pH) 는 pH meter (pH 5/6 & ION6, EUTECH, Vernon Hills, USA) 를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다. Chlorophyll-a (Chl-a), 화학적산소요구량 (COD), 부유현탁물 (SS) 은 해양환경공정시험법 (국립수산진흥원, 1997) 에 따라 분석하였다. 해수중의 용존무기질소 함량은 HACH사 수질분석 kit (Hach Company, USA) 를 이용하여 분석하였다.

해수의 중금속 추출은 해양환경공정시험법 (국립수산진흥원, 1997) 에 따라 유기착화제 (APDC/DDDC 혼합액) 를 사용하여 클로로포름 (J.T. Baker® HPLC Solvent) 으로 2회 추출하였다. 굴 육질부의 중금속 함량은 동결 건조시킨 굴 1 g 정도에 질산을 가하여 용해하여 분석 전까지 냉장보관하였다. 중금속 분석의 신뢰도 향상을 위하여 시판중인 표준물질 (SRM 1947b Organics in mussel, NIST, USA) 을 이용하여 각각의 금속원소별 회수율(%)을 구하였다.

중금속 분석은 ICP Spectrometer (TraceScan Advantage, Thermo Jarrell Ash Corp., USA) 를 이용하였다. 분석항목은 카드뮴 (Cd), 크롬 (Cr), 니켈 (Ni) 납 (Pb) 등 모두 5가지 중금속을 분석하였고, 수은 (Hg) 은 Mercury analyzer (NIC MA-2000S, Nippon instruments LTD., Tokyo, Japan) 를 이용하여 분석하였다.

실험의 분석결과는 평균과 표준편차로 표시하였고, 각 평균 간 ANOVA 분석을 실시하였고, 평균간 유의차가 인정될 경우 (P < 0.05), SNK test로 사후검정을 실시하였다. 각 조사해역별 수질자료를 통해 집괴분석을 실시하였다. 각 참굴 체내 축적된 중금속 원소들 간의 상관관계를 알아보기 위해 Pearson product-moment 상관관계분석을 하였다. 각 수질 분석자료를 통해 다차원척도법 (Multidimensional scaling, MDS) 에 의한 지각도 (Positioning map) 를 작성하여 참굴의 중금속 축적과 유사성을 지니는 수질 환경 데이터를 분석하였다. 이상의 통계처리는 SPSS 12.0K for windows (SPSS Inc., USA) 를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 일반수질 및 해수 중금속 함량

조사해역에 대한 수질조사의 결과는 Fig. 2와 같다. 조사해역의 수온범위는 3.3-30.1℃로, 수심이 낮고 비교적 폐쇄된 해역인 고성만 (G) 과 원문만 (W) 이 계절에 따른 변화가 심했고, 조류소통이 좋은 한산거제만 (H) 은 봄 여름철에도 다른

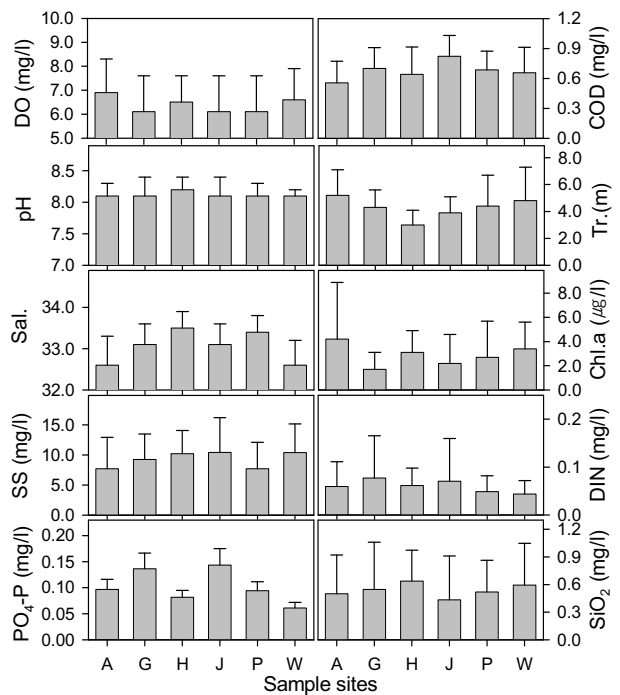


Fig. 2. Comparison of mean water qualities in the waters of oyster farms around Tongyeong coast. Bars indicate standard deviations (bar). Samples sites (A, G, H, J, P and W) are referred from Fig. 1.

폐쇄해역에 비해 다소 낮은 온도분포였다. pH는 7.2-8.5의 범위로 대부분의 조사시기 및 정점에서 HACCP 수질 기준인 pH 7.4-8.4의 범위이내였지만, 일부 강우기와 고수온기에 이 기준을 충족시키지 못하는 정점이 있었다. 투명도는 1.2-12.2 m의 범위로 한산거제만 (H) 이 평균 3.0 m로 가장 낮았고, 안정해역 (A) 이 평균 5.2 m로 가장 높았다. 시기별로는 11월이 가장 높았고, 6월이 가장 낮았다. 용존산소 (DO) 는 1.9-8.6 mg/l의 범위로 원문만은 여름에 국지적인 빈산소수괴가 형성되었다. 굴 양식업이 성행하는 저수온기에는 모두 HACCP 수질기준치인 4 mg/l이상으로 안정적인 수질 분포를 보였다. 염분농도 (SAL) 는 31.2-34.2의 범위로, 안정해역 (32.7 ± 0.6)과 원문만 (32.6 ± 0.7)이 다른 조사 해역에 비해 낮았다.

용존무기질소 (DIN) 는 0.004-0.336 mg/l의 범위였고, 시기별로는 11월 (0.056-0.284 mg/l) 과 7월 (0.020-0.281 mg/l) 에 비교적 높았으며, 상대적으로 5월이 낮았다. 조사지역별로는 고성만 (G) 과 자란만 (J) 의 DIN 함량이 높았지만, 시기별 변동 폭이 컸다. 고성만은 다른 해역에 비해 NH₄-N의 함량이 높았다. 인산인 (PO₄-P) 은 조사 시기 및 수층에 따라서 변동차가 컸다. 11월과 6월이 비교적 높았고, 동절기에는 대부분 조사정점에서 0.01 mg/l이하로 낮았다.

The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea

Table 1. The criteria and the present level of water quality in the seawater around the coast of Gyeongnam Province

Items	Criteria ¹⁾	Analyzed level	
		Whole season	Cultural season
pH	7.8-8.4	7.2-8.5	7.9-8.4
DO (mg/l)	> 4.0	1.9-8.6	4.5-8.3
COD (mg/l)	< 1.0	0.08-1.6	0.08-1.28

¹⁾ Korean Food & Drug Administration (2005)

규산 (SiO₂) 함량은 0-1.76 mg/l의 범위였고, 조사 기간 중 2-4월에 비교적 낮은 수치를 보였다. 겨울철에는 해역별로 뚜렷한 차이가 나타나 한산거제만과 안정 해역에서 비교적 높았다. 특히 규산은 주로 규조류와 같은 해산 식물플랑크톤에서 검출되는 것을 감안하면 이들 해역에서 규조류의 생산이 높은 것으로 생각된다.

화학적산소요구량 (COD) 은 0.08-1.6 mg/l의 범위였고, 대부분의 해역 COD 기준을 충족하였지만, 일부 조사정점에서 이보다 약간 높은 값이 조사되었다. 조사정점별로는 자란만, 복만 및 고성만의 통영 서측 해역이 비교적 높았다.

조사해역의 SS 함량은 0.9-29.2 mg/l의 범위였다. 특히적으로 일부 지역을 제외하고는 대부분 7.7-10.4 mg/l 범위 안에 존재했다. 조사해역별로 특별한 경향을 찾을 수는 없었고, 특히 조사 시기에 따라 차이가 컸다. 부유물질 중 유기물 함량을 의미하는 POM은 0.0-15.0 mg/l의 범위였고, 해역별로는 한산거제만과 원문만의 함량이 다른 해역에 비해 조금 높았다. 조사시기별로는 봄철에 주로 높은 것으로 보아 식물플랑크톤 번무와 관계가 있는 것으로 판단된다.

조사해역의 chlorophyll-a 함량은 0.1-26.1 mg/m³의 범위

였다. 조사시기별로는 12월에 상대적으로 높았다. 전체 평균으로는 고성만의 chlorophyll-a 함량이 가장 낮았고, 안정해역이 가장 높았다. 조사해역의 수질은 일부 고수온기를 제외하고는 어장수질환경기준의 범위내였다. 그러나 굴양식이 성행하는 저수온기에는 대부분 수질환경 감시기준 범위 내였다 (Table 1).

해수 중금속 조사결과는 Fig 3과 같다. Cd 0.01-0.32 (0.1 ± 0.07) µg/l, Cr 0.01-1.43 (0.52 ± 0.44) µg/l, Ni 0.15-2.33 (0.59 ± 0.39) µg/l, Pb 0.05-4.24 (1.06 ± 0.75) µg/l, Hg 0.01-3.89 (0.46 ± 0.69) µg/l의 범위였다. Cd와 Cr은 검출한계 이하였다. Ni는 시기별로 유사한 수치를 나타냈지만 5월에 0.37 µg/l로 가장 낮은 값을 나타냈다. Pb 농도는 대부분 기준치 이하였다. Hg 농도는 대부분이 기준치를 초과하지 않았지만 11, 12, 1월과 일부 조사 지역에서 다소 높은 값을 나타내고 있었다. 조사정점별로는 원문만과 안정해역이 위치한 동측해역 (0.53 ± 0.7) µg/l이 비교적 높았고, 고성만과 자란만의 통영 서측해역 (0.38 ± 0.3) µg/l이 비교적 낮았지만, HACCP 수질환경 모니터링 기준치 이하였다.

우리의 연구결과를 이미 보고된 국내 연안의 해수 중금속 농도와 비교하였다 (Table 2). 1990년 해양경찰청에서 조사한 우리나라 전 연안 해수 중 카드뮴의 농도는 11 정점 중 3 곳을 제외하고는 우리 결과보다 높게 나타났다. 카드뮴은 “이타이타이병”과 같은 중금속 중독성 질병을 유발하는 매우 위험한 금속류로 국제적으로 이러한 금속류의 해양투기 및 폐기를 규제하고 있다. 2000년에 조사한 진해만의 카드뮴 (Cd) 농도는 3.1 µg/l로 우리 연구결과보다 훨씬 높았고, 특히 부산 연안은 76 µg/l로 무려 760배나 높았다. 그러나 통영연안은 각종 기준치 이하였다.

크롬 (Cr) 은 우리나라의 전 해역의 평균 농도 0.44 µg/l와 거의 유사하게 나타났다 (Korean Coast guard, 1990). 니켈은 진해만의 0.5 µg/l와 비슷한 농도였고, 납(Pb) 은 0.6 µg/l보다는 다소 높았지만, Lee and Kim (2000) 과 Ahn (2003) 의 3.3 µg/l와 73 µg/l보다는 낮았다. 수은의 경우 또한 Ahn (2003) 의 12 µg/l보다 낮았다. 전체적으로 통영

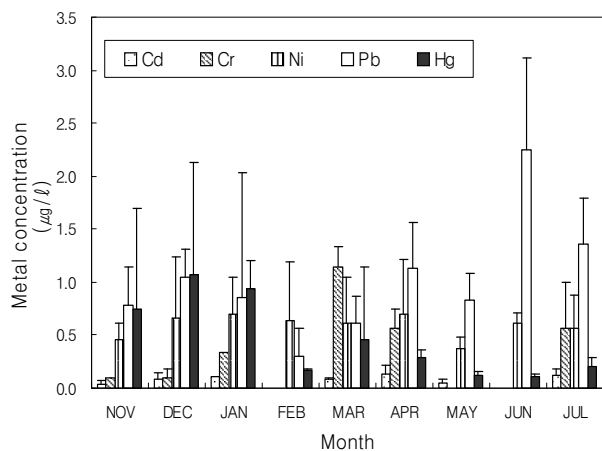


Fig. 3. Monthly variation of mean concentration of metals (Cd, Cr, Ni, Pb and Hg) in the studied waters.

Table 2. Comparison of metal concentrations in the seawater at the different regions of Korea (µg/l)

	Cd	Cr	Ni	Pb	Hg	Reference
Incheon coast, Korea	0.14	0.34	-	0.58	-	KCG ¹
Gunsan coast, Korea	0.09	0.48	-	0.58	-	(1990)
Mokpo coast, Korea	0.07	0.46	-	0.45	-	
Yeosu coast, Korea	0.08	0.34	-	0.49	-	
Busan coast, Korea	0.16	0.63	-	0.92	-	
Chungmu coast, Korea	0.12	0.36	-	1.04	-	
Pohang coast, Korea	0.14	0.76	-	0.75	-	
Ulsan coast, Korea	0.15	0.68	-	0.85	-	
Donghae coast, Korea	0.12	0.38	-	0.37	-	
Sokcho coast, Korea	0.12	0.17	-	0.45	-	
Jeju coast, Korea	0.07	0.25	-	0.32	-	
Busan coast, Korea	76	ND*	-	73	12	Ahn (2003)
Jinhae Bay, Korea	3.1	-	0.5	3.3	-	Lee and Kim (2000)
Gyeongnam Province coast, Korea	0.1	0.44	0.59	0.75	0.46	This study

¹ Korean Coast Guard

Table 3. Evaluation of metals concentration (µg/l) in the seawater of the oyster farms around studied waters

Items	Criteria	Present level
Seawater	Cd	< 10 ¹ 0.01-0.3 (0.1)
	Cr	< 50 ¹ 0.01-1.4 (0.44)
	Ni	< 5 ¹ 0.2-2.3 (0.59)
	Pb	< 50 ¹ 0.1-4.2 (0.75)
	Hg	< 0.5 ¹ 0.01-3.9 (0.46)

¹ Ministry of Environment (2006a)

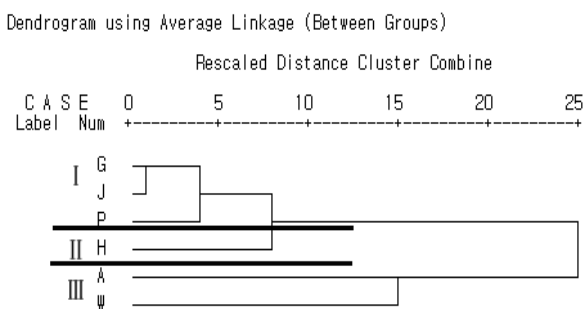


Fig. 4. Cluster analysis of water qualities in the oyster farms around the coast of Gyeongnam Province. Samples sites (A, G, H, J, P and W) are referred from Fig. 1.

연안의 해수 중금속농도는 아직은 환경오염기준치 이하의 농도를 유지하고 있는 것으로 판단된다.

이번 연구의 조사결과와 수질환경보전법에서 정한 해역수질 기준을 비교한 결과는 Table 3과 같다. 모든 평균 농도는 모든 기준치를 충족하지만, 수은은 제한적이지만 시공간적으로 기준치를 상회하는 경우도 있었다.

이상의 결과를 종합하여 조사해역의 수질 및 해수 중금속함량 자료를 토대로 해역의 수질의 군집구조분석을 실시한 결과는 Fig. 4와 같다. 해역의 수질과 중금속 평균값을 대입하여 각 정점별 유사도를 이용한 군집구조 분석결과 각 해역별 수질 특성을 결정짓는 요인은 지역성으로 판단되었다. 이는 고성만 (G), 자란만 (J) 및 북만의 통영 서쪽 해역의 군집 (P) 과, 안정 (A) 과 원문만 (W) 의 동쪽 해역군집, 그리고 두 군집의 중간적 성격을 띤 한산-거제만 해역 (H) 으로 구분되었다.

The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea

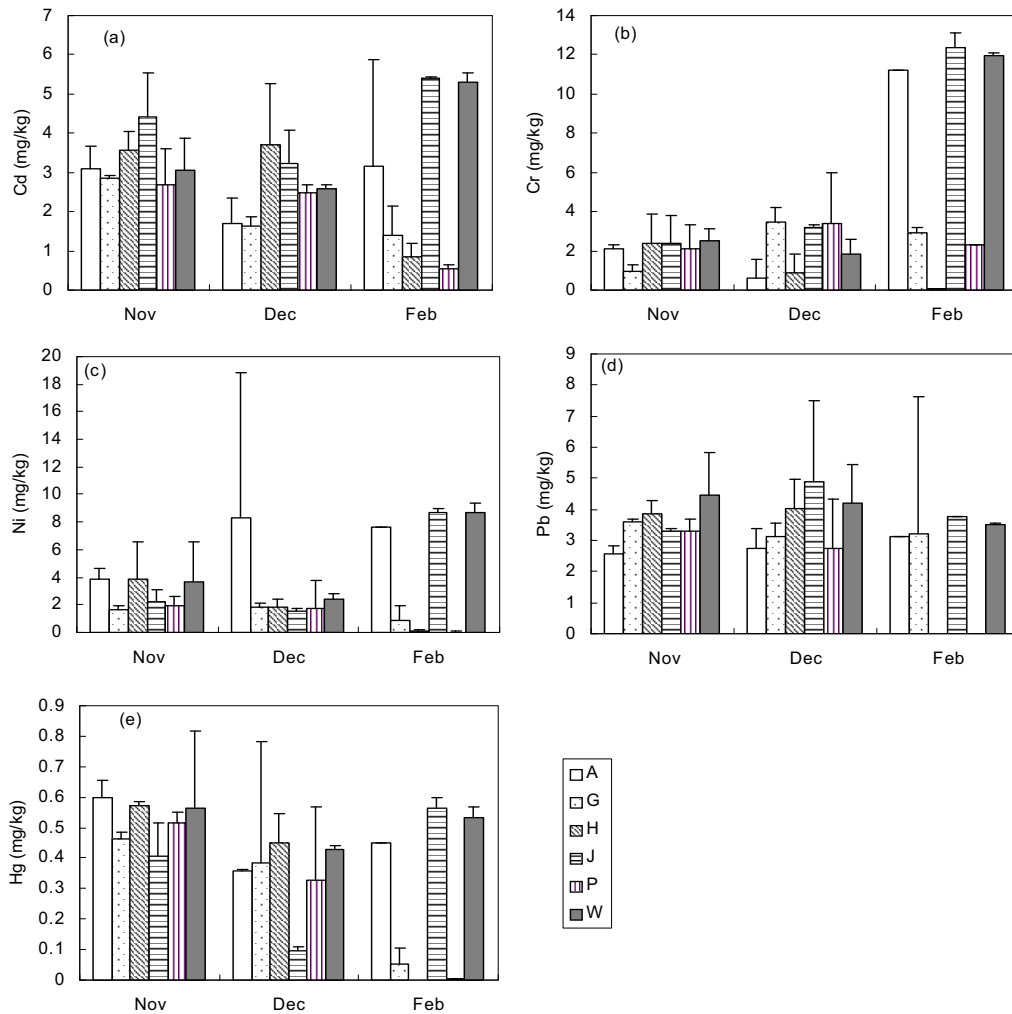


Fig. 5. Variation of mean metal concentrations (mg/kgDW) in cultured oysters from 6 different sample sites along Tongyeong, Korea. (a) Cadmium, (b) Chrom, (c) Nickel, (d) Lead, and (e) Mercury.

2. 굴육질의 중금속의 분포특성

통영 연안의 양식 굴의 중금속 함량을 조사한 결과는 Fig. 5와 같다. 굴의 육질부중 Cd 함량은 0-5.47 (2.45 ± 1.60) mg/kgDW의 범위였고, 자란만과 원문만의 중금속함량이 높았고, 북만과 고성만의 함량이 비교적 낮았다. 특별한 공간적 분포경향은 없었고, 시기별로는 양식말기로 갈수록 낮아지는 경향을 나타내었다. Cr 함량은 0.10-12.91 (3.63 ± 3.76) mg/kgDW의 범위였고, 공간적 분포의 차이가 현저하게 나타나, 자란만과 원문만이 다른 해역에 비해 월등히 높았다. 한산거제만의 경우 내만 해역은 전체 평균 0.5 mg/kgDW로 가장 낮았다. Ni 함량은 0.01-15.73 (3.2 ± 3.42) mg/kgDW의 범위였고, 원문만과 자란만의 농도가 상대적으로 높았다. 하지만 안정해역의 A-2는 다른 해역에 비해 특이적으로 높은 함량을

나타내었다 (평균 9.2 ± 5.9 mg/kgDW). 대부분 니켈이 다량 검출된 지역은 도시주변에서 상대적으로 많이 나타났다. Pb 함량은 0.01-6.47 (3.51 ± 1.43) mg/kgDW의 범위였고, 지리적으로는 한산거제만, 자란만, 원문만이 비교적 높았고, 고성만의 외만도 비교적 높았다. 북만이 상대적으로 낮았다. Hg 함량은 0.004-0.74 (0.39 ± 0.21) mg/kgDW의 범위였고, 만별로 거의 비슷한 농도분포였지만, 고성만 내측이 현저하게 낮은 분포였다.

Table 4는 국내의 보고된 굴 체내 중금속 농도를 비교한 결과이다. 카드뮴 (Cd) 은 Hwang *et al.* (1985) 의 결과보다는 높았지만, 다른 조사결과보다는 낮았다. 크롬 (Cr) 은 Mazatlan Bay (Soto *et al.*, 2001) 의 0.99 ppm보다는 낮았지만, 일부 해역에서는 이 공업지역인 이 해역보다 다소 높

Table 4. Comparison of metal concentrations in oyster

Region	Cd	Cr	Ni	Pb	Hg	Reference
Kamak Bay, Korea	0.29	- ¹	-	0.31	0.006	Hwang <i>et al.</i> (1985)
Eastern Coast, Korea	0.72	-	0.68	-	0.05	
Southern Coast, Korea	0.48	-	0.51	-	0.02	Choi (1992)
Western Coast, Korea	0.86	-	0.9	-	0.03	
Western coast, Korea	0.57	-	-	3.78	0.58	Kim (1997)
Jinhae Bay, Korea	2.50	-	1.1	1.10	-	Lee and Kim (2000)
Mazatlan Bay, Gulf of California	2.30	0.99	5.41	2.30	-	Soto <i>et al.</i> (2001)
Gyeongnam coast, Korea	0.49 ²	0.73 ²	0.64 ²	0.70 ²	0.078 ²	This study

¹. Not measured

². Conversed data to wet weight basis

Table 5. Evaluation of the present status of metals content in the oyster cultured at the coast of Gyeongnam Province

Items	Criteria (mg/kg ww)	Present level	
		Mean(mg/kg ww)	Range(mg/kg dw)
Cd	2.0 ¹⁾	0.49	0.01-5.47
Cr	13 ²⁾	0.73	0.1-12.91
Ni	80 ²⁾	0.64	0.01-15.73
Pb	2.0 ¹⁾	0.70	0.01-6.47
Hg	0.5 ¹⁾	0.078	0.004-0.74

¹⁾ Korean Food & Drug Administration (2005),

²⁾ Food and Drug Administration (2001)

은 결과가 검출되기도 하였다. 니켈 (Ni) 은 Hwang *et al.* (1985), Choi (1992) 및 Kim (1997) 이 보고한 수산업이 이뤄지는 연안에서 채집된 굴의 체내농도와는 비슷한 분포였지만, Lee (2000) 와 Soto *et al.* (2001) 이 보고한 공업지역의 결과보다는 낮았다. 납 (Pb) 과 수은의 경우는 일반연안에서 채집된 굴의 농도와 공업지역에서 채집된 굴의 체내농도의 중간 정도 농도분포를 나타내어, 현재 통영연안의 양식해역의 중금속 오염의 변화추이를 잘 나타내고 있다.

이 연구 결과와 허용기준치와 비교한 결과는 Table 5와 같다. 양식 참굴의 평균 중금속 농도는 모두 기준치 이하였지만, 수은의 경우 극히 제한적이지만, 시공간적으로 기준치를 상회하는 경우도 있었다.

조사 해역별 양식 참굴의 중금속 농축특성의 차이를 알아보기 위해 생물농축계수 (Bioconcentration Factor, BCF) 를 조사하였다 (Fig. 6). 각 조사 해역별 BCF는 지역별 중금속별로 차이를 보이고 있다. 안정해역 (A) 의 BCF 중간값은 682

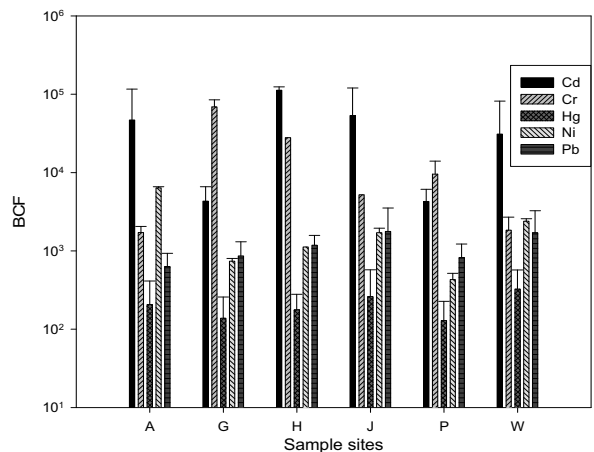


Fig. 6. Comparison of bioconcentration factor (BCF) for cultured oyster in the studied waters. Bar indicates standard deviation. Samples sites (A, G, H, J, P and W) are referred from Fig. 1.

The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea

Table 6. Comparison of BCF for metals at different regions

	Cd	Cr	Ni	Pb	Hg	Reference
Jinhae Bay, Korea	9,300-500,000	-		200-700	-	KORDI ¹ (1982)
Jinhae Bay, Korea	145,069	-	2,745	44,559	-	Lee and Kim (2000)
Masan Bay, Korea	5,818	185	111	216	-	Kwon and Lee (2001)
Santa Rosa Sound, Florida	500	87	344	196	1,759	Lewis et al (2004)
Gyeongnam coast, Korea	38,964*	9,583*	191*	1,416*	180*	This study

-: Not included items; * : Mean value

¹. Korea Ocean Research & Development Institute

Table 7. Statistical analysis of pearson moment correlation between metal components of the culture oyster in the studied waters (n = 12).

	Cr	Ni	Pb	Hg
Cd	0.764 P = 0.0101	0.701 P = 0.0163	0.881 P = 0.000341	0.709 P = 0.0145
Cr		0.588 P = 0.0572	0.605 P = 0.0487	0.491 P = 0.125
Ni			0.368 P = 0.239	0.506 P = 0.0936
Pb				0.779 P = 0.00283

(669-562, 020), 고성만 (G) 은 704 (142-400, 811), 한산거제해역 (H) 은 973 (77-1,035, 857), 자란만 (J) 은 1006 (1,240-520, 163), 북만 (P) 은 759 (17-63, 466), 원문만 (W) 831 (1,818-394, 455) 의 범위였다. 각 금속원소별 농축특성을 살펴보면, Cd 중간값은 38,964 (1,771-207, 171), Cr 중간값은 9,583 (1,231-80, 162), Ni 중간값은 191 (3-20, 980), Pb 중간값은 1,416 (245-5, 207), Hg 중간값은 180 (5-716) 으로 나타났다. 5가지의 금속원소 중 카드뮴과 크롬의 농축이 가장 활발하게 일어나는 것으로 조사되었고, 수은이 가장 농축계수가 낮은 것으로 조사되었다.

해역별 금속원소의 농축특성을 분류하면 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 먼저 안정만, 한산-거제, 자란만 및 원문만과 같이 비교적 개방해역에서는 Cd의 BCF가 가장 높았지만, 고성만과 북만처럼 비교적 폐쇄성 해역에서는 Cd보다는 Cr의 농축계수가 높았다.

Table 6은 굴의 중금속 생물농축계수 (BCF) 에 관한 연구

한 결과를 비교하였다. 수생생물의 생물농축계수는 환경수중의 농축대상물질의 농도에 영향을 많이 받으므로 일반적으로 오염해역에서는 낮고, 청정해역에서는 비교적 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다. 미국의 Santa Rosa sound (Lewis et al., 2004) 와 국내 마산만 (Kwon and Lee, 2001) 의 BCF는 이번 조사결과보다 낮은 반면, 다른 수산해역에서 조사된 이전 연구결과는 우리 결과와 비슷하거나 낮은 경향을 확인할 수 있었다.

각 금속원소별로 살펴보면, 카드뮴의 BCF가 가장 높았고, 다른 금속류는 비슷한 다소간의 차이는 있지만 카드뮴에 비해 현저하게 낮았다. 이는 굴의 생물농축특성을 의미하는 것으로 참굴이 카드뮴에 대한 생리대사율이 현저하게 낮기 때문으로 생각된다.

통영연안에서 참굴의 중금속 농축특성을 파악하기 위하여 각 중금속 원소들 간의 농축 상관관계를 조사한 결과는 Table 7과 같다. 각 금속원소별로 다른 금속원소와 가장 높은 상관관

계를 나타낸 금속은 카드뮴이었다. 카드뮴은 다른 모든 금속류와 높은 정상관관계를 나타내었다 ($P < 0.05$). 카드뮴은 지각에서 흔히 발견되는 금속으로 수중에서는 $Cd(H_2O)_4^{2+}$ 의 형태로 용존 또는 입자에 흡착하여 존재하며 참굴의 섭이과정을 통해 체내 축적되게 된다. 크롬의 경우 카드뮴과 납에서 양의 상관관계를 지녔고, 수은은 카드뮴과 납에 대해 양의 상관관계를 지니는 것으로 나타났다. 특히 산업활동에서 사용되고 있는 대부분의 카드뮴은 납, 아연, 구리 광석이 녹을 때 부산물로 얻어진다. 따라서 카드뮴과 납은 상당한 개연성이 있을 것으로 나타났다. 특히 납은 연안지역에 위치해 있는 선박 건조장에서 발생하는 선박 방청제, 방오도로 등 다양한 페인트에 의해서 오염도가 높게 나타난다. 또한 카드뮴은 석탄, 석유의 연소 시 많이 발생하는 물질이다. 조사해역의 금속류 상호간의 상관관계 조사결과를 토대로 추정되는 통영연안 지역의 주요 중금속류 유입원은 화석연료유의 연소에 의한 것으로 판단된다.

해역의 중금속 분포와 관계가 밀접한 요인들을 분석하기 위하여 다차원척도법에 의해 각 측정치들의 유사성을 분석하였다 (Fig. 7). 분석결과 해수 중금속 농도는 COD, DIN, SS 및 pH와 같은 수질과 밀접한 관련이 있는 것으로 조사되었다. 그러나 염분농도와는 다소 차이가 있는 것으로 보아, 통영연안의 해수 중금속 농도는 강우에 의한 일시적 유입보다는 지속적인 유입원에 의해 결정되는 것으로 판단된다. 또한 이러한 수질은 참굴의 중금속의 농도와 비교적 밀접한 유사성을 지니는 것으로 나타났다. 그러나 니켈의 경우 다른 중금속 축적과 다소 거리가 있는 것으로 나타났고, 수질과는 크게 유사성이 없

는 것으로 나타났다. 니켈을 제외한 다른 금속류의 체내 축적량은 클로로필 a 및 투명도 등과 밀접한 유사성을 지니는 것으로 보아 통영연안에 서식하는 참굴의 중금속 축적은 대부분 먹이연쇄를 통해 이뤄짐을 알 수 있다.

요 약

해수 및 양식 참굴의 중금속 농도를 분석한 결과 일부 지역에서 간헐적으로 기준치를 초과하였지만 아직까지 뚜렷한 오염 현상은 확인되지 않았다. 그러나 기존 조사한 결과와 비교하면 미량이지만 증가 추세를 보이고 있어 지속적인 감시 및 관리체계 구축이 필요하다고 생각된다.

참굴의 중금속 생물농축계수를 조사한 결과 경남 연안에 서식하는 참굴의 생물농축계수는 청정해역과 오염해역의 중간이행 단계에 해당하였다. 특히 카드뮴의 생물농축계수가 다른 금속에 비해 월등히 높으므로, 이러한 특성을 활용하면 참굴을 Cd 등 중금속 오염 모니터링에 활용할 수 있을 것이다. 특히 카드뮴은 다른 원소들의 생물농축과 가장 밀접한 상관관계가 있는 것으로 조사되었다. 특히 카드뮴과 납이 가장 밀접한 상관관계를 나타내는 것은 경남 연안의 해역의 주요 중금속 유입원은 화석연료유의 연소에 의해 유래된 것으로 추정된다.

다차원척도분석법에 의한 수질자료와 중금속 농축경향을 분석한 결과 경남 연안의 양식 참굴의 중금속 유입원은 강우에 의한 일시적 유입보다는 클로로필 a 및 투명도 등과 밀접한 유사성을 지니는 것으로 보아 통영연안에 서식하는 참굴의 중금속 축적은 대부분 먹이연쇄를 통해 이루어지는 것으로 본다.

참고 문헌

국립수산진흥원 (1997) 해양환경공정시험법. 한국해양학회, 316pp.

Ahn Y.A. (2003) The evaluation of some metals in seawaters of Busan coast. MS thesis, Kosin University, Busan.

Butler, P.A., Andron, L., Bonde, G.J., Jernelou, A., and Reisch, D.J. (1971) Monitoring organisms. In: FAO technical conference on marine pollution and its effects on living resources and fishing, Rome (1970). Supplement methods of detection, measurement and monitoring pollutants in the marine environment (ed. by Ruvio, M.) London Fishing News (Books), pp. 101-112.

Choi, H.G., Park, J.S., and Lee, P.Y. (1992) Study on the heavy metal concentration in mussels and oysters from the Korean coastal waters. Bulletin of Korean Fisheries Society 25: 485-494.

Depledge, M.H. and Phillips, D.J.H. (1986) Circulation, respiration and fluid dynamics in the Gastropods mollusc, *Hemifusus tuba* (Gmelin). Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 95: 1-13.

Food and Drug Administration (2001) Fish and fisheries

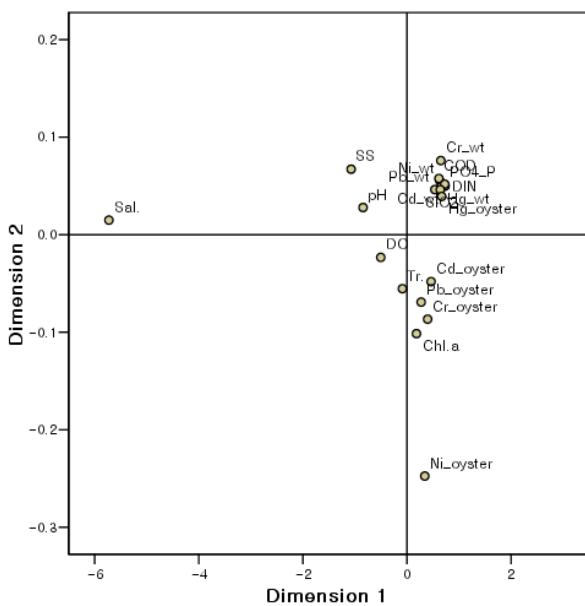


Fig. 7. Multidimensional scaling analysis for metals distribution of the oyster in the studied waters.

The study on bioaccumulation of heavy metals in the cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, along the coast of Tongyeong, Korea

- products hazards and controls guidance. 287 pp.
- Hobden, D.J. (1967) Iron metabolism in *Mytilus edulis*, I. Waraton in total content and distribution. *Journal of Marine Biology Association of the United Kingdom* **47**: 597-606.
- Hwang, G.C., Kim, S.J., Song, K.C., Wi, C.H. and Park, J.H. (1985) Heavy metal concentration in oyster, *Crassostrea gigas*, and blue mussel, *Mytilus edulis*, in Hansan-Koje Bay. *Bulletin of Fisheries Research and Development Agency* **48**: 205-215.
- Jeong I.G., Ha, K.S. and Choi, J.D. (2004) Heavy metals in fish and shellfish at the coastal area of Tongyeong, Korea. *Journal of Institute of Marine Industry* **17**: 39-46.
- Kalk, M. (1963) Absorption of vanadium by tunicates. *Nature (London)*. **198**: 1010-1011.
- Kim, I.S. and Han, S.H. (2000) A study of heavy metal contents in shellfishes of various areas in Jeonbuk. *Journal of Korean Society of Food Science and Nutrition* **25**(9): 758-761.
- Kim, S.K. (1997) A Study on the heavy metals contents of shellfish in western coast of Korea. *Journal of Natural Sciences of Soonchunhyang University* **3**:353-364.
- Korean Coast Guard (1990) Research report, Vol. 6. 253pp.
- Korean Food & Drug Administration (2005) Safe food.
- Korean Food & Drug Administration (2006) World collection of criteria for food contaminant. 105 pp.
- Korea Ocean Research & Development Institute (1982) Study on the contaminant migration in coastal ecosystem. BSPE0032-60-4.
- Kwon, Y.T., Lee, C.W. and Min B.Y. (1990) A study on the environmental standard of toxic elements in sea water. *Institute of Environmental Research, Kyungnam University* **12**: 25-26.
- Kwon, Y.T. and Lee, C.W. (2001) Ecological risk assesment of sediment on wastewater discharging area by means of metal speciation. *Microchemical Journal* **70**: 255-264.
- Lee, J.-H., Han K.-W. and Cho, J.-Y. (1997) Contents of heavy metals in seawater, sediments, fishes and shellfishes from Kunsan-Changhang coastal areas. *Agricultural Chemistry and Biotechnology* **4**(4): 347-351.
- Lee, I.S. and Kim, E.J., (2000) Distribution of heavy metals in sediments, seawater and oysters (*Crassostrea gigas*) in the Jinhae Bay. *The Korean Journal of Ecology* **23**(1): 59-64.
- Lee, S.H. and Lee, K.W. (1984) Heavy metal in mussels in the Korean coastal water. *Journal of the Korean Society of Oceanography* **19**: 111-117.
- Lewis, M.A., Quarles, R.L., Dantin, D.D. and Moore, J.C. (2004) Evaluation of a Florida coastal golf complex as a local and watershed source of bioavailable contaminants. *Marine Pollution Bulletin* **48**: 254-262.
- Ministry of Environment (2006) Enforcement Decree of the Water Quality and Ecosystem Conservation Act. Environmental Law. Korea.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2006) Statistical Year Book of Maritime Affairs and Fisheries. 1260 pp.
- Park, J.S. and Kim, J.D. (1967) A study on the "Red-water" caused at Chinhae bay. *Bulletin of National Fisheries Research and Development Institute* **43**: 63-79.
- Phillips, D.J.H. (1976) The common mussel *Mytilus edulis* as an indicator of trace metals in Scandinavian Water. I. Zinc and cadmium. *Marine Biology* **43**: 283-291.
- Philip, S.R. (1995) Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* **31**: 183-192.
- Rainbow, P.S. (1990) Heavy metals in marine invertebrates. *In: Heavy metals in the marine environments*. (Eds. by Furness. R.W. and Rainbow, P.S.) pp. 68-79. CRC Press. Florida.
- Soto, J. and Páez, O. (2001) Distribution and normalization of heavy metal concentrations in mangrove and lagoonal sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California). *Estuarine Coastal and Shelf Science* **53**: 259-274.