

울산연안 해수 및 홍합 중의 중금속 함량

경북대학교 보건대학원, 순천향대학교 환경보건학과*

김 순 분 · 이 중 영 · 장 봉 기*

Some Heavy Metal Concentrations of Seawater and *Mytilus coruscus* in Ulsan Seaside

Sun Bun Kim, Jong Young Lee, Bong Ki Jang*

Graduate School of Public Health, Kyungpook National University
Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University*

= ABSTRACT =

To examine the contamination in Ulsan coastal area, some heavy metal concentrations in sea water and *Mytilus coruscus* have been measured.

Sea water samples were collected on April 6 in 1995 and *Mytilus coruscus* samples were collected on April 2 in 1995.

Total number of sea water samples was 26 and that of *Mytilus coruscus* was 54. The sites where the samples collected were same in sea water and *Mytilus coruscus*. The method of analysis was atomic absorption spectrophotometer. The results indicated that the heavy metal concentrations of sea water were varied according to the sampling stations.

The concentrations of cadmium, manganese, zinc in sea water collected in the coastal area near Mipo complex were higher than those of other coastal areas, and the concentrations of lead in sea water collected in the coastal area near petrochemical complex were higher than those of others.

In general the concentrations of lead, zinc, copper in sea water were proportionate to those in *Mytilus coruscus*.

The mean concentration rates of lead, cadmium, manganese in *Mytilus coruscus* inhabiting in Ulsan coastal area were similar, 1070, 1370 and 1300, respectively.

The concentration rate of mercury was 80, the lowest value of other heavy metals, and that of copper was 6940, the highest value.

Consequently it seems to be more desirable to use *Mytilus coruscus* as a sample to examine the contamination of coastal area than sea water.

Key words : Heavy metal, Seawater, *Mytilus coruscus*

서 론

대부분의 공업단지는 원료나 제품의 수송, 공업용수의 공급 및 폐수배출 등이 용이한 연안지역에 위치하므로 해양 오염문제가 날로 심각해진 뿐만 아니라 특히 각종 폐수중에 함유된 중금속이 인근해역으로 유입될 경우, 해저퇴적물과 수중생물에 축적되어 생태계의 균형을 파괴하게 된다. 또한 식물연쇄의 경로를 통해 결국 인간에게 돌아오기 때문에 연안해역의 중금속 오염의 정확한 실태와 그 방지대책의 수립이 매우 중요한 문제로 제기되고 있다.

울산공업단지는 1962년 「특정공업지구」로 결정·공포된 이래 내규도의 석유화학단지, 비철금속단지, 자동차 산업 및 조선소 등이 위치하고 있고, 또 70여만의 도시 인구를 수용하고 있으므로, 생활하수나 산업폐수 등의 유입으로 환경오염이 점차 가속화되고 있다(울산상공회의소, 1994). 또 울산연안 해역에는 많은 공동어장과 양식장이 분포하고 있어 해양오염으로 인한 수중생물의 오염 우려가 클 것으로 볼 수 있는데(울산상공회의소, 1994) 이에 따라 정부에서는 환경보전 특별대책 지역으로 지정하여 특별관리를 하고 있다.

환경을 오염시키는 많은 화학물질 중 중금속의 경우 생체단백의 중요한 활성기인 mercapto기와 용이하게 결합하므로 단백질, 원형질독, 세포독으로 알려져 왔으며(김준연과 김돈균, 1987), 이러한 중금속 성분의 위해가 큰 것은 이것이 근본적으로 제거되기가 어렵다는 점과, 물이나 토양의 자정능력은 중금속에 아무런 영향을 주지 못하고 매우 서서히 확산에 의해 희석되므로 그 체류기간이 매우 장기적이라는 점이다(유광식 등, 1991).

일반적으로 수서생물들은 한 단계의 에너지전이과정에서 중금속의 농도를 약 10배(수배~수십배) 가량 농축하는 것으로 알려져 있으며(유광식 등, 1991), 특히 어패류에 중금속이 축적될 수 있음은 많은 학자에 의해 증명되어 왔으며, Brooks(1965)는 어류보다 패류에 중금속의 축적이 더욱 많다고 했다.

특히 패류와 같은 정착생물은 해수로부터 여러 가지 오염물질을 섭취, 농축하여 살아있는 감시자의 역할을 하므로 미국의 경우 1976년부

터 종합 감시계획을 수행하여 각 측정지점에서의 오염물질의 농도를 비교함으로써 중요 환경 관심지역을 지정하였고, 연안 환경평가 조사 계획을 수행하여 금속 및 석유탄화수소의 축적농도와 홍합의 성장지수간에 역상관계가 있음을 밝힌바 있다(심재형, 1991). 그러므로 패류는 그 지역의 수질오염상태를 대표할 수 있는 지표생물이 될 수 있는 것으로 보인다.

환경 오염과 지역의 산업적 특성과는 일본의 미나마타병이나 이따이이따이병, 미국의 러브캐널지역 등과 같은 경험을 통해 관련성이 있는 것으로 밝혀지고 있으며, 따라서 각국에서는 해역 및 수중 생물의 중금속 함량에 대한 기준을 설정하여 소식적인 삼시와 나각적인 조사를 행하고 있다.

국내 관련 학계나 연구소에서는 현재 중금속의 오염 정도에 대한 파악만이 아니라 중금속의 환경 생태계 내에서의 거동이나 존재형태, 독성 등에 대한 다수의 연구가 있다(조원시, 1984; 변종진, 1985; 이원식과 김두희, 1994).

특히 울산지역의 경우 강물 및 해수의 수질을 분석한 결과 납성분이 대양의 평균농도인 0.03ppb보다 평균적으로 1,000배정도 높은 것으로 보고(유광식과 류석환, 1985)되고 있으며, 울산항 및 장생포만의 생물화학적 산소요구량이 급속히 증가되는 등, 수질오염이 빠른 속도로 심화되고 있다고 보고된 바 있다(유광식 등, 1991). 따라서 본 연구에서는 공업단지인 울산연안 해수의 중금속 오염정도 및 특징을 각 공업단지별로 파악하고, 동일지점에서 해양생태계 내에서의 1차 소비자인 홍합 중의 중금속 함량을 측정하며, 이를 해수에서의 중금속 함량과 비교하여 농축계수를 산정해 보고자 하였다.

재료 및 방법

1. 재 료

울산 연안의 공업단지를 공단 조성과정, 계열공장의 집적과정 및 업종의 특성에 따라 구분하여 비철금속공업단지인 온산공단해역, 석유화학공업을 주로 하는 용연, 장생포 해역, 자동차 및 조선업을 주로 하는 미포공단해역으로 나누고, 대조지역으로는 지질이나 자연조건이 같고 공업

단지의 영향이 없는 정자리를 선정하였다.

계절적 영향이나 해수의 흐름에 따른 차이를 배제하고 시료의 통일성을 높이기 위해 채취는 동일한 날(1995년 4월 6일)에 하였다.

홍합은 각 공단인접 100m이내의 해역에서 수심 2~3m의 암초에 붙어 있는 자연산을 채취하고, 그 중 크기가 중간 정도인 7±1cm를 취하여 적당량 취하여 가식부를 믹서기에 균등히 간 다음 20g이 되도록 시료를 나누었고, 해수는 공단 해역별로 홍합이 서식하고 있는 곳에서 1000ml를 취하였다.

각 지역에서의 해수와 홍합의 시료수는 표 1과 같다.

표 1. 시료채취 지역 및 표본 수

지 역	표 본 수	
	해 수	홍 합
대 조 지 역 (정자리)	7	10
미 포 공 단 (미포, 염포)	7	10
온 산 공 단 (우봉, 당월, 이진)	6	10
석유화학공단 (용연, 장생포)	6	21
계	26	54

2. 분석 방법

1) 조사대상항목 : 납, 카드뮴, 구리, 아연, 망간, 수은 (6개 항목)

2) 시약 및 시액 : 미량 금속에 사용된 분석용 특급 시약으로서 다음과 같으며, 종류수는 3차 증류수로서 탈이온수를 사용하였다.

납, 카드뮴, 구리, 아연, 망간, 수은 측정용 시약 : 황산(Warck 특급) 및 질산(Warck 특급), 염산을 사용하였다.

3) 표준용액 : 각 미량금속의 원자흡광분석(Wakoure Chemical Industry, Ltd. 大板, Japan; Factor=1.0, 20℃ 각 1ml=100μg) 표준원액을 사용하여 수은은 0.001% L-cystein 용액으로, 납, 카드뮴, 구리, 아연, 망간은 6% 황산용액으로 희석하여 표준용액으로 하였다.

4) 수은 측정용 시약 : 첨가제로서 무수 탄산나트륨과 수산화칼슘을 1:1(W/W)로 혼합한 것과 무수 산화알루미늄을 800℃에서 2시간 가열 처리한 후 데시케이터에서 방냉하여 사용하였다.

5) 측정기구 : 수은(홍합); 수은분석기
납, 카드뮴, 구리, 아연, 망간;
원자흡광광도계

6) 실험방법

해수중 수은 : 환경청 고시(1991)에 따라 시료 200ml를 취하여 황산(1+1) 20ml와 질산 5ml 및 과망간산칼륨(5W/V%) 10ml를 넣어 흔들어서 섞고 약 15분간 색이 지속될 때까지 반복했다. 여기에 과황산칼륨용액(5W/V%) 10ml를 넣고 약 95℃ 수욕중에 2시간 가열하고 실온으로 하여 염산히드록실아민용액(10W/V%)을 넣어 과망간산칼륨을 분해한 다음 전량을 250ml로 하여 염화제일주석용액(수은 시험용) 10ml를 넣어 금속수은으로 환원시킨 후 원자흡광광도법에 따라 정량하였다.

해수중의 납, 카드뮴, 구리, 아연, 망간 : 시료 1000ml를 취하여 250ml로 가열 농축한 다음 pH 3으로 조절하고 분액여두에 옮겨 4% 암모늄 피롤리딘 디티오카바메이트용액 1ml를 넣고 메칠 이소부틸케톤(MIBK) 10ml를 넣어 30초간 흔들었다. MIBK층을 비커에 옮겨 80℃의 열판에서 날려 보내고 잔류물에 질산 5ml와 과염소산 2ml를 넣어 분해한 후 가열 농축하고 0.1N-염산용액 25ml에 녹여 원자흡광광도법으로 정량하였다.

홍합중의 수은 : 홍합의 가식 부위만을 취하여 스테인레스 믹서기에서 분쇄·혼합하여 수분의 변화가 없도록 플라스틱 용기에 밀봉한 다음 냉동실에서 보관하였으며, 각각의 수분의 무게를 정량하고 난 후 수은 분석은 50~100mg정도를 정밀하게 취하여 수은 분석기를 이용하여 분석하였다.

홍합중의 납, 카드뮴, 구리, 아연, 망간 : 시료 10g을 정밀하게 취하여 물 30ml, 농질산 25ml를 킬달플라스크에 넣고 하루 방치후 통풍실에서 가열하여 적갈색의 gas가 발생하지 않을 때까지 기열분해하고 식혔다. 여기에 농황산 5ml를 넣어 혼화하여 방치했다. 내용물이 암색이 되기 시작하면 농질산 2ml씩을 추가해서 가열을 계속하여 내용물이 미황색~무색이 되었을 때 분해를 그치고 식힌 다음 물로 일정량으로 하고 실험용액으로 하여 원자흡광도계로 정량하였다. 분석 사이 사이에 표준용액의 재현성을 측정하여 보정 계산하여 실제치로 하였다.

7) 홍합의 중금속 농축계수
김장량과 원종훈(1974), 박청길 등(1989), 박선열 등(1994)의 방법에 따라 「홍합중의 농도 ÷ 해수중의 농도」로 산출하였다.

8) 통계처리
해수와 홍합중의 중금속 함량이 각 공단 인근 해역별로 차이가 있는지를 보기 위해 통계처리하는 SPSS/PC*를 이용하여 ANOVA 검정을 하였다.

성 적

해수 및 홍합중의 납함량을 보면, 해수는 대조지역에서 0.3 ± 0.5 ppb였으며 미포공단 해역에서는 0.3 ± 0.6 ppb로 비슷한 수준이었으나, 석유화학공단 연안에서는 1.8 ± 2.4 ppb로 가장 높게 나타났고, 그 다음은 온산공단 해역으로 0.7 ± 1.2 ppb로 나타났다.

홍합중의 납함량은 대조지역에서 가장 낮은 0.424 ± 0.019 ppm이었으며 미포공단 해역과 온산공단 해역은 각각 0.688 ± 0.234 ppm, 0.688 ± 0.387 ppm으로 비슷하게 나타났고, 석유화학공단은 가장 높은 0.800 ± 0.418 ppm으로 나타났다.

해수와 홍합 모두에서 대조지역은 가장 낮게 나타났고, 석유화학공단 해역은 가장 높게 나타났다.

해수는 지역별로 유의한 차이가 없으나 홍합은 5% 수준에서 유의한 차이를 나타내었다 (표 2).

표 2. 지역별 해수 및 홍합중의 납 함량
(평균±표준편차)

지 역	해 수		홍 합	
	시료수	함 량 (ppb)	시료수	함 량 (ppm)
대조지역(정자리)	7	0.3 ± 0.5	10	0.424 ± 0.019
미포공단	7	0.3 ± 0.6	10	0.688 ± 0.234
온산공단	6	0.7 ± 1.2	10	0.688 ± 0.387
석유화학공단	6	1.8 ± 2.4	24	0.800 ± 0.418
ANOVA	N.S		p<0.05	

N.S. : Not significance

해수중의 카드뮴 함량은 대조지역이 0.04 ± 0.06 ppb로 가장 낮았고, 미포공단 연안이 가장 높은 1.3 ± 1.4 ppb, 다음이 온산공단 0.6 ± 0.7 ppb, 석유화학공단 0.2 ± 0.1 ppb의 순서로 나타났다.

홍합중의 카드뮴 함량은 대조지역 0.141 ± 0.016 ppm이고, 공단지역에서는 석유화학공단이 0.282 ± 0.070 ppm으로 가장 높았고, 다음이 미포공단 0.208 ± 0.022 ppm, 온산공단 0.198 ± 0.030 ppm으로 나타났다.

해수와 홍합 모두 지역적으로 유의한 차이가 있었다(각각, p<0.05, p<0.01)(표 3).

표 3. 지역별 해수 및 홍합중의 카드뮴 함량
(평균±표준편차)

지 역	해 수		홍 합	
	시료수	함 량 (ppb)	시료수	함 량 (ppm)
대조지역(정자리)	7	0.04 ± 0.06	10	0.141 ± 0.016
미포공단	7	1.3 ± 1.4	10	0.208 ± 0.022
온산공단	6	0.6 ± 0.7	10	0.198 ± 0.030
석유화학공단	6	0.2 ± 0.1	24	0.282 ± 0.070
ANOVA	p<0.05		p<0.01	

수은은 조사대상 전해역의 해수에서 검출되지 않았다. 홍합중의 수은함량을 보면 대조지역에서는 0.011 ± 0.001 ppm이었는데 반해 가장 높게 나타난 지역은 석유화학공단으로 0.025 ± 0.011 ppm이었고, 다음이 온산공단 0.020 ± 0.014 ppm, 다음은 미포공단 0.014 ± 0.006 ppm의 순서로 나타났다. 지역별로 유의한 차이를 나타내고 있다(p<0.01)(표 4).

대조지역의 해수중에서 구리는 검출되지 않았다. 그러나 공단해역에서는 미포공단이 가장 높은 0.5 ± 0.9 ppb로 검출되었고, 다음이 석유화학공단 0.2 ± 0.2 ppb, 온산공단 0.1 ± 0.2 ppb의 순이었다.

홍합중의 구리 농도를 보면, 대조지역이 1.286 ± 0.135 ppm으로 나타났고, 온산공단과 석유화학공단이 1.459 ± 0.485 와 1.408 ± 0.605 ppm으로 비슷한 수준으로 나타났고, 미포공단이 해수와 마찬가지로 2.132 ± 0.526 ppm으로 가장 높게 나타났다.

해수는 지역적으로 유의한 차이가 없으나 홍합은 지역적으로 유의한 차이를 보이고 있다 ($p < 0.01$) (표 5).

표 4. 지역별 해수 및 홍합중의 수은 함량
(평균 ± 표준편차)

지 역	해 수		홍 합	
	시료수	함 량 (ppb)	시료수	함 량 (ppm)
대조지역(정자리)	7	N.D.	10	0.011 ± 0.001
미포공단	7	N.D.	10	0.014 ± 0.006
온산공단	6	N.D.	10	0.020 ± 0.014
석유화학공단	6	N.D.	24	0.025 ± 0.011
ANOVA	$p < 0.01$			

N.D. : 불검출(not detected)

표 5. 지역별 해수 및 홍합중의 구리 함량
(평균 ± 표준편차)

지 역	해 수		홍 합	
	시료수	함 량 (ppb)	시료수	함 량 (ppm)
대조지역(정자리)	7	N.D.	10	1.286 ± 0.135
미포공단	7	0.5 ± 0.9	10	2.132 ± 0.526
온산공단	6	0.1 ± 0.2	10	1.459 ± 0.485
석유화학공단	6	0.2 ± 0.2	24	1.408 ± 0.605
ANOVA	N.S.		$p < 0.01$	

해수와 홍합의 망간함량은 대조지역에서 각각 1.1 ± 1.0 ppb와 1.824 ± 0.516 ppm으로 나타났는데, 온산공단 해역에서도 각각 1.4 ± 1.8 ppb와 1.751 ± 1.805 ppm으로 비슷한 농도로 검출되었다.

그러나 미포공단과 석유화학공단 해역은 비교적 높게 나타나고 있는데 미포공단은 해수와 홍합의 망간 함량이 각각 2.7 ± 2.1 ppb와 2.468 ± 1.808 ppm이었고, 석유화학공단 해역은 2.4 ± 1.5 ppb와 3.212 ± 2.445 ppm으로 나타났다.

해수와 홍합 모두 지역적으로 유의한 차이는 없었다(표 6).

표 6. 지역별 해수 및 홍합중의 망간 함량
(평균 ± 표준편차)

지 역	해 수		홍 합	
	시료수	함 량 (ppb)	시료수	함 량 (ppm)
대조지역(정자리)	7	1.1 ± 1.0	10	1.824 ± 0.516
미포공단	7	2.7 ± 2.1	10	2.468 ± 1.808
온산공단	6	1.4 ± 1.8	10	1.751 ± 1.805
석유화학공단	6	2.4 ± 1.5	24	3.212 ± 2.445
ANOVA	N.S.		N.S.	

해수 및 홍합중의 아연함량은 대조지역이 15.5 ± 12.5 ppb와 7.710 ± 3.952 ppm으로 나타났다. 공단연안에서는 온산공단 해역이 11.4 ± 18.2 ppb와 10.448 ± 2.120 ppm으로 가장 낮은 농도였고, 다음이 석유화학공단 해역으로 25.4 ± 19.5 ppb와 15.203 ± 3.744 ppm이었으며, 미포공단 해역은 이 보다 훨씬 높은 55.6 ± 69.4 ppb와 19.560 ± 9.979 ppm으로 나타나 아연함량이 해수와 홍합 모두에서 가장 높았다(표 7).

표 7. 지역별 해수 및 홍합중의 아연 함량
(평균 ± 표준편차)

지 역	해 수		홍 합	
	시료수	함 량 (ppb)	시료수	함 량 (ppm)
대조지역(정자리)	7	15.5 ± 12.5	10	7.710 ± 3.952
미포공단	7	55.6 ± 69.4	10	19.560 ± 9.979
온산공단	6	11.4 ± 18.2	10	10.448 ± 2.120
석유화학공단	6	25.4 ± 19.5	24	15.203 ± 3.744
ANOVA	N.S.		$p < 0.01$	

홍합의 중금속 농축계수를 보면 표 8과 같이 낮은 해수농도의 980배 ~ 2,290배(평균 1,070배) 정도로 홍합중에 농축되어 있었고, 가장 높은 농축정도를 보인 곳은 미포공단 해역으로 2,290배가 농축되어 있었다. 카드뮴은 160배 ~ 3,520배(평균 1,370배)로 농축되어 있었으며, 미포공단이 가장 낮은 농축도(160배)를 보였고, 대조지역

에서 가장 농축도가 높았다(3,520배).

수은은 조사대상 해역의 해수중에서 검출되지 않았으므로 원자흡광광도법에 의한 검출한계치(0.5ppb)의 반량을 적용하여 산정한 결과 40배~100배(평균 80배)로 나타났다.

구리는 1,710배~14,590배(평균 6,940배)로 높은 농축도를 보였으며, 가장 높은 곳은 온산공단으로 14,590배가 농축되어 있었다. 대조지역은 해수중에서 물검출되어 원자흡광광도법에 의한 검출한계치(1.5ppb)의 반량을 적용하여 산정한 결과 농축률 1,710배로 가장 낮게 나타났다.

망간은 910배~1,660배(평균 1,310배)가 농축되어 있었고, 대조지역에서 가장 높은 농축률을 나타내었다.

아연의 농축도는 350배~920배(평균 590배)로 나타났으며, 온산공단에서 가장 높은 농축률(920배)을 나타내고 있었다(표 8).

표 8. 총합의 중금속 생물농축계수

지역	농축률 (단위 : 10 ³)					
	납	카드뮴	수은	구리	망간	아연
대조지역	1.41	3.52	(0.04)	(1.71)	1.66	0.50
미포공단	2.29	0.16	(0.06)	4.26	0.91	0.35
온산공단	0.98	0.33	(0.08)	14.59	1.25	0.92
석유화학공단	0.44	1.41	(0.10)	7.04	1.34	0.60
계	1.07	1.37	(0.08)	6.94	1.30	0.59

()는 해수중에서 불검출되어 원자흡광광도법에 의한 검출 한계치(수은 0.5ppb, 구리 1.5ppb)의 반량을 적용하여 산정

고 찰

홍합은 길이 13~15cm, 높이 5~6cm정도인 홍합과의 연체동물이다. 배역 각정부근의 족사(足絲)로써 바위에 붙어 생활하며, 산란기는 3~6월 사이이고, 8월이면 3cm로, 2~3년이면 10cm 정도도 자란다. 자라면서 성선회를 하는 것으로 알려져 있으며, 조간대(潮間帶)로부터 수심 20m의 암초지대에 무리 지어 부착생활을 하며, 식용으로 많이 사용된다. 굴, 조개 등과 더불어 해양오염에 일차적으로 관련되는 이매패(二枚貝) 연체동물이며 여과식 섭식자로 해수를 여과하며 그 속에 있는 플랑크톤을 먹이로 취하며 이때 주변해수로부터 중금속이 빠르게 흡수된다.

해양생물중에서 십각류(十脚類)와 어류는 아연이나 구리와 같은 필수금속을 조절할 능력을 가지고 있으나 홍합과 같은 이매패(二枚貝) 연체류와 식물은 중금속 농도를 조절하는데 미숙하다(심재형, 1991).

또 해수중의 중금속은 어류보다 패류에 더 잘 농축된다(Brooks와 Rumsby, 1965)고 하였고, 해조류보다 패류에서 중금속 성분이 더 많이 검출된다(유광식 등, 1991)고 한 것에 비추어 보면, 해양오염의 영향을 가장 잘 반영하는 것이 패류라고 생각되는데, 본 연구에서는 홍합을 대상으로 울산연안의 중금속 오염정도를 알아보고자 하였다.

울산공업단지는 정부계획 주도형으로 건설된 임해 국가공업단지이며, 백악기에 형성된 지질로서 퇴적암이 주를 이루고 있다(환경처, 1993).

울산 해안의 공업단지를 공단조성 개발과정, 계열공장의 집적과정 및 업종의 특성에 따라 구분하면, 비철금속 공업을 주로 하는 온산공단과 자동차 및 조선업을 주로 하는 미포공단, 석유화학공업을 주로 하는 석유화학공단으로 나눌 수 있으며, 총 면적 68,087m²에 각각 27개, 151개, 18개 업체가 입주하여 있다(울산상공회의소, 1992).

본 연구에서는 이러한 분류에 따른 공업단지별로 인근 해역의 중금속 오염의 정도를 알아보고자 하여 연안 해수 및 홍합을 대상으로 조사했으며, 대조지역으로는 인근 정자리를 선정하였다.

패류중의 중금속 함량은 패류의 종류 및 계절과 성장도에 따라 다르고, 또 수온이나 염분, pH 등이 변수가 될 수 있으나 같은 지질과 자연조건하에서 단일 종류를 대상으로 했을 때는 성장도가 주요 변수가 될 것이다.

본 연구에서는 자연산 홍합중 평균크기 7cm 가량을 대상으로 하였으므로, 대상지역이 BOD나 COD가 비교적 높은 해역임을 감안할 때 성장기간은 1년반~2년 정도라고 추정되며, 그 기간동안의 중금속 축적을 볼 수 있다고 생각된다.

본 조사에서 대조지역인 정자리의 해수중 중금속 함량은 납 0.3±0.5ppb, 카드뮴 0.04±0.06ppb, 아연 15.5±12.5ppb, 망간 1.1±1.0ppb으로 이를 해수중 자연함량(Bryan, 1976)인 납 0.03

ppb, 카드뮴 0.05ppb, 수은 0.05ppb, 구리 2.0ppb, 카드뮴 0.05ppb, 아연 5.0ppb와 비교해 보면 수은과 구리, 카드뮴은 낮고, 아연과 납은 자연함량보다 높은 것으로 나타났다.

홍합 및 해수중의 납함량을 보면, 해수의 경우 모두 해수중 자연함량인 0.03ppb보다는 높지만 수산생물의 생육에 영향을 미치는 한계 농도인 10ppb(Bryan, 1976)이하로 나타났고, 우리나라의 해역별 수질기준치인 0.1ppm(환경처, 1993)에는 못 미치는 것으로 나타났다.

홍합은 각국의 어패류 납 규제치(네덜란드 2 ppm, 영국 10ppm 등)에는 못 미치고 있으나 대조지역보다 공단지역에서 납의 함량이 높게 나타나고 있었으며, 특히 석유화학공단 해역의 경우 해수와 홍합 모두 납 함량이 최고치인 것으로 나타났다.

납은 수산물을 매개로 인간에게 이행된다는 강력한 증거는 없다고 하였고(Conor, 1980) 또 납 오염은 공단주변이나 자동차 배기가스가 많은 도심이 높다(김종갑, 1992)고 한 것에 비추어 볼 때 납은 육상에서는 보저상 심각한 손상을 일으키에도 불구하고, 해수와 수산물 오염은 크게 문제시되지 않는다고 생각되나 장기적인 축적의 문세에 대해서는 더 연구해 보아야 할 것이다.

유광식 등(1991)은 울산연안 홍합 중의 납 함량이 흔적량이거나 검출되지 않았다고 보고했는데 본 조사에서는 공단주변 홍합 중의 납 함량이 0.688~0.800ppm인 것으로 나타났으며, 이로써 최근 1~2년간 납의 축적이 증가한 것으로 생각해 볼 수 있다. 납에서는 해수 중의 농도가 높은 지역일 수록 홍합중의 농도도 높아지는 것으로 나타나 석유화학공단 연안의 함량이 가장 높고, 다음이 온산공단, 미포공단 연안인 것으로 나타났다.

홍합은 패류중 납에 대해 가장 저항성이 높고, 또 납에 대한 제독기능을 가지고 있어서 소화선내에 과립상으로 대량을 저장하는 것으로 알려져 있고, 최고 3,000ppm까지 농축되었다고 보고된 바 있는데(심재형, 1991), 이러한 축적경향 때문에 홍합은 일정기간 마다 감시되어야 할 것으로 보인다. 본 조사 결과 홍합의 납 농축률은 440배~2,290배(평균 1,070배)로 나타났다.

해수중의 카드뮴 함량은 대조지역을 제외한

전 해역에서 해수중의 자연 함량인 0.05ppb를 초과하고 있었으며, 특히 수산생물의 생육에 영향을 미치는 한계농도인 0.2ppb(Bryan, 1976)를 초과하고 있었다.

석유화학공단 해역에서는 홍합 중의 카드뮴 함량이 가장 높게 나타나(0.282±0.070ppm) 해수중의 함량이 공단지역중 가장 낮은(0.2±0.1ppb)것과 차이를 보였는데, 이는 공단인근 해수중의 중금속 함량이 유동적인 것에 비해 홍합은 지속적으로 그간의 카드뮴 축적을 나타내기 때문인 것으로 생각된다.

미포공단 해역의 경우 해수중의 농도가 가장 높게 나타나고 있으므로(1.3±1.4ppb) 이런 추세가 지속된다면 앞으로 축적이 높아질 우려가 있는 것 같다.

카드뮴의 환경오염은 대단히 많으나 주 오염원은 구리, 니켈, 은의 합금공장, 축전지의 전극판 제조공장, 원자로의 제어봉, 안료 및 합성수지 제조공장 등의 산업폐수 등에 의한 것이므로 미포공단 연안의 해수중 농도가 최고치라는 것과, 석유화학공단의 홍합중 농도가 최고치라는 것은 그 지역에 이러한 오염원의 폐수배출이 클 가능성을 시사해 주는 것으로 보인다.

미국은 잠갈의 카드뮴 잠정 위험 한계치를 3.5ppm으로 정하고 있고, 식품에 있어 카드뮴의 함량이 13ppm이상일 때는 공중보건상 해롭다고 했는데(권우창 등, 1989) 본 연구에서의 홍합중 검출 결과는 그에 못 미치고 있다. 그러나 카드뮴은 유해 중금속중 수은과 함께 독성이 가장 높다고 하며(Conor, 1980), 특히 패류는 체내에 특이적으로 카드뮴을 농축하는 기구가 있다(백덕우 등, 1985)고 하였고, 국내의 조사 결과도 카드뮴과 구리가 패류에서 높게 나타났다(원종훈, 1973)고 보고된 바 있으며, 사람의 카드뮴 1일 안전 섭취량은 0.3mg이하라고 한 것에 기초하여 우리나라 사람의 식생활을 고려했을 때 원종훈(1973)은 우리나라 해산물의 잠정적 안전 농도 한계를 0.4ppm이라고 하였는데, 본 조사결과는 이 농도보다 낮게 나타났다.

그러나 공단지역에서의 카드뮴 함량이 해양오염으로 인한 것일 가능성이 있고, 연체동물의 카드뮴 축적능력이 높으며, 인체내에서의 잔류기간이 길다(16~33년)는 점(심재형, 1991)을 고려해 볼 때 앞으로의 축적 가능성 및 이로 인한

진강상의 징애유발 가능성은 경시될 수 없다고 보인다.

울산연안 해역의 카드뮴 농도에 관한 기존 조사를 보면, 홍합 및 전복시료에서 0.2~4.1ppm에 이르는 농도가 검출되었다고 했고, 석유화학공단 인근해역에서 채취된 시료가 기타 지역보다 더 높은 농도를 나타내고 있다(유광식 등, 1991)고 함으로써 본 조사 결과와 일치하였다.

그러나 홍합중의 함량은 본 조사 결과 석유화학공단 해역에서 0.28 ± 0.07 ppm으로 나타나 유광식 등(1991)의 0.8 ± 4.1 ppm보다는 함량이 낮은 것으로 나타났다.

한편 홍합의 카드뮴 농축계수를 보면, 울산연안 평균이 1,370배로 최고 3,520배까지 나타나고 있었는데, 카드뮴 농도가 0.05ppb인 해수에서 채집한 식물성 플랑크톤의 평균 카드뮴 농도가 2.3~4.4ppm으로 농축계수 46,000~88,000으로 나타났다는 보고(심재형, 1991)와 비교해 보면, 용합의 카드뮴 농축률이 식물성 플랑크톤보다 낮은 것으로 생각할 수 있으나 확정하기 위해서는 더 연구해 보아야 할 것이다.

수은은 전해수에서 검출되지 않아 우리나라의 해역별 수질기준치인 불검출되어야 한다는 규정을 만족시켰다. 총합의 경우 수은 함량은 석유화학공단 해역(0.025 ± 0.011 ppm)이 가장 높았고, 다음이 온산공단(0.020 ± 0.014 ppm), 미포공단(0.014 ± 0.006 ppm)의 순서로 나타났다.

수은의 축적으로 발생되었던 미나마타병의 임상적 증상은 이미 여러 학자들에 의해 규명된 것처럼 심한 중추신경계통의 장애를 일으키므로(WHO, 1976) 어패류의 수은허용 한계를 미국은 0.5ppm, 일본 및 구주(歐州)는 1.0ppm으로 규정(백재홍 등, 1991)하고 있으나 본 조사지역의 홍합에서는 모두 이 한계치 이하인 것으로 나타났다.

온산연안의 경우 수은 오염을 중시한 많은 연구들이 있으며(조현서, 1984; 변종진, 1985; 이필용 등, 1990), 박철길 등(1989)의 자료에 의하면 한국원자력연구소에서 1978년 조사된 해수중 수은 농도가 0.05ppb였고, 수산대학 연구팀에 의해 조사된 것은 1981년 10월~1982년 3월에 평균 0.20ppb, 1993년 12월에는 0.23ppb로 보고된 바 있다. 또 변종진(1985)은 대조시(大潮時) 평균 0.06ppb, 소조시(小潮時) 평균 0.25ppb라고 하여

점차 증가하고 있는 추세를 보였다.

이를 타 해역과 비교해 보면, 광희상과 이중화(1975)는 동계 진해, 마산 해역에서 평균 0.13ppb, 원종훈(1973)은 울산해역 평균을 0.03ppb라고 보고하였다. 또 Lee(1981)는 우리나라 4개 공업단지인 반월, 울산, 창원, 여천 인근해역에서는 평균 0.02ppb라고 보고하였다.

이러한 결과로 보아 1980년대에는 온산해역의 수은오염이 국내 타 해역과 비교해도 높은 상태였으나 1990년대에 들어 환경감시나 감독의 강화 및 각 공장의 자체적 노력 등으로 인해 온산해역의 수은 오염은 비교적 감소하고 있는 추세라고 하겠다.

수은은 대형이면서 연령이 오래된 어류에서 함량이 높은 것으로 알려져 있는데, 이들 어류중 수은의 90%이상이 메틸수은이며, 대부분 1ppm이상의 수은농도를 갖고 있어 사람이 소비하기에 부적당하다고 알려져 있으나, 홍합과 같은 이배패류(二枚貝類)도 해수 중의 수은을 빠르게 흡수하므로(심재형, 1991) 수은에 대한 지속적인 감시가 필요할 것이라고 보인다.

홍합의 수은 농축계수는 울산연안해역 평균 80배로, 중금속 중 가장 낮은 농축률을 보였다.

구리의 경우, 유광식 등(1991)은 홍합중 함량이 석유화학공단 해역에서 가장 높아 4.9~17.9ppm까지 나타났다고 보고한 바 있는데, 본 연구에서는 미포공단 해역에서 최고치(2.132 ± 0.526 ppm)를 나타냈다.

그러나 수중생물에 대한 구리의 독성영향은 총 농도의 구리에 기인하는 것이 아니라 자유상태의 구리농도에 관계된다(Shaw와 Brown, 1974)고 하였으므로, 생물에 대한 독성여부를 알아보기 위해서는 구리의 존재형을 밝히는 연구가 더 필요할 것이라고 보인다.

구리의 경우 온산공단과 석유화학공단은 해수와 홍합 모두 비슷한 수준으로 나타났고, 미포공단 해역이 해수와 홍합에서 모두 최고치를 나타내고 있었다.

구리는 일반적으로 먹이연쇄상에서 축적되지는 않으나, 오염수에서 성장하는 홍합의 경우 구리 축적이 해수농도의 7,500배까지 달하는 것으로 알려지고 있는데(심재형, 1991), 본 조사에서는 최고 14,590배까지 농축되어 있었으며, 이로써 홍합은 구리를 가장 잘 농축하는 것으로

생각할 수 있었다.

망간은 모든 해역에서 해수중 자연 함량인 2.0ppb(WHO, 1980)와 비슷한 수준으로 나타났으며, 본 연구에서는 해수 및 홍합의 함량이 지역적으로 유의한 차이가 없었고 비교적 고른 농도 분포를 보이고 있었다.

망간은 중금속중 철을 제외하고는 가장 풍부한 금속으로서 식품을 통한 중독증상은 거의 없다(WHO, 1980)고 하였고 식품을 통해 문제가 될 수 있는 경우는 연체류의 가식부에서의 농축이 최고 1,200배까지 일어날 수 있다는 것으로 미루어 본 연구에서의 검출량으로서는 인체에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 여겨진다.

홍합의 망간 농축계수를 보면 지역적으로 유의한 차이는 없었고, 울산연안 평균 1,300배 정도 농축되어 있는 것으로 나타났다.

해수중 아연의 함량은 미포공단 연안이 가장 높게(55.6 ± 69.4 ppb) 나타나 해수중 자연함량인 5.0ppb를 10배 이상 초과하였고, 수산생물이 생육에 피해를 주는 한계농도인 20.0ppb(Bryan, 1976)를 3배 가량 초과하였다.

홍합에서도 미포공단해역은 대조지역보다 2.6배 가량 높게 나타나고 있다.

아연은 구리의 독성을 경감시키는 것으로 알려져 있으며, 건강장애는 거의 없다는 보고(Environment Protection Agency, 1978)도 있으나, 아연은 카드뮴과 함께 반삼기가 긴 원소로 위생학적 의의가 크다(조규홍 등, 1987)고도 알려져 있다.

또 아연은 생체내에 농축이 잘되는 원소로서 어류시험에서 카드뮴, 아연, 납, 망간, 수은, 크롬 등의 6개 원소중 아연이 타 원소에 비해 10배 정도 높게 농축되었다(이홍재 등, 1987)는 것과 비교해 볼 때 본 조사에서의 결과도 이와 일치되는 것으로 나타났다.

홍합의 아연 농축률은 온산공단이 920배로 가장 높았고, 울산연안 평균 500배로 나타났다.

이상 본 조사의 결과를 보면, 카드뮴, 구리, 망간, 아연의 해수중 함량은 미포공단 인근해역이 가장 높게 나타났고, 납의 해수중 함량은 석유화학공단 인근해역이 가장 높게 나타났다.

해수중의 농도는 홍합중의 농도에 밀접한 영향을 미쳐, 납, 구리, 아연은 해수중의 농도가 높은 지역에서 홍합중의 농도도 높게 나타나고 있

었다. 그러나 카드뮴의 경우 해수중의 농도는 미포공단해역이 가장 높는데 반해 홍합중의 농도는 석유화학공단이 가장 높게 나타나, 해수중의 농도가 높다고 하여 반드시 홍합중의 농도도 높은 값으로 나타나는 것은 아님을 볼 수 있는데 이는 공단연안의 해수중의 중금속 농도가 공단의 폐수배출 등과 관련하여 매우 유동적이며 홍합은 그간의 중금속 축적을 반영하기 때문인 것으로 생각된다.

한편 패류의 중금속 농축계수는 오염물질의 위해 평가와 환경중 거동관계를 밝히는 중요한 지수라고 볼 수 있는데(김장량과 원종훈, 1974; 조현서, 1984; 변종진, 1985; 박선열 등, 1994), 수산 동식물에 의한 중금속 농축에 관해, 연안 오염의 지표로서 어패류와 플랑크톤에 관해서는 비교적 많은 연구(Williams, 1973; Topping, 1973)가 있고 국내에서도 해조류나 패류에 관한 일부 연구가 있다(원종훈, 1973; 조현서, 1984). 수산생물이 중금속 농축율은 배경 환경수의 성분농도에 따라 달라진다고 하므로(박청길 등, 1989) 이의 연구는 수조 배양하에서 하는 것이 편리하겠지만, 어떤 면에서는 그것이 오히려 부자연스런 상태이고 자연상태에서의 농축률과 다를 가능성이 있다(원종훈, 1973)

따라서 일정지점을 선정하여 그 지점에서의 환경해수와 해조류의 중금속 농도를 측정하므로써 농축계수를 측정할 연구들이 있다(원종훈, 1973; 박청길 등, 1989; 조현서, 1984).

본 연구에서는 울산연안 해역에서의 홍합의 중금속 농축계수를 산정함으로써 홍합의 중금속 농축정도를 파악하고자 했는데 공단지역의 경우 해수중의 중금속농도가 유동적이고 변동의 폭이 크기 때문에 이로부터 산정한 농축계수는 중금속의 흡수나 대사 및 배설과 관련한 생물학적 특성 외에도 해수의 장기간에 걸친 오염에 의한 홍합의 중금속 농축 정도를 나타내는 것이다.

울산연안에서 나타난 홍합의 중금속 농축계수를 보면, 납, 카드뮴, 망간은 비슷하게 나타났고(각각, 1,070, 1,370, 1,300), 수은이 가장 낮았으며(80), 구리는 가장 높게(6,940) 농축되어 있었다.

홍합은 연안부근에 부착생활을 하며, 우리나라의 전 해역에 고르게 분포하고, 광범위하게 양식되며 식용으로도 많이 사용되고 있으므로

위생학적 의의가 크고, 중금속의 축적능력이 강하므로 연안오염의 정도를 파악하는데 있어 살아 있는 감시자의 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

특히 공단연안 해역의 경우 해수의 오염정도는 폐기물의 유입 등에 따라 유동성이 크기 때문에 부착생활을 하는 패류를 지표종으로 설정하여 오염이 우려되는 지점마다 감시망을 설치, 오염의 동태를 파악하는 것이 타당할 것이다.

그러나 패류 각 종류마다 중금속의 흡수와 배설, 각종 공존원소간의 상호간섭 등 여러 요인이 관련하고 있고, 오염물질에 대한 해양생물의 반응단계도 생화학적, 세포학적 단계에서부터 군집단계까지 다양하므로, 이에 대한 연구를 진행하여 지표종을 설정하는 것이 필요할 것이라고 보인다.

요 약

울산 연안의 공업단지를 비철금속 공업을 주도 하는 온산공단과 자동차 및 소선업을 주도 하는 미포공단, 석유화학 공업을 주도 하는 석유화학공단으로 나누어, 이러한 공업단지별로 해수 및 홍합중의 중금속 함량을 측정하고 이에 따른 홍합의 각 중금속 생물농축계수를 산정해 보았다.

시료는 1995년 4월 6일에 채취하였고, 분석방법은 원자흡광도법에 따랐다.

해수중의 납 함량은 석유화학공단 해역($1.8 \pm 2.4\text{ppb}$)이 가장 높았고, 홍합중의 납 함량도 석유화학공단 해역($0.800 \pm 0.418\text{ppm}$)이 가장 높았다.

해수중의 카드뮴 함량은 미포공단해역($1.3 \pm 1.4\text{ppb}$)이 가장 높았고, 홍합중의 카드뮴 함량은 석유화학공단 해역($0.282 \pm 0.07\text{ppm}$)이 가장 높았다.

해수중의 수은은 전 해역에서 검출되지 않았고, 홍합중의 수은은 석유화학공단 해역($0.025 \pm 0.011\text{ppm}$)이 가장 높았다.

해수중의 구리 함량은 미포공단 해역이 가장 높았고($0.5 \pm 0.9\text{ppb}$), 홍합도 미포공단 해역($2.132 \pm 0.526\text{ppm}$)이 가장 높았다.

해수중의 망간 함량은 미포공단과 석유화학공

단 해역이 비슷한 수준으로 나타났고($2.7 \pm 2.1\text{ppb}$, $2.4 \pm 1.5\text{ppb}$), 홍합에서는 석유화학공단 해역이 가장 높게 나타났다($3.212 \pm 2.445\text{ppm}$).

아연함량은 해수와 홍합 모두 미포공단 해역에서 가장 높게($55.6 \pm 69.4\text{ppb}$, $19.560 \pm 9.979\text{ppm}$) 나타났다.

울산연안 해역에 서식하는 홍합의 중금속 농축계수는 납, 카드뮴, 망간의 경우 평균 1,070배, 1,370배, 1,300배로 비슷하게 나타났고, 수은이 가장 낮은 80배, 구리는 6,940배로 가장 높은 농축률을 보였다.

울산연안 해수의 중금속 농도는 인근 공단별로 차이를 나타내고 있었으며, 카드뮴, 구리, 망간, 아연은 미포공단이 가장 높았고, 납은 석유화학공단 해역이 가장 높았다.

납, 구리, 아연의 경우 해수중의 농도가 높은 지역에서는 홍합중의 농도도 높게 나타났다. 그러나 카드뮴의 경우 해수중의 농도는 미포공단에서 가장 높았으나 홍합중의 농도는 석유화학공단에서 가장 높게 나타나 차이를 보였다.

이상의 결과로 볼 때, 연안 오염의 동태를 파악하기 위해서는 해수보다는 홍합과 같은 부착패류를 지표종으로 설정하는 것이 타당한 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- 곽희상, 이종화. 동계 진해, 마산 해역의 중금속. *J Ocean Soc Korea* 1975; 10(1): 7-16
- 권우창, 원경품, 김준환, 김오한, 소유섭, 김영주, 박건상, 성덕화, 이경진, 이만술. 식품중의 미량금속에 관한 조사 연구(연안 어패류중의 중금속 함량에 관하여). 국립보건원보 1989; 26: 447-460
- 김돈균, 김준연. 낙동강 하류 패류의 중금속 오염실태에 관한 조사 연구. 부산대학교 환경문제연구소, 환경연구보 1987; 5: 1-21
- 김장량, 원종훈. 수영만 양식 미역, 모자반 및 환경해수의 수은, 카드뮴, 납, 구리의 농도에 대하여. 한국수산학회지 1974; 7(3): 169-178
- 김종갑. 온산공단 수변의 대기 오염이 삼림식생에 미치는 영향. 박사학위논문, 경상대학교 대학원. 1992

- 박선열, 민경지, 강희양. *Carassins auratus*(gold fish)를 이용한 BPMC와 Carbanyl의 생물 농축계수의 측정. 한국위생학회지 1994; 20(1): 75-82
- 박청길, 변종진, 유선재. 온산연안 해역의 수은 오염에 관한 연구. 韓水誌 1989; 22(5): 233-240
- 백덕우, 권우창, 신광훈, 김준환, 김오한, 소유섭, 박진상, 안장수. 어류중의 미량금속 분포에 관한 조사 연구. 국립보건원보 1985; 22: 471-494
- 백덕우. 식품중의 미량금속에 관한 조사 연구(연안 어류중의 중금속 함유량에 관하여). 국립보건원보 1987; 24: 733-746
- 백재홍, 허남철, 최경철, 김영국, 오금순, 송병준, 이성자, 박상수. 서해(목포) 연안에서 서식하는 어패류중의 중금속 함량에 관한 연구. 국립환경연구원보 1991; 13: 33-42
- 변종진. 온산 연안 채역의 수은 오염에 관한 연구. 석사학위논문, 수산대학교 대학원, 1985
- 심재형. 해양오염과 생태계. 민음사, 서울, 1991, 쪽 250-300
- 울산상공회의소. 울산지역 공업단지 현황. 1992
- 울산상공회의소. 울산경제 현황 1994
- 원종훈. 한국산 어패류중의 수은, 카드뮴, 납, 구리의 함량. Bull Kor Fish Soc 1973; 6: 1-19
- 유광식, 류석환, 김병삼. 울산인근해역의 어패류 및 해조류에 포함된 중금속 농도에 관한 조사 연구. 울산대학교 자연과학 연구논문집 1991; 1(2): 23-29, 1991
- 유광식, 류석환. 태화강 및 울산연해역의 수질오염도 조사 연구(III). UOU Report 1985; 16(2): 27-332
- 이원식, 김두희. 어패류와 그 제품 섭취양상에 따른 두발중 총수은 및 유기수은 함량. 예방의학회지 1994; 27(1): 44-58
- 이필용, 박중수, 윤금영. 온산만의 중금속 오염에 관한 연구. 단행본, 국립수산진흥원, 1990
- 이흥재, 박종걸, 김민호, 이창희. 연안서식 어패류 및 해저 퇴적물중의 유해 중금속 함량에 관하여. 국립환경연구원보 1987; 9: 167-182
- 조규홍, 용금찬, 김경태, 임준태, 박광희. 패류중의 미량금속에 관한 조사 연구. 국립환경연구원보 1987; 9: 67-77
- 조현서. 온산연안 해역의 중금속 오염에 관한 연구. 석사학위논문, 부산대학교 대학원, 1984, 쪽 1-42
- 환경처. 한국환경연감. 제 6 권, 1993
- 환경청. 환경오염공정시험법. 환경청 고시 제 91-85호, 1991
- Brooks RR, Rumsby MG. The biochemistry of trace element uptake by some New-Zealand bivalves. Limnol Oceanogr 1965; 10: 521-527
- Bryan GW. Heavy metal contamination in the sea. New York, Academic Press, 1976, pp. 185-302
- Conor R. Metal contamination of food. London, Applied Science Publishers, 1980, pp. 112-116
- Environment Protection Agency. Quality criteria for waters. Washington DC, 1978, p. 20
- Lee Kwang Woo. Water quality monitoring in the coastal areas of Ranweol, Ulsan, Changwon, and Yecheon. Korea Ocean Research and Development Institute, BSPI-00023-46-4, Seoul Korea, 1981
- Shaw TL, Brown VM. The toxicity of some forms of copper to rainbow trout. Water Res 1974; 8: 377-382
- Topping G. Heavy metals in fish from Scottish waters. Aquaculture 1973; 1: 373-377
- WHO. Environmental health criteria 17; Manganese, Geneva, 1980
- WHO. Environmental health criteria 1; Mercury. World Health Organization, Geneva, 1976, p. 132
- Williams PM, Weiss IIV. Mercury in the marine environment. J Fish Res Board Can 1973; 30: 293-295