Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

한국물환경학회지, 논문
18권 4호, pp. 341-354, 2002

새만금지역 갯벌 환경(패류, 저질)에서의 중금속 분포특성

Heavy Metals in Sediments and Burrowing Bivalves (*Sinonovacula constricta* Lamarck) from Tidal Flats along the Saemankeum Area, Korea

황갑수, 신형선*, 김강주, 여성구, 박성민, 임규재

Gab-Soo Hwang, Hyung-Seon Shin, Kangjoo Kim*, Sung-Koo Yeo, Seongmin Park, Kyujae Lim

군산대학교 토목환경공학부, *한국표준과학연구원 기초과학지원연구소

School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University
*Division of Analysis and Measurement, Korea Basic Science Institute

Abstract

Heavy metal concentration/distribution in sediments and bivalves from the tidal flats in Saemankeum coastal area, western Korea, were investigated. Among 6 sampling sites, S2, S5 and S6 showed the higher levels of Zn, Cr, Ni, Cu and Cd contamination and S1 did the higher level of Pb contamination than other sites, while S-4 showed the lowest levels of these metal contamination. Overally, the levels of Zn, Cu and Pb concentrations in *Sinonovacula constricta* were estimated to be relatively high. The shell lengths of the collected mussels were linearly related to their dry weights of the whole soft parts, but the mussels collected from S3 were in a poor nutrition, resulting in the distinctively high levels of metal concentrations in the body. It was shown that ,in *S. constricta* , Cr, Ni, Cu and Zn are distributed equally into the whole soft parts or a little more into the flesh, after absorption, while Fe, Cd, Pb and Mn are transferred more into the non-flesh parts than into the flesh parts. In *S. constricta*, the heavy metal concentrations in the flesh increase with those in the whole soft parts. The bioaccumulation factors(heavy metal concentration in *S. constricta*/heavy metal concentration in sediment) showed that, of the examined metals, Cd is the most cumulative in the body of *S. constricta*, followed by Zn and Cu, while Mn, Cr, Ni and Pb are not cumulative.

Keywords : Heavy metal, Distribution, Sediments, Bivalves, *Sinonovacula constricta*, Tidal flats, Bioaccumulation

1. 서 론

각종 오염물질들에 의한 수계오염의 평가에 있어 현장 오염수준의 파악과 함께 오염물질의 축적성과 생체독성에 대한 구체적인 정보를 얻을 수 있다는 장점들로 인해 근래 다양한 지표생물들을 이용하여 오염평가를 수행하는 생물모니터링에 대한 관심[1-4]이 집중하여 왔다.

패류는 고착성(sessile)이며 비교적 긴 수명기간을 가지고 오염물질을 체내에 축적하므로 중금속 등을 비롯한 오염물질들에 대해 서식지역의 오염

Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

실태와 특성등을 파악할 수 있는 유용한 지표생물로 인식되어 왔으며 이를 반영하여 Goldberg의 제안[5]이래 패류를 공통적인 지표생물로 활용하여 효율적인 연안오염감시를 도모하고자 mussel project가 전세계적인 공동노력하에서 진행되어 왔다. 그러나 이에 주로 사용되어진 *Mytilus. edulis*등은 주로 연안바위등에 부착하여 생활하는 패류종으로서 갯벌등과 같은 특수환경에서의 오염감시를 위해서는 보다 효율적으로 현장상황을 반영할수 있는 지표생물종의 개발에 대한 필요성이 제기된다. 가리맛조개(*Sinonovacula constricta* Lamarck)는 가리맛조개과(Novaculinidae)에 속하는 식용패류로서 우리나라의 서해안에 분포하고 내만의 진흙과 모래가 섞인 곳에 깊숙이(30-60㎝) 박혀살며 이러한 서식환경과 체장크기(성체의 각장 : 8-9㎝)의 편이성등을 고려할때 특히 갯벌환경의 오염에 대한 유용한 지표생물이 될 수 있을 것으로 판단된다.

한편 패류를 지표생물로 이용시 보다 정확한 오염평가의 수행을 위해서는 개체의 크기, 성별, 계절에 따른 생리학적 차이등의 생물학적 인자들과 관련된 오염물질의 체내 대사 및 거동에 대한 명확한 이해가 선행되어야 한다는 점이 지적[6-7]되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 저질과 가리맛조개내 중금속 오염수준을 파악하여 조사지역에서의 오염평가를 수행함과 아울러 갯벌 서식환경에서의 가리맛조개 생체내의 중금속 거동을 보다 명확히 함으로서 가리맛조개를 갯벌 환경에 있어 중금속 오염의 지표생물로 활용하기 위한 실제적 유용성에 기여하고자 하였다.

새만금 종합개발사업은 세계에서 가장 긴 33km의 방조제로 바다를 막아 1억 2천만평의 땅을 일구는 대규모 간척사업으로 사업시행으로 인한 연안 생태계의 파괴와 6천만평에 이르는 갯벌의 소실에 대한 큰 우려속에 근래 사업시행의 지속에 대한 뜨거운 찬반논란이 전개되어 왔음은 주지의 사실이다. 이와 관련하여 본 연구에서의 결과가 새만금 지역의 중금속 오염에 대한 유용한 감시 및 비교 평가자료로서 제공되어 해당지역의 환경보전에 작은 보탬이 될 수 있기를 기대하며 아울러 인기있는 기호식품으로서 공급되고 있는 가리맛조개내의 중금속 오염수준에 대한 본 연구결과를 통하여 국민보건 향상에도 기여하고자 하였다.

2. 시료채취 및 실험방법

저질시료와 가리맛조개의 채취는 1999년 6월에서 11월사이에 군산에서 줄포에 이르는 서해 새만금 지구내의 6개 갯벌지역(Fig. 1)에서 수행하였다. 시료채취 지점들은 새만금 간척사업 시행계획상에서 S1지점은 북측 방조제 바로 외측, S2, S3 및 S4지점들은 직접 사업계획 내부지역, 그리고 S5, S6지점들은 남측 방조제의 하부 외측에 각각 위치하여 향후 간척사업의 수행으로 인한 많은 물리화학적, 생태학적 영향이 예상된다.

가리맛조개는 간조시에 직접 채취하여 플라스틱 bag에 넣어 운반하고 분석전까지 냉동보존하였다. 채취한 가리맛조개들의 껍질을 제거하고 tap water와 증류수로 수회 반복 세척하여 외부 및 내장부의 이물들을 가급적 깨끗이 제거한 후 105-110℃하에서 12시간동안 건조하고 개체별 건조무게를 칭량하였다. 이중 체장 6-8㎝범위(S-2지점 : 6.5-8㎝, 그 외지점들 : 7-7.5㎝)의 개체들을 선별하여 중금속 분석용 시료로 하였으며 지점별로 육질부 시험용, 총 soft parts시험용에 대해 각각 6-10마리씩의 시료를 배정하였다. 해당시료들을 석영제 도가니에 취하고 Miramand등[8]의 방법을 참고로 하여 분석시료들을 제조하였다. 이를 요약하면 sand bath위에서 시료에 진한 HNO_3 5㎖를 가하여 증발시킨 다음 진한 HNO_3와 진한 $HClO_4$의 3:1 혼합용액 9㎖로 digestion시켜 시료가 백색으로 되어 내용물이 시럽상태로 될 때까지 가열, 농축하였다. 농축된 시료를 냉각시키고 0.3N HNO_3를 가하여 30ml로 정용하고 여과시킨 후 분석시료로 사용하였다. 가리맛조개의 각 개체시료에 대하여 Mn, Fe, Zn, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb등이 분석되어졌다. 저질시료는 각 지점별로 가리맛조개를 채취한 해당 장소들의 20-25㎝정도 깊이에서 적당량의 시료를 채취하여 플라스틱 bag에 넣어 운반하고 통풍이 잘 되는 청결한 곳에서 지점별로 잘 혼합한 다음 충분히 건조시킨 후 시료로 사용하였다. 하구갯벌인 S2지점 및 S3지점의 경우에는 해당 채취지점의 갯벌 규모가 큰 점을 고려하여 각 지점별로 수개의 구획으로 나누어 구획별로 저질시료들을 채취하였다. 건조시료 1g을 칭량하여 석영제 도가니에 취하고 진한 HCl, 진한 HNO_3, 진한 $HClO_4$을 사용하여 순차적으로 digestion한 다음 분석에 사용되어졌다. 한 채취시료당 3개의

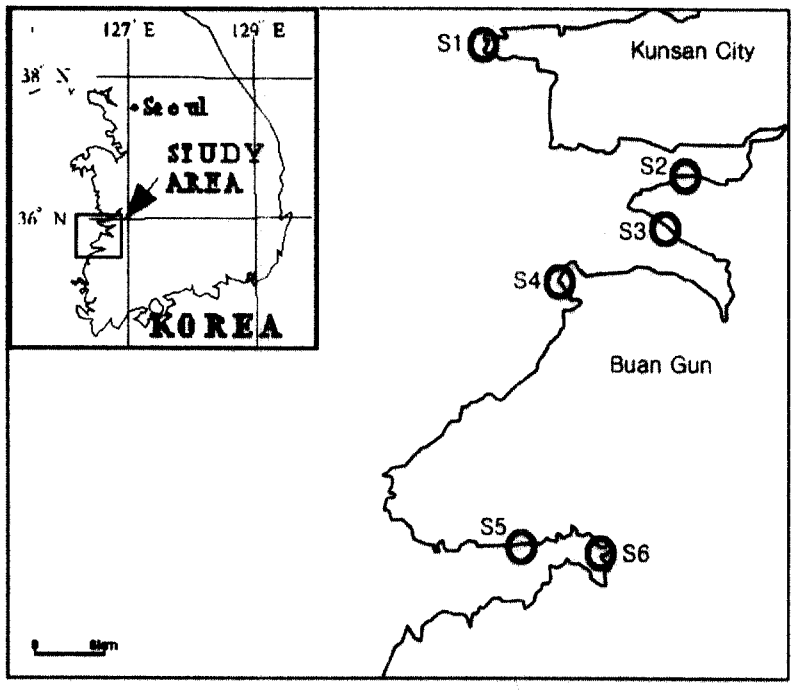

Fig. 1. Map showing sampling sites(S1:Osikdo, S2:Mankyeong estuary, S3:Dongjin estuary, S4:Kyewhado, S5:Komso, S6:Julpo).

저질 분석시료들이 준비되어졌으며 Mn, Zn, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb등이 분석되어졌다. 본 연구에서의 모든 중금속 분석은 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer : Model PQ3, VG Elemental CO., UK)에 의해 수행되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 S. *constricta*체내 및 저질 중금속 함량

새만금 연안 6개 조사지점들에서 채취한 가리맛 조개의 육질부 및 총 soft parts내 중금속 농도를 조사한 결과는 Table 1과 같으며 이하의 농도단위는 별도의 언급이 없는 한 dry weight basis로 표기하였다. 조사지점들중 S3지점에서 다른 지점들에 비해 Pb를 제외한 모든 중금속들의 가리맛 조개 체내 농도가 현저히 높은 수준을 보였는데 이는 S3지점에서 채취된 시료들의 발육상태가 다른 지점들의 동일체장 시료들에 비해 크게 떨어지는데 기인되는 결과로서 조사지점에 따른 영양수준의 차이가 패류를 이용한 중금속 오염의 비교평가 및 식품으로서 위해성 문제에 중요한 인자로서 반영될 수 있음을 제시하였다. 이러한 영양수준의 차이에 관련된 내용에 대해서는 다음의 3.1항에서 다시 언급하고자 한다. Pb의 경우는 S3지점의 시료들과 다른 지점 시료들간의 체내농도 수준에 있어 다른 중금속들의 경우에서와 같은 큰 차이는 보여지지 않았는데 이에 대해서는 Pb의 흡수 및 체내 대사특성과 연관하여 앞으로의 연구노력이 필요할 것으로 생각된다.

한편 조사지점들에서 채취한 저질시료중의 중금속 함량에 대한 결과는 Fig. 2와 같다.

1) Mn

Mn은 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 9.28-30.46mg/kg, 13.89-48.97mg/kg의 범위로서 S2지점에서 가장 높은 수준을 보였고 S4지점에서 가장 낮은 수준을 나타내었다. 본 연구에서의 이와 같은 조사결과는 이[9]등이 한국 동남해연안 진주담치(*M. edulis*)내 연질부의 Mn함량이 조사지점에 따라 5.5-35.1mg/kg 수준인 것으로 보고한 것과 비교할 때 전반적으로 다소 높은 수준으로 평

Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

가되며 Bryan등[10]이 오염지역에서 채취한 *Scrobicularia plana*의 총 soft parts내 Mn 평균농도인 57-86mg/kg에 비해서는 S3지점을 제외한 모든 조사지점들에 있어 그보다 낮은 수준이었다.

6개 조사지점들에서의 저질내 Mn농도는 116.7-397.0mg/kg의 범위로서 유등[11]이 만경강 및 금강하구지역 저질시료들에 대해 보고한 Mn 평균농도 범위인 210.35-259.12mg/kg과 비교하여 상부의 S1, S2지점들에서 높은 수준, S4지점에서 낮은 수준으로 나타났고 나머지 지점들에서는 동일한 수준으로 나타났다. 가리맛조개와 저질과의 비교시 S3지점을 제외한 조사지점들에서의 가리맛조개내 Mn농도 결과에는 S1지점에서의 가리맛조개내 Mn농도수준이 S2지점에 비해 낮은 수준으로 나타난 점을 제외하면 저질내 Mn농도의 비교수준이 대체적으로 잘 반영된 것으로 평가된다.

2) Fe

Fe는 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 151-251mg/kg, 396-518mg/kg의 범위로서 이등[9]이 보고한 한국 동남해연안 진주담치의 조사지점에 따른 soft tissue내 평균 Fe함량인 100-790 mg/kg의 범위로 조사되었으며 Bryan등[10]이 오염지역에서 채취한 *S. plana*의 총 soft parts에 대해 보고한 1,120-1,240mg/kg에 비해서는 모든 조사지점들에서 그보다 훨씬 낮은 수준이었다.

3) Zn

Zn은 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 93.3-134.8mg/kg, 97.9-157.3mg/kg 범위로서 이등[9]이 보고한 한국 동남해연안 진주담치의 지역별 평균치인 50-72mg/kg, 유등이 보고한 군산연안 피뿔고둥중의 평균함량 40.15mg/kg, Millward 등[12]이 러시아의 비오염지역에서 채취된 *M. edulis*의 체내 평균농도들로서 보고한 53mg/kg, 84mg/kg등과 비교하여 상당히 높은 농도수준으로 나타났다. 이와 같은 본 연구결과에서의 Zn농도수준에 대해서는 우선 주변 환경오염의 영향과 함께 패류종간에 있어 생물학적 이용도(bioavailability)의 차이등이 고려될 수 있을 것이며 향후 이에 대한 명확한 규명이 있어야 할 것으로 사료된다. 주변 환경오염의 영향과 관련하여서는 금번 연구의 조사지점들에서의 저질시료중의 Zn농도가 19.7-38.3mg/kg의 범위로 유등[11]이 만경강 및 금강하류 저질시료들에 대해 보고한 Zn 평균농도 범위인 17.52-25.59mg/kg에 비해 전체적으로 높은 수준으로 나타난 점등이 고려될 수 있을 것이며 패류종간의 생물학적 이용도의 차이와 관련하여서는 England 남서부의 비오염지역에서 가리맛조개와 같은 burrowing valve종인 *S. plana*에 있어 체내평균농도가 374ppm으로 나타났다는 Bryan등[10]의 보고등을 참조할 수 있을 것이다. 본 조사에서의 가리맛조개내 Zn농도수준은 Laane[13]에 의해 제시된 *M. edulis*에 대한 Zn background 농도인 200mg/kg에 비해서는 전체적으로 낮은 수준으로 나타났다.

6개 조사지점들에서의 저질내 Zn농도는 19.74-38.34.0mg/kg의 범위로서 상기에서 언급한 바와 같이 유등[11]이 보고한 만경강 및 금강하구지역 저질시료들에 대해 보고한 Zn 평균농도 범위인 17.52-25.59mg/kg에 비해 높은 수준이었으나 Laane등[13]이 제시한 북미 노르웨이 연안의 저질내 평균농도인 110±27mg/kg에 비해서는 현저히 낮은 수준이었다. 조사지점별로는 S2, S5, S6지점들에서 높은 수준, S4지점에서 가장 낮은 수준을 보였다. 가리맛조개와 저질과의 비교시 S3지점을 제외한 조사지점들에서의 가리맛조개내 Zn농도 결과에는 S1지점에서의 가리맛조개내 Zn농도수준이 S4지점과 거의 동일한 수준으로 낮게 나타난 점을 제외하면 저질내 Zn농도의 비교수준이 대체적으로 잘 반영된 것으로 평가된다.

4) Cr 및 Ni

Cr은 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 0.680-1.073mg/kg, 0.686-0.995mg/kg의 범위로서 이등[9]이 한국 동남해연안 진주담치의 중금속 함량 조사에서 보고한 지역별 tissue내 평균 Cr함량치인 임원 4.4mg/kg, 여수 3.6mg/kg, 진해만 2.7mg/kg등과 비교할 때 현저히 낮은 수준으로 평가되었다. Ni 역시 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 0.810-1.350mg/kg, 0.810-1.090mg/kg의 범위로서 Bryan등[10]이 잉글랜드 남서부의 비오염지역에서 채취된 *S. plana*에 대해 보고한 체내 평균농도인 3.4mg/kg, 4.5mg/kg에 비해 현저히

낮은 농도수준을 나타내었다.

6개 조사지점들에서의 저질내 Cr 및 Ni농도는 각각 10.47-19.14mg/kg, 6.74-12.03mg/kg의 범위로서 Bryan등[10]이 England 남서부 하구지역에서 저질내 평균농도 범위로 보고한 Cr 19-45mg/kg, Ni 8.5-28mg/kg에 비해 전체적으로 낮은 수준을 나타내었다. 조사지점별로는 S5, S2, S6, S3지점들에서 순차적으로 높은 평균치를 나타내었고 S1, S4지점들에서 낮은 수준치를 나타내었다. 이와 같은 저질내 Cr, Ni농도수준을 S3지점을 제외한 조사지점들에서의 가리맛조개내 결과와 비교할때 Cr의 경우 S6지점, Ni의 경우 S1지점에서 서로 상이한 비교수준을 보였다.

5) Cu

Cu는 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 8.90-29.21mg/kg, 8.89-21.21mg/kg의 범위로서 이등[9]이 한국 동남해연안 진주담치의 중금속 함량 조사에서 보고한 지역별 tissue내 평균 Cu함량범위인 3.7-6.6mg/kg, 김등[14]이 보고한 한국 연안패류중의 평균함량 2.59mg/kg, Richardson등[15]이 보고한 서부 Australian 수역들로 이식한 *M. edulis*체내의 평균농도 범위인 3.0-4.8mg/kg, Millward등[12]이 러시아의 비오염지역에서 채취된 *M. edulis*의 체내 평균농도들로서 보고한 6.8mg/kg, 7.6mg/kg, Wallner-Kersanach등[16]이 Brasil 북동해안에 서식하는 *Anomalocardia brasiliana*중의 체내 평균 Cu함량으로 보고한 8.31mg/kg등과 비교하여 현저히 높은 농도수준을 나타낸바 금번 조사지역이 Cu에 관하여 주변 오염의 영향을 받고 있음이 의심되어졌다. 본 조사에서의 가리맛조개내 Cu농도는 Laane[13]에 의해 제시된 *M. edulis*에 대한 background 농도인 Cu <10mg/kg 에 비해서도 S1지점을 제외한 나머지 지점들에서 모두 높은 수준으로 나타났다. 식품중의 Cu함량에 대한 제한치를 영국의 경우 20mg/kg으로 권고[14]하고 있는바 본 연구에서의 가리맛조개내 체내함량이 건조중량 basis로 표시된 점을 감안하더라도 다른 조사결과들과의 함량 수준 비교에 있어 높은 수준으로 나타난 점등을 고려할때 앞으로 식용으로의 섭취시 이에 대한 세심한 감시노력이 요망된다.

6개 조사지점들에서의 저질내 Cu농도는 3.65-7.78mg/kg의 범위로서 유등[11]이 만경강 및 금강하구지역 저질시료들에 대해 보고한 Cu 0.39-3.15mg/kg에 비해 매우 높은 농도수준이었고 Laane등[13]이 제시한 북미 노르웨이 연안의 저질내 평균농도인 17±5.9mg/kg에 비해서는 현저히 낮은 수준이었다. 조사지점별로는 S5, S2, S6지점들에서 상대적으로 높은 수준을 보였고 S4지점에서 가장 낮은 수준을 나타내었다. 이러한 저질내 Cu농도 결과를 반영하여 가리맛조개내 Cu농도 결과에서도 S1지점에서의 가리맛조개내 Cu농도수준이 가장 낮은 것으로 나타났으나 상이한 점으로서 저질내 Cu농도가 거의 동일한 수준으로 나타난 S2지점 및 S5지점의 경우 가리맛조개 체내에 있어서는 S2지점에서 S5지점에 비해 현저히 높은 Cu농도수준을 나타내었다.

6) Cd

Cd는 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 0.068-0.128mg/kg, 0.128-0.298mg/kg의 범위로서 이등[9]이 한국 동남해연안 진주담치의 조사지점에 따른 soft tissue내 평균 Cd함량 범위로 보고한 1.9-2.9mg/kg, Cocca[17]에 의해 전세계 *Mytilus.* spp.중 soft tissue내 Cd 농도에 대한 문헌검토결과로서 제시된 평균농도범위인 0.6-3.3mg/kg, Millward등[12]이 러시아의 비오염지역에서 채취된 *M. edulis*의 체내 평균농도들로서 보고한 4.9mg/kg 및 5.1mg/kg등에 비해 현저히 낮은 농도수준을 나타낸바 조사지역내에서의 Cd오염문제는 지금으로서 염려할 수준이 아닌 것으로 판단된다. 식품으로서의 위해성과 관련하여 패류중의 Cd규제치를 네델란드에서는 molluscan shellfish로서 1.0ppm, 오스트레일리아에서는 연체동물로서 2.0-5.5ppm등의 수준으로 정하고 있어[14] 본 조사결과는 역시 이러한 규제수준을 크게 만족하는 수준이었다.

6개 조사지점들에서의 저질내 Cd농도는 0.012-0.040mg/kg의 범위로서 유등[11]이 만경강 및 금강하구지역 저질시료들에 대해 보고한 0.28-4.65mg/kg에 비해서는 현저히 낮은 수준이었으며 Laane등[13]이 제시한 북미 노르웨이 연안의 저질내 평균농도인 0.08±0.02mg/kg에 비해서는 약간 낮은 농도수준이었다. 조사지점별로는 S5지점에서 가장 높은 수준으로 나타났고 S1 및 S4지

Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

점에서 상대적으로 낮은 수준을 나타내었다. 이에 따라 S3지점을 제외한 조사지점들에서의 가리맛조개내 Cd농도 결과에는 저질내 Cd농도의 비교수준이 대체적으로 잘 반영된 것으로 평가되며 특히 S5지점의 경우는 whole soft parts에서 육질부에 비해 저질내 비교수준이 잘 반영된 것으로 나타났다.

7) Pb

Pb는 S3지점을 제외한 나머지 조사지점들에서의 육질부 및 총 soft parts내 평균농도가 각각 0.650-0.841mg/kg, 0.763-1.306mg/kg의 범위로서 지점별로는 S1, S5에서의 총 soft parts내 농도가 상대적으로 높은 수준을 보였으며 이등[9]이 보고한 한국 동남해연안 진주담치의 조사지점에 따른 soft tissue내 평균 Pb함량 범위인 0.27-2.75mg/kg와 비교할 때 거의 동일한 수준으로 평가되었다. 또한 본 연구에서의 총 soft parts내 평균농도 범위는 현등[18]이 보고한 충남 서해안 패류중의 Pb평균 함량인 0.72mg/kg, Wallner-Kersanach등[16]이 보고한 Brasil 북동해안에 서식하는 *Anomalocardia brasiliana*중의 Pb함량인 0.77mg/kg등과 비교할때 0.99-1.81배 범위의 다소 높은 수준에 해당하였다. 인체에 대한 주요한 신경 및 신장독성물질[19]인 Pb의 어패류중 허용한계기준치를 네델란드는 2ppm, 영국 및 캐나다는 10ppm으로 각각 설정[14]하고 있어 본 연구에서 가리맛조개 체내의 농도수준은 모든 조사지점들에 있어 이들 기준치를 만족하는 것으로 나타났으나 근래 여러나라에서 식용패류의 Pb허용함량치를 1ppm으로 권고[20]하고 있음을 감안하여 식용섭취에 대한 지속적인 감시노력이 요망된다. 본 조사에서의 가리맛조개내 Pb농도수준은 Laane[13]에 의해 제시된 *M. edulis*에 대한 Pb background 농도인 5mg/kg에 비해서는 현저히 낮은 수준으로 나타났다.

6개 조사지점들에서의 저질내 Pb농도는 6.10-13.19mg/kg의 범위로서 유등[11]이 만경강 및 금강하구지역 저질시료들에 대해 보고한 N.D.-4.12mg/kg에 비해서는 Pb는 상당히 높은 수준이었고 Laane등[13]이 제시한 북미 노르웨이 연안의 저질내 평균농도인 26±9.5mg/kg에 비해서는 현저히 낮은 농도수준을 나타내었다. 조사지점별로는 다른 중금속들의 경우와는 달리 군장공업단지 인근의 S1지점에서 가장 높은 평균치를 나타내

Table 1. Heavy metal concentration(mg/kg dry weight) in *S. constricta*

Site	Part	Heavy metals							
		Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cu	Cd	Pb
S1	F	19.95±5.39	151.1±42.8	93.3±14.3	0.728±0.275	1.350±0.416	8.90±1.46	0.068±0.037	0.756±0.149
	W	26.95±7.03	396.5±149.2	102.6±10.6	0.667±0.124	1.090±0.119	8.89±2.20	0.128±0.022	1.233±0.315
S2	F	30.46±8.53	251.7±94.2	131.2±58.6	1.001±0.259	1.150±0.446	29.21±9.74	0.123±0.039	0.798±0.257
	W	48.97±21.48	492.7±92.8	157.3±40.7	0.995±0.492	0.970±0.219	21.21±6.88	0.138±0.026	0.918±0.135
S3	F	83.93±30.15	272.1±70.5	190.9±34.3	1.788±0.919	1.876±0.841	34.35±13.09	0.187±0.053	0.841±0.390
	W	65.92±22.56	581.7±243.4	217.0±56.3	1.346±0.531	1.856±0.717	27.48±9.35	0.281±0.076	1.148±0.445
S4	F	9.28±1.73	178.4±37.5	110.5±18.4	0.680±0.223	0.948±0.618	12.12±1.81	0.123±0.046	0.650±0.203
	W	13.89±3.60	478.6±140.7	97.9±13.5	0.686±0.275	0.810±0.217	11.42±3.43	0.181±0.079	0.763±0.175
S5	F	14.10±3.30	154.3±21.8	134.8±24.8	1.073±0.359	1.130±0.256	11.89±2.09	0.128±0.030	0.813±0.097
	W	19.81±3.72	399.2±110.8	134.7±20.1	0.716±0.224	0.913±0.182	15.86±3.89	0.298±0.059	1.306±0.252
S6	F	16.27±2.42	196.3±40.6	128.9±10.7	0.777±0.264	0.810±0.198	15.46±3.79	0.099±0.027	0.735±0.142
	W	20.33±4.35	518.1±199.5	112.1±12.9	0.648±0.310	0.956±0.371	15.81±1.15	0.184±0.037	0.912±0.185

F : the flesh, W : the whole soft parts, Data are expressed as mean±SD

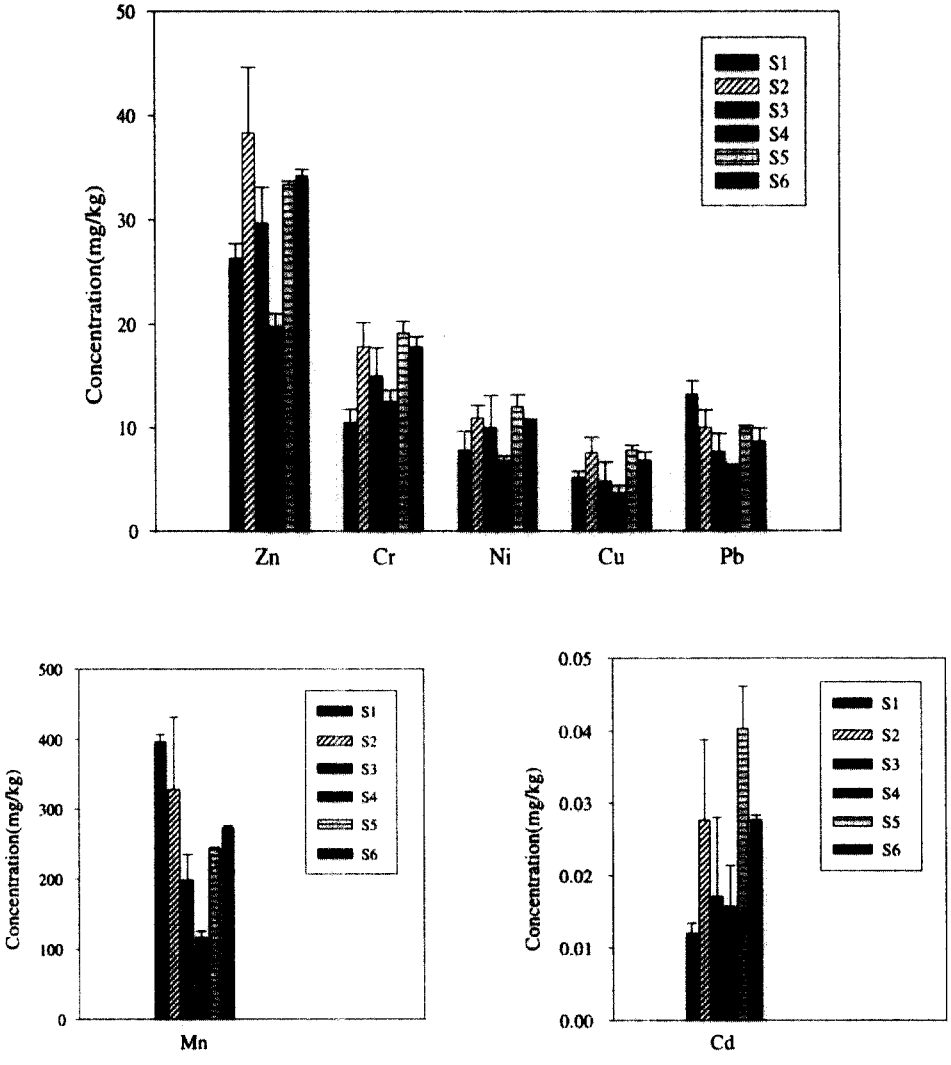

Fig. 2 Heavy metal concentration in sediments.

었고 S4, S3지점들에서 상대적으로 낮은 수준치를 나타내었다. 이와 같은 저질내 Pb농도수준은 S3지점을 제외한 조사지점들에서의 가리맛조개내 결과에 대체적으로 반영된 것으로 평가되나 인근 군장공업단지의 영향에 기인하는 것으로 판단되는 S1지점에서의 상대적으로 높은 저질내 농도수준이 가리맛조개 체내의 비교농도수준에는 명확하게 반영되지 못하였다.

이상의 저질 및 가리맛조개내 중금속농도 결과들로부터 조사지점별로 볼 때 S2, S5 및 S6지점등에서 Zn, Cr, Ni, Cu, Cd등의 오염수준이 저질에서를 중심으로 비교적 높은 것으로 나타난 바 S2지점의 경우는 전주, 익산의 산업활동 및 도시생활과 연관된 만경강 오염을 반영하는 결과로 볼 수 있으며 S5, S6지점들에 대해서는 주변의 수산가공업과 관련된 산업활동, 해류 순환의 정체등에 의한 영향등이 면밀히 검토되어야 할 것으로 판단된다. 또한 인근 군장공업단지의 영향을 받아온 S1지점에서의 저질내 Pb오염수준이 타 조사지점

Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

들에 비해 높은 것으로 평가되며 S-4지점에서는 상기 중금속들의 오염수준이 전체적으로 가장 낮은 것으로 나타났다. 한편 금번 저질내 중금속조사와 관련된 보다 구체적인 오염수준의 평가 및 고찰에 대한 내용은 서해 연안을 대상으로한 별도의 논문에서 자세히 다루고자 한다.

3.2 S. constricta에 있어 생체 크기와 중금속 분포

패류를 지표생물로 이용하여 수계환경의 중금속 평가를 수행함에 있어 보통 체내 중금속농도를 개체중량대비(weight-specific basis)로서 표시하게 되는데 이때 작은 크기의 개체들에서 자주 높은 수준의 중금속 농도치가 기록되어 이것이 실제 오염수준의 반영에 의한 것인지 아니면 단지 개체크기의 차이에 기인하는 결과인지 큰 혼란을 초래하게 된다. Boyden[21]은 이러한 패류 체내 중금속농도와 개체 크기(건조중량)간의 상관성에 대하여 3가지 일반 유형을 제시하였으며 그 해당 상관성은 중금속 및 패류의 종류에 따라 달라짐을 보고하였다. 따라서 본 연구에서도 가리맛조개의 생체크기에 따른 관련특성들을 파악하고 중금속 오염평가에 있어 시료개체들의 체장크기에 따른 문제점에 대비함으로서 가리맛조개를 갯벌환경의 유용한 감시생물로 활용함을 도모하고자 하였다.

1) 체장과 총soft parts건조중량과의 상관성

가리맛조개에 있어 체장과 가식부인 총soft parts의 건조중량과의 상관성을 검토한 결과는 Table 2 및 Fig. 3과 같다. 상관계수는 각 조사 지점별로 0.78-0.97의 높은 수준들로서 가리맛조개에 있어 역시 체장이 커짐에 따라 전반적으로 총soft parts의 건조중량도 커짐을 보여주었다. 한편 조사지점을 고려치 않은 전체 시료들에 대해서는 r=0.68로서 개별 조사지점별에 비해 낮은 상관성

Table 2. Comparison of the correlation coefficients(r) between the shell length and the dry weight of the whole softparts in *S. constricta*

	Sampling site						T*	T-S3**
	S1	S2	S3	S4	S5	S6		
r	0.92	0.92	0.78	0.84	0.81	0.97	0.68	0.89

* For the total mussels collected from 6 sampling sites ,
** For the total mussels collected from 5 sampling sites except S3.

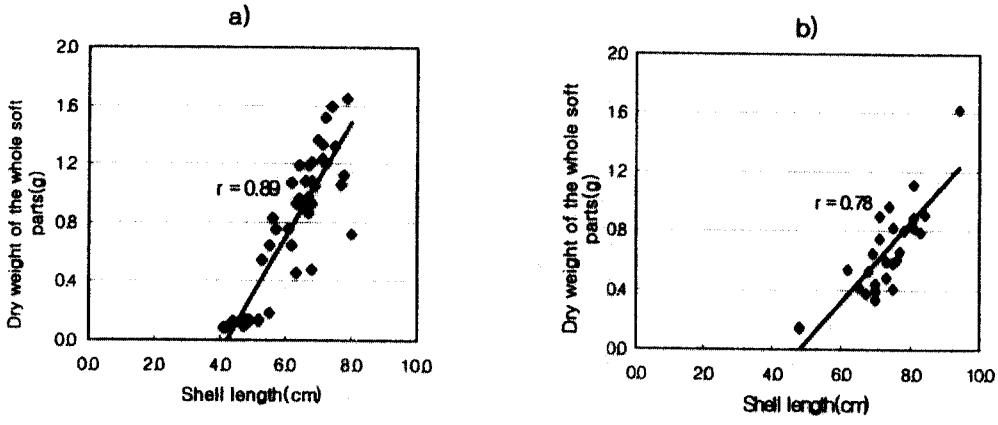

Fig. 3 Correlation between the shell length and the dry weight of the whole soft parts in *S. constricta* : a. collected from 5 sampling sites except S3, b. collected from S3.

을 나타내었으나 S3지점의 시료를 제외할 경우의 전체시료들에 대해서는 r=0.89의 높은 상관성을 나타내었다. 이는 S3지점들의 시료들이 다른 지점들의 동일수준의 체장시료들에 비해 현저히 낮은 총soft parts의 건조중량치를 갖는데 기인하는 결과로 구체적으로 체장 7.0cm정도의 시료에 대한 총soft parts의 건조중량이 S3지점에서 0.33-0.67g 수준으로 나타난데 비해 다른 조사지점들에서는 1.2g내외의 수준으로서 현격한 차이를 보였다. 이러한 패류내 총soft parts의 건조중량의 차이는 조사지점별에 따른 영양수준의 차이를 반영하는 것으로 결과적으로 상기 가리맛조개 체내의 중금속 농도에 대한 결과에서와 같이 중금속 오염수준의 비교평가에 중대한 영향을 미치게 되는 바 패류를 이용한 보다 정확한 중금속오염수준의 평가를 위해서는 성별, 계절, depuration과 함께 시료채취지점별에 따른 시료개체들의 영양수준의 차이에 대한 검토 및 고려가 매우 중요한 요소임을 제시하고 있다. Bryan등[10]도 조사지점에 따라 *Scrobicularia plana*의 발육속도가 다름을 확인하였으며 어떠한 환경인자들이 S3지점에 있어서 가리맛조개의 발육을 저해하는지에 대해서는 앞으로 면밀한 검토가 요구된다.

2) 시료크기에 따른 중금속분포 특성

가리맛조개를 이용한 중금속 오염평가 수행시 시료의 크기에 따른 농도 결과수준의 변동성을 피하고 비교평가의 객관성을 확보하기 위해 체장 6.0-8.0cm(S2 지점: 6.5-8cm, 기타지점: 6-7.5cm)의 일정범위로 대상시료를 선별하고 중금속 분석을 수행한 본 연구에서의 체장크기와 체내 중금속농도와의 상관성을 검토하였다. 이때 총 soft parts에 대해서는 건조중량을 기준으로 중금속 농도와의 상관성을 검토하였고 육질부에 대해서는 정확한 육질부 전체 무게를 얻기가 어려운 관계로 시료체장을 기준으로 하여 상관성을 검토하였다. S3지점을 제외한 5개 대상지점들에서 구한 체장 크기와 체내 중금속농도간의 상관계수(r)들의 중금속별 평균(Table 3)으로 부터 대상시료들을 체장 6.0-8.0cm범위로 선별하였음에도 많은 경우들에 있어 여전히 시료의 크기가 증가함에 따라 체내 중금속농도가 감소하는 경향(-)이 작지 않음을 나타낸바 가리맛조개에 있어서는 현장 오염수준의 비교평가를 위해 좀더 좁은 체장범위의 시료선별이 필요함을 시사하였다. 특히 Cd의 경우는 총 soft parts에 있어 -0.79의 높은 평균 상관계수치를 나타내었는데 이는 건조중량이 증가할수록 Pb, Cr, Ni, Cu, Zn등의 생체내 농도가 감소하는 반면 Cd의 생체내 농도는 건조중량과 무관하였다는 긴맛조개(*S. strictus* Gould)에 대한 황등[22]의 보고와는 상이한 것으로 패류종에 따라 중금속의 생체내 거동이 다름을 제시하는 결과로 볼 수 있다. 이와 관련하여 Boyden[21]은 *M. edulis*에 있어서는 건조중량의 증가와 Cd의 생체내 농도가 무관하였으나 *C. edulis*, *M. mercenaria*등에 있어서는 건조중량이 증가함에 따라 Cd의 생체내 농도가 감소하였음을 보고한 바 있다.

Table 4. Comparison of the averages of the correlation coefficients(r) between shell size and heavy metal concentration in *S. constricta*

Treated part	Heavy metals							
	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cu	Cd	Pb
The flesh*	-0.27[a]	-0.36	-0.36	-0.54	-0.45	-0.35	-0.29	-0.49
The whole soft parts**	-0.23	-0.10	-0.66	-0.13	-0.05	-0.60	-0.79	-0.60

Each value is the mean of r values obtained from 5 sites.
*The shell size was indicated by shell length. **The shell size was indicated by dry weight.
[a] : - represents the tendency of decrease of the heavy metal concentration as the shell size increases.

Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

3.3 중금속의 생체내 분배

갯벌환경에서 가리맛조개의 체내로 흡수된 중금속들의 생체내 분배에 대해 알아보고자 각 조사지점별에 따른 가리맛조개의 평균 중금속농도를 이용하여 총 soft parts내 중금속농도에 대한 육질부내 중금속농도비(이하 체내 분배비)를 산출하였다. Fig. 4에서와 같이 체내분배비는 Cr, Ni, Cu, Zn이 각각 1.18, 1.12, 1.07, 0.98의 평균치로 거의 1에 가까운 동일한 수준을 나타내며 이들의 체내이행이 비육질부보다 육질부로 다소 크거나 동등하게 이루어짐을 보여주었고 반면에 Mn, Pb, Cd, Fe가 각각 0.80, 0.74, 0.62, 0.42의 1보다 낮은 평균치로서 육질부보다 내장을 비롯한 비육질부로의 이행이 큼을 보여주었다. 황등[23]은 긴맛조개의 경우 Cu의 체내 분배비가 1.71의 평균치로서 다른 중금속들에 비해 높은 것으로 보고하였으나 본 연구의 가리맛조개에 있어서는 Cu의 체내분배비가 Zn과 함께 거의 1에 가까운 평균치를 나타내어 생체내 대사 및 항상성 유지에 있어 중요한 필수금속원소로 알려져 있는 이들에 대한 체내 거동의 유사성을 제시해 주었다. 또한 Cr의 경우는 긴맛조개에서 체내분배비가 0.77의 평균치를 나타낸 것으로 보고[23]되었으나 본 연구의 가리맛조개에 있어서는 1.18의 평균치를 나타내었으며 Cd의 경우는 긴맛조개 체내에 거의 동등하게 분배되는 것으로 보고[23]되었으나 본 연구의 가리맛조개에서는 0.62로서 체내흡수후 비육질부로의 이행이 큰 것으로 나타났다. Cd에 대해서는 패류체내에서 특히 신장(kidney)에 고농도로 농축되는 것으로 알려져 있어[24-25] 본 연구결과는 이를 반영하는 것으로 볼 수 있다. 나머지 중금속들의 경우에는 가리맛조개의 체내분배비가 긴맛조개에 대해 보고된 체내분배비와 유사한 수준을 보여주었으며 Cu, Cr, Cd에 있어 이와같은 가리맛조개와 긴맛조개간의 체내분배비의 차이에 대해서는 앞으로 depuration 및 생물학적 인자와 관련된 보다 심도있는 연구노력이 필요할 것으로 생각된다.

각 조사지점들에서의 가리맛조개 체내의 평균 중금속농도치를 이용하여 육질부와 총 soft parts 간에 있어 개별 중금속 농도의 상관성을 구한 결과는 Fig. 5및 Table 4와 같다. 가리맛조개에 있어 대상 중금속들에 대한 상관계수치(r)는 0.72-0.95의 범위로서 특히 Mn, Zn, Cr, Ni, Cu등의 상관계수치가 0.90이상으로 나타나는 등 전반적으로 높은 상관성을 나타내어 가리맛조개에 있어 총 soft parts의 중금속 농도가 증가함에 따라 육질부의 중금속 농도도 증가함을 보여주었다. 이와 같은 결과로부터 가리맛조개를 지표생물로 이용하여 중금속 오염의 비교평가를 수행함에 있어 분석시료부위로 전체 개체부를 취하지 않고 육질부로 한정하여 이용해도 오염수준의 반영에 무리가 없을 것으로 판단되나 금번 연구 대상지역에서의 결과

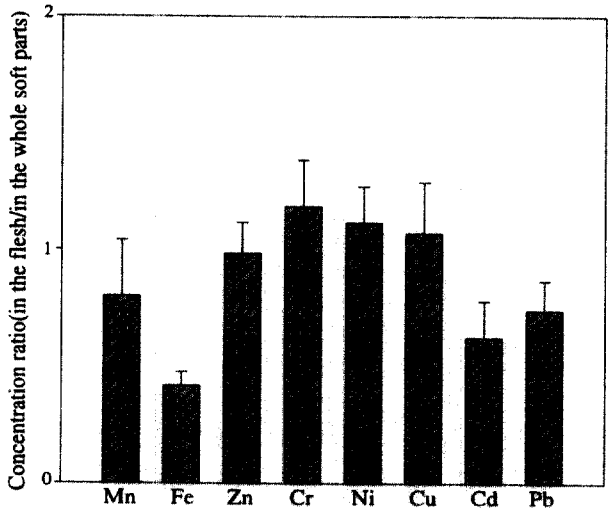

Fig. 4. Concentration ratio of heavy metals in the flesh/in the whole soft parts in *S. constricta*.

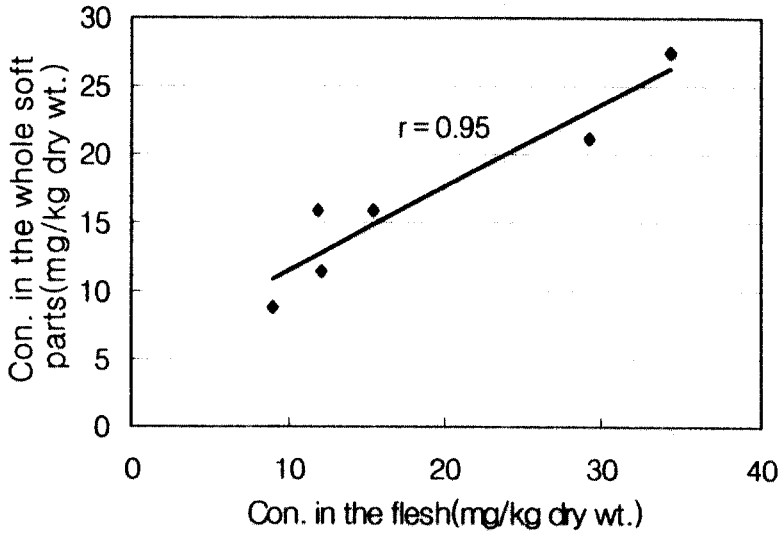

Fig. 5 Correlation between Cu concentrations in the flesh and those in the whole soft parts of *S. constricta*.

Table 4. Comparison of the correlation coefficients(r) between the heavy metal concentrations in the flesh and those in the whole soft parts of *S. constricta*.

	Heavy metals							
	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cu	Cd	Pb
r value	0.92	0.87	0.94	0.92	0.92	0.95	0.72	0.72

가 Cu, Zn, Pb등의 일부 경우를 제외하고는 전반적으로 중금속오염이 크지 않은 것으로 나타난 바 앞으로 실제 오염수준이 높은 지역에서는 중금속의 생체내 분배가 어떻게 나타날 것인가에 대한 추가적인 연구검토가 필요할 것으로 사료된다.

3.4 중금속의 생체내 농축

중금속의 체내축적과 관련하여 가리맛조개에 있어 저질 중금속 농도에 대한 해당 중금속들의 체내농도비로서 정의되는 농축계수를 구한 결과는 Fig. 6과 같다. 본 연구결과에서는 S3지점 시료들에 있어서 상기에서 언급된 영양상태의 특이성에 기인되어 생체내 중금속 농축계수가 다른 지점들의 경우에 비해 현저히 높은 수준을 나타낸바 S3지점을 제외한 나머지 5개지점들에 있어서의 평균 농축계수를 산출하였다. 가리맛조개에서는 황동[23]이 보고한 긴맛조개에 있어서와 같이 조사 중금속들중 Mn, Cr, Ni, Pb의 평균 농축계수가 0.05-0.12범위의 매우 낮은 수준으로 나타났으며 구체적으로 육질부에서는 Cr, Mn, Pb, Ni순으로 0.056, 0.068, 0.082, 0.118, 총 soft parts에서는 Cr, Mn, Ni, Pb순으로 0.050, 0.098, 0.103, 0.111을 각각 나타내었다. 이와 같은 이들의 낮은 생체내 축적에 대해서는 Cr, Mn, Pb의 경우 생물체의 대사활동에 필요한 미량 금속원소들로서 이들에 대한 생체에서의 흡수, 대사과정이 생물학적 기전에 의해 조절되어짐으로서 생체내에서의 유사한 낮은 축적경향을 갖는 것으로 이해될 수 있으며 Pb의 경우는 저질 토양입자와의 큰 흡착력으로 인해 생체내로의 흡수가 매우 어려운데 기인하는 것으로 볼 수 있다. 황동[23]은 긴맛조개에 있어 Pb와 Cr에 대한 평균 농축계수가 각각 육질부 0.082, 0.090, 총 soft parts 0.161, 0.132의 비슷한 수준으로 가장 낮게 나타났고 Mn과 Ni에 대한 농축계수가 육질부 0.242, 0.280, 총 soft parts 0.271, 0.246으로 역시 서로 비슷한 수준으로 나타났음을 보고한바 이

Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

에 비해 본 연구의 가리맛조개에 있어서는 Pb를 제외한 Cr, Mn, Ni의 평균 농축계수가 보다 낮은 수준으로 나타났다. 또한 상기의 육질부 중금속농도/총 soft parts 중금속 농도비에 대한 결과와 함께 Pb, Mn 은 긴맛조개에 있어서와 같이 비육질부로의 체내 이행이 크고 Ni는 육질부로의 체내 이행경향이 다소 큰 것으로 나타났으나 Cr의 경우는 긴맛조개에서 비육질부로의 체내이행이 큰 것으로 나타난 것[23]과는 달리 본 연구의 가리맛조개에 있어서는 이행수준이 거의 비슷한 것으로 나타났다. 가리맛조개에 있어 Zn과 Cu에 대한 평균농축계수는 각각 육질부 4.08, 2.54, 총 soft parts 4.06, 2.40으로 상기의 Mn, Cr, Ni, Pb에 비해 매우 높은 수준을 나타내 역시 Zn과 Cu이 생물체에 대한 필수 금속원소로서 각종 대사활동 및 항상성 유지에 상기의 Mn, Ni, Cr보다 다량이 요구됨을 반영하였다. 또한 황등[23]이 보고한 긴맛조개에서와 같이 Zn의 체내농축이 Cu에 비해 보다 큰 것으로 나타났으나 긴맛조개에서 2개 중금속 모두 육질부로의 체내이행이 비육질부에 비해 상대적으로 큰 경향을 나타낸 것과는 달리 본 결과에서는 거의 동등한 이행수준으로 나타나 체내 어느 부위에서나 필수 금속원소로서의 이들에 대한 생물학적 요구도가 비슷한 것으로 이해되었다. Cd의 경우는 평균농축계수가 육질부 4.94, 총 soft parts 8.26으로 조사대상 중금속들 중에서 가장 높

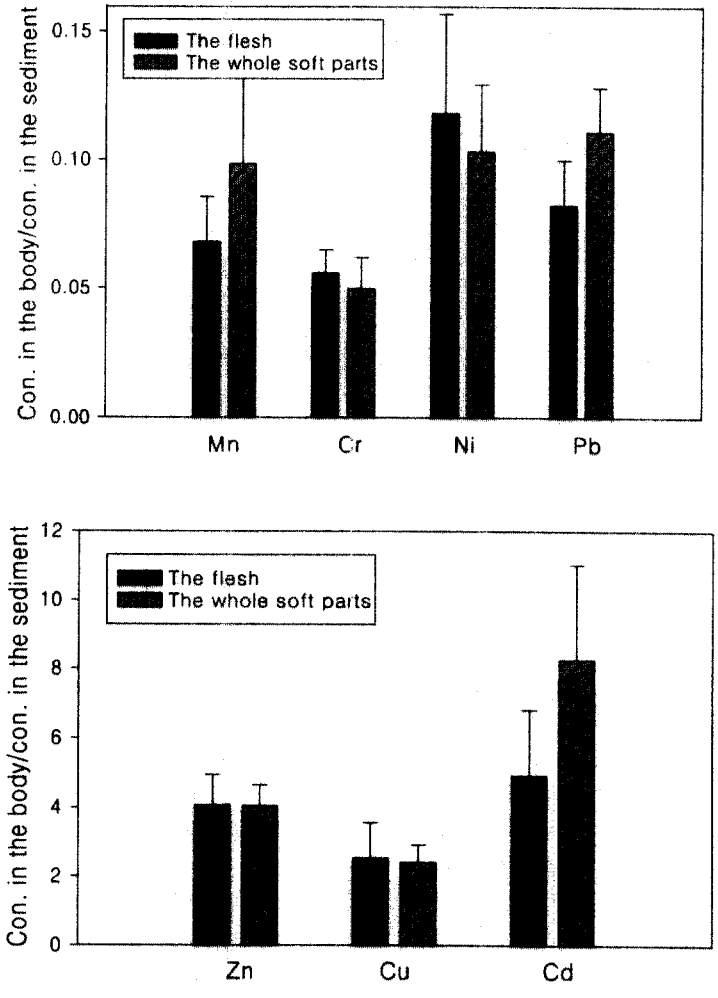

Fig. 6 The average bioaccumulation factors of heavy metals in the flesh and in the whole soft parts of *S. constricta*.

은 수준으로서 Cd의 생체내 축적성이 매우 큼을 확인시켜 주었다. 그러나 황등[23]이 보고한 긴맛조개에서의 Cd 평균농축계수, 육질부 19.96, 총 soft parts 18.77에 비해서는 상당히 낮은 수준이었으며 특히 긴맛조개에서는 육질부와 총 soft parts에서의 평균 농축계수가 거의 동일한 수준이었음에 비해 본 연구의 가리맛조개에서는 상기 3항의 체내 분배 경향을 반영하여 soft parts의 평균농축계수가 육질부의 평균농축계수에 비해 1.7배의 높은 수준으로 나타난바 이러한 생물학적 차이의 해명을 위한 앞으로의 연구노력이 요구된다. 아울러 3항에서 언급하였듯이 금번 연구 대상지역에서의 결과가 Cu, Zn, Pb등의 경우를 제외하고는 전반적으로 중금속오염이 크지 않은 것으로 나타난 바 역시 중금속의 생체내 농축에 관해서도 실제 오염수준이 높은 지역에서와의 비교검토를 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

서해 새만금지역 갯벌환경에서의 중금속 오염수준을 평가하고 서식패류인 가리맛조개(*S. constricta* Lamarck)에서의 체내중금속의 분포 및 거동특성을 규명하여 가리맛조개를 중금속 오염의 지표생물로서 활용하는데 기여하고자 수행한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 금번 조사지역에서의 가리맛 조개의 체내 중금속농도 결과로부터 조사중금속들중 Zn, Cu, Pb의 농도수준이 비교적 높은 것으로 평가되었다

2. 저질 및 가리맛조개내 중금속농도 결과들로부터 S2, S5, S6지점등에서 Zn, Cr, Ni, Cu, Cd, S1지점에서 Pb의 오염수준이 타지점들에 비해 높은 것으로 평가되었으며 S4지점에서 이들 중금속들의 오염수준이 전체적으로 가장 낮은 것으로 나타났다.

3. 가리맛조개에 있어 체장과 총soft parts의 건조중량은 높은 상관관계를 보였으나 S3지점에서 보여진 조사지점별에 따른 영양수준의 차이가 중금속 오염수준의 비교평가에 있어 고려되어야 할 중요한 영향인자임을 제시하였다.

4.가리맛조개에 있어 체장크기와 체내 중금속농도와의 상관성을 검토한 결과 전반적으로 시료의 크기가 증가함에 따라 체내 중금속농도가 감소하는 경향을 나타내었다.

5. 가리맛조개에 있어서는 Cr, Ni, Cu, Zn의 흡수후 체내이행이 비육질부보다 육질부로의 체내이행이 다소 크거나 동등하게 이루어지는 것으로 나타났고 Fe, Cd, Pb, Mn순으로 육질부보다 비육질부로의 이행이 큰 것으로 나타났다.

6. 가리맛조개에 있어서의 중금속 체내농도/저질 중금속 농도로부터 조사중금속들 중 Cd의 체내농축이 가장 크고 다음으로 Zn, Cu의 순이었으며 Mn, Cr, Ni, Pb등에 대한 평균 농축계수는 1이하로서 체내 축적성이 매우 낮은 것으로 나타났다.

5. 사 사

본 연구는 군산대학교 새만금환경연구센터(과학기술부 · 한국과학재단지정 및 전라북도 지원)의 연구비지원에 의한 것이며, 이에 감사드린다.

참고문헌

1. Smith, J. D., Plues, L., Heyraud, M., and Cherry, R.D., Concentrations of the elements Ag, Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb and Zn and the radionuclides ^{210}Pb and ^{210}Po in the digestive gland of the squid *Nototodarus gouldi*, *Mar. Environ. Res.*, Vol. 13, 55-68(1984).
2. Sadiq, M., Mian, A. A., and Saji, A. P., Metal bioaccumulation by sea urchin(*Echinometra mathaei*) from the Saudi coastal areas of the Arabian gulf: 2. cadmium, copper, chromium, barium, calcium, and strontium, *Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 57, 964-971(1996).
3. Ayas, Z., and Kolankaya, D., Accumulaton of some heavy metals in various environments and organisms at Göksu delta, Türkiye, 1991-1993, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 56, 65-72(1996).
4. Sures, B., Taraschewski, H., and Rydio, M., Intestinal fish parasites as heavy metal bioindicators:a comparison between *Acanthocephalus lucii*(Palaeacanthocephala) and the zebra mussel, *Dreissena Polymorpha*, *Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 59, 14-21(1997).

Journal of Korean Society on Water Quality
Vol. 18 No. 4, pp. 341-354, 2002

5. Goldberg, E. D., The mussel watch-a first step in global marine pollution monitoring, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 6, 111(1975).
6. Orren, M. J., Eagle, G. A., Hennig, H., and Gren, A., Variations in trace metal content of the mussel *Choromytilus meridionalis*(Kr.) with season and sex, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 11, 253-257(1980).
7. Latouche, Y. D., and Mix, M. C., The effects of depuration, size and sex on trace metal levels in bay mussels, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 13, No. 1, 27-29(1982).
8. Miramand, P., and Bentley, D., Concentration and disribution of heavy metals of two cephalopods, *Eledone cirrhosa* and *Sepia officinalis*, from the French coast of the England channel, *Mar. Biol.*, Vol. 114, 407-414(1992).
9. 이수행, 이광우, 한국해안 진주담치의 중금속 함량, *한국 해양소보*, 제 19권, 제 2호, 111-117(1984).
10. Bryan, G. W., and Hummerstone, L. G., Heavy metals in the burrowing bivalve *Scrobicularia plana* from contaminated and uncontaminated estuaries, *J. Mar. Bol. Ass. U.K.*, Vol. 58, 401-419(1978).
11. 유일수, 이종섭, 소진탁, 김재진, 만경강 및 금강하구지역 패류의 중금속 함량, *한국 패류학회지*, 제 7권, 제 1호, 87-93(1991).
12. Millward, G. E., Rowley, C., ands, T. K., Howland, R. J. M., and Pantiulin, A., Metals in the sediments and mussels of the Chupa estuary(White sea) Russia, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 48, 13-25(1999).
13. Laane, R. W. P. M., *Background concentrations of natural compounds in rivers, sea water, atmosphere and mussels*, Tidal Waters Division, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Hague, Vol. 84(1992).
14. 김길생 외, 식품중의 미량금속에 관한 조사연구(연안패류중의 미량금속 함유량에 관하여), *국립보건원보*, 제 22권, 354-365(1991).
15. Richardson, B. J., Garnham, J. S., and Fabris, J. G., Trace metal concentrations in mussels(*Mytilus edulis planulatus* L.) transplanted into southern Australian waters, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 24, No. 124, 392-396(1994).
16. Wallner-Kersanach, M., Lobo, S. E., and da Silva, E. M., Depuration effects on trace metals in *Anomalocardia brasiliana*(Gmelin, 1791), *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 52, 840-847(1994).
17. Cosa, D., Cadmium in *Mytilus* spp.:worldwide survey and relationship between seawater and mussel content, *Mar. Environ. Res.*, Vol. 26, 265-285(1988).
18. 현대용, 이동배, 충남 서해안 어패류의 중금속 함량 조사, *충남대학교 논문집*, 제 6권, 65-80(1994).
19. Goyer, R. A., Toxic effects of metals. In Amdur, M. O., Doull, J., and Klaassen C. D., *Toxicology*, 5th edition, Pergamon Press Inc., New York, 846-651(1996).
20. Andersen, V., Maage, A., and Johannessen, P. J., Heavy metals in blue mussels(*Mytilus edulis*) in the Bergen harbor area, western Norway, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 57, 589-596(1996).
21. Boyden, C. R., Effect of size upon metal content of shellfish, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, Vol. 57, 675-714(1977).
22. 황갑수, 신형선, 김강주, 여성구, 김진삼, 서해안 갯벌에 서식하는 *Solen strictus* Gould중의 중금속오염 및 그 특성, *한국 물환경학회지*, 제 17권, 제 2호, 191-200(2001).
23. 황갑수, 신형선, 김강주, 여성구, 김진삼, 서해 중부연안 갯벌에서의 저질 및 패류(*Solen Strictus* Gould)중 중금속 분포특성, *한국 환경위생학회지*, 제 27권, 제 4호, 25-34(2002).
24. Ray, S., Bioaccumulation of cadmium in marine organisms, *Experientia*, Vol. 40, 14-23(1984).
25. Naimo, T. J., A review of the effects of heavy metals on freshwater mussels, *Ecotoxicology*, Vol. 4, 348(1995).