

광양만 어패류에 대한 중금속류의 생물학적 증폭

주현수 · 김진 · 박종천 · 김승훈 · 김성호 · 송현철* · 이윙탁* · 이우범**

서남대학교 의과대학, *광양보건대학 치위생과, **전남대학교 건설 · 환경공학부

Biological Magnification of Heavy Metals on the Fish and the Shellfish in Gwangyang Bay

Hyun-Soo Joo · Jin Kim · Jong-Chun Park · Seung-Hun Kim · Seong-Ho Kim
Hyeon-Cheol Song* · Yong-Tak Lee* · Woo-Bum Lee**

Department of Medicine, College of Medicine Seonam University

**Department of Dental Hygiene, College of Kwang-Yang Health*

***Department of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University*

ABSTRACT

For this survey, the seawater, sediment and various marine organisms were collected from seventeen stations in Gwangyang Bay. The contents of cadmium, lead, zinc, copper, vanadium, cobalt, arsenic, chromium, nickel and mercury in seawater, sediment and marine organisms were determined. The Biological magnification rates were calculated from the results of heavy metal contents on various samples. The results obtained were as follows; The contents of heavy metals showed in the range of $0.04 \pm 0.09 \sim 10.82 \pm 11.99 \mu\text{g}/\ell$ for seawater, $0.014 \pm 0.025 \sim 90.71 \pm 43.89 \text{ mg/kg DW}$ for sediments, $0.004 \sim 8.932 \text{ mg/kg}$ for shellfish, $\text{ND} \sim 8.818 \text{ mg/kg}$ for fish, and $0.009 \sim 8.863 \text{ mg/kg}$ for others. The rate of biological magnification between marin organisms and seawater showed in the range of $0.657 \sim 850$ for fish, $0.66 \sim 3,175$ for shellfish, $1.48 \sim 1,400$ for others.

Key words : Heavy metal, Gawangyang bay, Biological magnification

1. 서론

한반도 남단의 중앙에 자리 잡은 광양만은 1960년대의 중화학공업 육성정책에 따라 여천 석유화학공업단지(현재 여수석유화학국가공단)가 조성되고, 이어서 광양제철소, 초남공단 등의 임해공업단지가 건설되어져 많은 환경변화가 나타난 곳으로, 우리나라의 서남해역을 대표하는 천혜의 어장 및 어족자원의 산란장으로 매우 중요한 역할을 하고 있다¹²⁾. 그러나 지속적인 임해공업단지의 확장과 주변 지역의 급속한 도시화에 따라 연안환경은 점차 변화되어 해양생태계의 파괴라는 심각한 문제에 직면하고 있다^{6, 10, 11)}. 특히 광양만의 유입부를 따라 형성되고 있는 방조제와 컨테이너 부두의 건설은 해수유동이 적은 광양만을 더욱 정체성 수역으로 변화시킴으로써 오염물질의 퇴적·축산을 방해하고 저질의 형성이 가속화되어 해수수질의 악화를 불러 일으키고 적조현상을 유발하는 등 많은 피해를 야기할 수 있다. 이처럼 해수의 교환이 활발하지 못한 만이나 호소의 경우 외부로부터 유입되는 오염물질의 축적뿐만 아니라 내부생산에 의해 유기질이 형성·침강되고 퇴적되어진 유기질은 저질층의 용존산소를 소모함으로써 결국 혐기적으로 부패하게 되어 저서생물에 치명적인 영향을 미친다^{3, 8)}. 해저 저질에 서식하는 이매패류를 비롯한 다모류, 갑각류 및 두족류 등은 이동성이 적어 용존산소의 농도뿐만 아니라 저질에 함유되어 있는 중금속이나 유해물질의 분포에 의해 큰 영향을 받으며 먹이사슬 농축으로 어패류를 식용으로 하는 사람의 건강상에 문제를 일으킬 수 있다²⁰⁾.

현재까지 광양만을 대상으로 한 연구로는 저

질의 물리적 특성이나 중금속 등 성분함량에 관한 연구^{3, 4, 14)}와 생물상, 해양생물군집 등에 관한 연구^{1, 3, 8, 9, 13, 18, 16)} 등이 있어 국내의 다른 연안에 비교할 때 연구가 활발한 편이나 실제 인간의 건강에 직접적인 영향을 줄 수 있는 어패류를 비롯한 광양만 서식 수산생물의 중금속 함량과 생물학적 농축현상 등에 관한 규명은 이루어지지 않고 많은 논쟁의 대상이 되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 광양만 해역의 해수, 저질뿐만 아니라 갑각류, 연체동물 및 해산어류 등의 체내 중금속 함량을 포괄적으로 조사 분석하고 이를 토대로 물리적 환경에서 생물권으로, 또는 각 서식생물의 영양단계에 따른 중금속의 축적 및 증폭현상을 파악하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 시료채취지점

조사지점은 광양만 해역의 물리적 특성과 어패류의 서식환경, 오염원의 분포 및 어업활동현황 등을 고려하여 총 17개 조사지점이 선정되었으며(Fig. 1), 채수는 Van Dorn water sampler(Hydrobios co., 5 l)를 사용하여 표층수를 채수하였으며, 저질의 채취는 지름 7 cm, 길이 30 cm core sampler를 사용하여 0~15 cm 층의 저질토를 채취하여 polyethylene bag에 보관하였다. 수산물 시료의 채취를 위한 채집 및 현장조사는 총 3회를 실시하였다. 사용한 그물은 형망 및 저인망(폭 10 m, 망목 1.5 cm)을 이용한 방법을 병행하였으며, 채집용 어

선에 저인망을 설치하여 각 조사해역별로 30분 간씩 인망하여 채취된 어패류 및 기타 해양생물을 선상에서 분류, 채취하였다. 채집된 시료는 PE 봉지에 옮긴 후 4℃ ice box에 넣어 실험실로 운반하였으며, 시료의 보존은 -20℃ 이하의 냉동고를 이용하여 냉동보존하여 분석하였다.

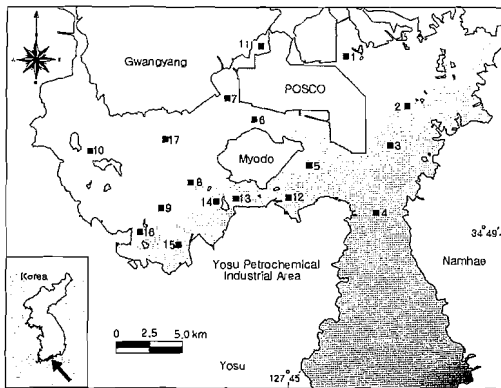


Fig. 1. Map showing Gwangyang Bay and sampling station.

2.2 분석방법

2.2.1 해수중의 중금속 함량 측정

시료 1,000 ml를 취하여 비이커에 넣고 5 ml Conc. HNO_3 를 가한 후, 시계접시를 덮고 가열하여 액량이 20 ml가 될 때까지 증발시킨다. 그리고 냉각시킨 다음 5 ml의 Conc. HClO_4 를 가하여 유기물을 분해시킨다. 다시 Conc. HNO_3 1 ml를 가하여 주위에 붙어 있는 잔유물을 씻어 내고 증류수를 약간 가하면서 동양여지 NO. 5를 사용하여 여과시킨 후 전체의 액량이 50 ml가 되게 하고 이후 MIBK 추출법으로 중금속을 추출하고 원자흡광광도계(Varian Spectra

AA-30)를 이용하여 분석하였다.

2.2.2 저질의 중금속 함량 측정

저질의 중금속 분석은 음건하여 분쇄한 시료 1.0 g을 테플론 비이커에 넣고 진한 질산 12 ml, 과염소산 6 ml, 불산 8 ml를 각각 가하여 밀봉한 다음 175℃로 가열하여 시료가 투명해질 때까지 반응시키고 개봉하여 산을 증발시켰다. 여기에 1N- HNO_3 50 ml를 넣고 금속원소를 용출시킨 후 ICP-MS (Fisons Instruments, PQI Turbo plus) 또는 ICP(Jobin, Model 138)로 측정하였다. 수은은 cold vapor generation method (Takamatsu et al., 1985)를 적용하였으며 Atomic Absorption Spectrophotometer (Varian AA-30)로 정량하였다.

2.2.3 수산물의 중금속 함량 측정

분석항목은 중금속에 포함되는 바나듐, 크롬, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 비소, 카드뮴, 수은 및 납으로서 총 10개 항목을 분석하였으며, 각 시료채취 장소에서 채취된 해양생물을 증류수로 2회 세척하고 패류의 경우 패각을 제거하여 육질부만을 남긴 다음, 이를 증류수로 3회이상 세척하여 동결건조기에서 3일 동안 건조하였다. 건조시료를 막자사발에서 갈아 0.1~0.25 g의 시료를 digestion vessel에 넣고 65% HNO_3 5 ml를 넣은 후, 1시간 이상 실온에서 방치하여 이산화탄소를 날려 보내고 Microwave digestion system(CEM, MDS-2000)을 이용하여 분해하였다. 분해된 시료를 3차 증류수로 희석하여 Atomic Absorption Spectroscopy (Perkin Elmer AA 100)으로 중금속별 농도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

생물체내로의 중금속류의 유입은 1차적으로 환경 중의 중금속 농도, 체내섭식율 및 중금속의 세포막 투과성 등에 따라 유입되어지는 속도 및 축적량이 결정되어지며, 유입된 중금속류의 체내축적율은 해당 중금속의 체내 대사율과 체외배출율에 의해 좌우된다. 따라서 해양 생물체내의 중금속의 농도에 대한 정확한 이해를 위해서는 조사하고자 하는 해양생물의 서식형태 및 먹이습성을 포함한 다양한 생태학적 이해뿐만 아니라 각 생물의 체내 대사과정역시 포괄적으로 파악되어야만 한다. 본 연구에서는 지금까지 환경시료(해수 및 저질)에 대한 중금속 분석결과와 기존의 연구자료 등을 토대로 해양생물을 대상으로 실시한 중금속의 분석 결과를 비교함으로써 광양만 내의 해양생물의 먹이사슬을 통한 생물학적인 농축정도를 조사하고 이미 조사되어진 몇몇의 중금속에 대한 농축계수와 비교하여 보고자 하였다.

3.1. 해수 및 저질의 중금속 농도

광양만에서 17 곳의 조사정점에 대해 채수를 실시하고 중금속을 분석하여 그 결과를 평균치로 환산한 다음 각 항목별로 정리하였다. 해수의 중금속 함량의 평균치를 보면 대부분의 조사항목에서 대단히 낮은 수준의 농도를 보였으며, 아연이 $10.82 \pm 11.99 \mu\text{g/l}$ 로 가장 높았으며, 코발트가 $0.04 \pm 0.09 \mu\text{g/l}$ 로 가장 낮은 농도분포를 나타내었다. 대부분이 $1.07 \sim 3.86 \mu\text{g/l}$ 의 범위에서 나타났으나, 수은이 $6.09 \pm 1.84 \mu\text{g/l}$ 로 다른 조사항목에 비해 높은 것은 주의할 만 한 결과로 생각된다. 저질중의 중금

속 함량은 $0.014 \pm 0.025 \sim 90.71 \pm 43.89 \text{ mg/kg.DW}$ 를 나타내었으며, 분석된 중금속 가운데 수은의 함량이 가장 낮았고, 아연의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 아연의 경우 해수중의 농도 역시 분석된 중금속류 가운데 가장 높은 수치를 나타내어 저질의 농도는 해수의 영향에 기인된 듯하며, 수은의 경우 그 농도가 해수의 경향에 비해 크게 낮아진 것으로 조사되었다. 현재까지 광양만을 대상으로 조사한 보고와 본 조사를 비교하면 국립환경연구원(1996)²⁾ 조사자료의 경우 본 조사결과와 카드뮴과 납에서는 유사하였으나 구리의 경우 국립환경연구원(1996)²⁾의 자료가 약 10배정도 낮으며(최고치의 비교) 수은은 1.4배 가량 높은 것으로 비교되었다. 한국과학기술원(1996)¹⁸⁾ 조사자료와 본 연구결과를 비교하면 망간, 납, 아연, 비소 등의 항목에서 비슷한 농도범위를 보였으며, 본 연구결과가 최고값을 비교할 때 카드뮴은 약 15배, 구리 4.5배, 철 1.5배, 알루미늄 1.3배 크롬 4.4배로 높은 것으로 비교되었다(Table 1).

3.2. 각 해양생물의 중금속 농도

해양생물의 체내 중금속 농도를 파악하기 위해 어류의 경우 가자미, 서대 및 전어를, 패류는 고막, 바지락, 새조개, 굴 및 소라를 선정하여 분석하였다. 먼저 조사된 중금속의 평균농도 중 어류의 분석결과를 살펴보면, 바나듐은 검출되지 않았으며, 수은이 0.004 mg/kg 으로 낮고 나머지 중금속류들은 $0.013 \sim 8.818 \text{ mg/kg}$ 의 범위로 나타났다. 패류의 경우 전체적으로 $0.004 \sim 0.893 \text{ mg/kg}$ 으로 나타나 수은이 검출된 중금속 중에서 가장 낮고 아연이 가장 높은 농도분포를 보였으며, 이는 어류의 결과와 유

사한 것이다. 그러나 어류에서 검출되지 않았던 바나돔이 0.276 mg/kg으로 검출된 점은 차이를 보이고 있으며, 수은, 크롬, 니켈을 제외하면 모든 분석항목에서 어류에 비해 높은 체내 함량을 보였다. 이러한 결과는 패류의 경우 저서 기질을 먹이로 하는 경우가 어류에 비해 높고 이를 통한 축적이 이루어지기 때문인 것으로 생각된다. 새우나 게, 문어 등을 대상으로 분석한 결과 0.009~8.863 mg/kg의 범위를 보여 수은이 가장 낮고 구리가 가장 높은 농도를 보였다. 아연의 경우 기타생물에서도 8.451 mg/kg의 농도를 나타내어 해수와 저질, 그리고 해양생물 모두에서 8.0 mg/kg 대의 일정한 농도분포를 보이고 있다(Table 1). 본 연구결과는 일본 鹿兒灣의 조사결과(크롬 0.02~2.80 mg/kg.wet)¹⁷⁾, 미나마타병이 발생하였을 당시의 수산물에 함유된 수은의 농도(0.04~0.25 mg/kg.wet)¹⁷⁾에 비교시 본 연구결과가 크게 낮음을 알 수 있다. 송 등(1997)은 온산만 일대의 해역에서 패류의 일종인 총알고둥의 카드뮴 함량을 분석하여 0.11~11.81 $\mu\text{g Cd/g D.W.}$ 로 보고한 바 있으며⁷⁾, 백과 이(1998)는 진주담치에서 1.40~25.09 $\mu\text{g/g D.W.}$ 으로 각각 보고하였다⁵⁾. 본 연구의 결과에서 패류 중 소라의 카드뮴 농도범위는 0.004~0.009 mg/kg.wet로 나타나 기존의 온산만을 대상으로 한 연구⁷⁾에 비해 낮은 수치로 판단되나 산출된 결과가 습중량과 건중량 등으로 다르게 표시되어 있어 정확한 비교를 하기는 어렵다. 본 연구에서 광양만과 여러 가지 해황이 비슷하나 특별한 중금속오염원이 없어 대조해역으로 선정한 득량만의 조사결과와 광양만 어패류의 중금속 분석결과를 비교했을 때, 크롬, 납 등의 항목은 농도구간이 거의 중복되어 있으나, 나머지의

중금속류는 대조군의 것이 비해 상당히 높은 농도로서 비교되었다.

3.3. 영양단계별 중금속의 농축비율

해수의 중금속 농도에 대한 각 해양생물의 중금속 함량을 비교하였을 때, 코발트가 850.00의 농축계수를 나타내어 가장 많은 양이 축적되고 있음을 알 수 있었고 아연, 니켈, 크롬 등의 중금속 역시 각각 814.97, 592.19, 576.65로서 높은 농축계수를 나타내고 있었다. 이 외의 중금속은 대개 28.24~159.07의 농축범위를 나타내었으며, 중금속 중 수은은 0.657로서 오히려 환경 중의 농도보다 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 사실에서 수은을 제외한 해수 중의 나머지 중금속이 환경 중의 농도에 비해 농축계수의 범위만큼 높은 비율로 어류의 체내에 축적되어지고 있음을 시사하는 결과로 해석할 수 있다. 또한 해수와 패류의 중금속 농도를 비교한 결과 어류의 비교결과와 유사한 경향을 나타내나 코발트의 농축계수가 3,175.00으로 대단히 높게 나타나고 있으며, 나머지의 중금속류는 64.31~825.51의 농축범위를 나타내었다. 어류와 패류의 농축비율을 비교해보면 크롬과 니켈을 제외한 전체 중금속 항목에서 어류보다 2~5배 가량 높은 농축계수를 나타내고 있다. 이러한 결과는 어류는 유영능력이 크고 비교적 넓은 서식영역을 점유하는데 반해 패류는 저질의 표층이나 내층에서 포서 또는 내서생활을 하기 때문에 서식지의 이동이 어류에 비해 대단히 적어 환경 중의 중금속에 영향을 받을 수 있는 기회가 어류보다 빈번하여 나타난 결과로 생각된다. 기타 해양생물의 체내 중금속 농도를 해수의 농도와 비교한 결과 어패류의 중금속의 축적비율에 비해

중금속별로 비교적 큰 차이를 나타내고 있으며, 특히 구리의 농축계수는 어류 156.07, 패류 321.76에 비해 7~14배 가량 높은 2,296.1을 나타내었다. 또한 크롬, 납, 아연, 니켈 등의 중금속에서는 어패류의 비율에 비해 오히려 낮은 체내축적율을 보였다(Table 1).

전체적으로 광양만의 환경 중의 중금속 농도에 비해 생물체의 농도에서 높은 농도로 축적되고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 이미 잘 알려져 있는 먹이사슬을 통한 생물학적 증폭효과

로 해석할 수 있다. Table 2는 일본의 녹아만을 대상으로 방사성 동위원소를 이용한 중금속의 생물농축계수를 산정한 결과로서 중금속의 농축계수를 제시하였다. 이 자료에서 해수 중의 농도에 비해 이매패류는 11~97의 범위를, 소형어류의 경우 28~118의 농축계수를 각각 나타내고 있는 것으로 보고하고 있으며, 일반적으로 알려진 수은의 농축 비율 역시 먹이사슬을 통해 약 10,000배까지 농축되어질 수 있음을 나타내고 있다.

Table 1. The ratio of biological magnification and the contents of heavy metals in seawater, sediments and marine organisms

Factor	Environment		Marine organism			Ratio of biological magnification			
	Sea water ($\mu\text{g}/\ell$)	Sediment ($\text{mg}/\text{kg.DW}$)	Shellfish (mg/kg)	Fish (mg/kg)	Others ^{b)} (mg/kg)	F/W	S/W	O/W	S/P
As	1.07 $\pm$ 0.87	8.85 $\pm$ 4.16	0.142	0.048	0.061	28.24	132.71	57.01	0.016
Cd	0.34 $\pm$ 0.36	0.34 $\pm$ 0.26	0.066	0.013	0.035	38.24	194.12	102.94	0.195
Cr	3.64 $\pm$ 9.35	49.69 $\pm$ 11.28	0.861	2.099	0.443	576.65	236.54	121.70	0.018
Pb	2.97 $\pm$ 7.59	23.07 $\pm$ 9.95	0.191	0.091	0.076	30.64	64.31	25.59	0.009
Zn	10.82 $\pm$ 11.99	90.71 $\pm$ 43.89	8.932	8.818	8.451	814.97	825.51	781.05	0.099
Cu	3.86 $\pm$ 3.81	20.57 $\pm$ 6.37	1.242	0.614	8.863	159.07	321.76	2,296.1	0.061
Hg	6.09 $\pm$ 1.84	0.014 $\pm$ 0.025	0.004	0.004	0.009	0.657	0.66	1.48	0.286
Co	0.04 $\pm$ 0.09	9.72 $\pm$ 3.89	0.127	0.034	0.056	850.00	3,175.00	1,400.0	0.013
V	1.66 $\pm$ 1.78	60.65 $\pm$ 28.26	0.276	ND	0.062	-	166.27	37.35	0.005
Ni	1.28 $\pm$ 2.14	23.70 $\pm$ 8.49	0.558	0.758	0.464	592.19	435.94	362.5	0.024

HM : heavy metals, F/W : Fish/Seawater, S/W : Shellfish/seawater, O/W : Others/seawater, S/P : Shellfish/sediment

a) The concentrations of heavy metal were on the wet weight

b) Others presents that of inclusive shrimp, crab, octopus, etc

Table 2. The biological magnification rate of heavy metal(Hg) at variety trophic level

Seawater ng/ ℓ	Small plankton ng/g(DW)	Large Planktonng/g(DW)	Crustacean ng/g(WW)	Bivalve ng/g(WW)	Small fish ng/g(WW)
1~2	27~140	41~370	15~117	11~97	28~118

沿岸域保全のための海と環境科学, 平野敏行編

D.W. : Dry Weight, W.W. : Wet Weight

본 연구의 결과를 이에 비교하면 수은의 경우 어류가 0.657, 패류가 0.66, 기타생물이 1.48로 조사되었으나 일본의 자료에서는 갑각류의 경우에 15~117, 패류의 경우 11~97, 어류의 경우 28~118로서 본 연구의 결과가 낮게 나타났음을 알 수 있다. 그러나 다른 중금속류들의 경우 크롬(121.70~576.65), 아연(781.05~825.51), 코발트(850.0~3,175), 니켈(362.5~592.19) 등으로 훨씬 높은 수치를 나타내고 있어 이와 같은 중금속류에 대한 특별한 관리가 요구된다.

4. 결 론

광양만 해역을 대상으로 해수, 저질 및 어패류와 기타 해양생물을 대상으로 바나듐, 크롬, 코발트, 니켈, 구리, 아연, 비소, 카드뮴, 수은 및 납 등 총 10개 항목의 중금속을 분석하고, 그 결과를 비교, 분석하여 각 영양단계별 중금속의 생물학적 증폭효과를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저 해수의 중금속 함량의 평균치를 보면 대부분의 조사항목에서 대단히 낮은 수준의 농도를 보였으며, 대부분이 $1.07 \sim 3.86 \mu\text{g/l}$ 의 범위에서 나타났다. 저질 중의 중금속 함량은 $0.014 \pm 0.025 \sim 90.71 \pm 43.89 \text{ mg/kg.DW}$ 를 나타내었으며, 분석된 중금속 가운데 수은의 함량이 가장 낮았고, 아연의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 해양생물의 체내 중금속 농도를 분석한 결과 어패류의 경우 전체적으로 $0.004 \sim 0.893 \text{ mg/kg}$ 으로 나타나 수은이 검출된 중금속 중에서 가장 낮고 아연이 가장 높은 농도분포를 보였다. 해수의 중금속 농도에 대한 각 해양생물의 중금속함량을 비교하였을

때, 코발트가 850.00의 농축계수를 나타내어 가장 많은 양이 축적되고 있음을 알 수 있었고 아연, 니켈, 크롬 등의 중금속 역시 각각 814.97, 592.19, 576.65로서 높은 농축계수를 나타내고 있었다. 이 외의 중금속은 대개 28.24~159.07의 농축범위를 나타내었다. 또한 해수와 패류의 중금속 농도를 비교한 결과 어류의 비교결과와 유사한 경향을 나타내나 코발트의 농축계수가 3,175.00으로 대단히 높게 나타나고 있으며, 나머지의 중금속류는 64.31~825.51의 농축범위를 나타내었다.

사 사

본 연구과제는 환경부지정 전남지역환경기술개발센터의 연구비 지원에 의해 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

1. 박석남. 광양만 대도주변 잡피발의 생물상과 어류의 섭식생태. 부경대학교 대학원 박사학위논문 441 (1997).
2. 국립환경연구원. 여천공단 주변 환경오염실태 현지조사 결과보고서(1단계). 240 (1996).
3. 김신정. 광양만 동부해역 퇴적물 특성과 저서성 유공충 군집 분포. 부산수산대학교 대학원 석사학위논문 74 (1995).
4. 박점숙. 광양만에서의 잔류 유기인 농약성분. 부산수산대학교 대학원 석사학위논문 50 (1995).
5. 백수민, 이인숙. 온산연안에 서식하는 진주

- 담치(*Mytilus edulis*)의 중금속 생물농축에 관한 연구. 한국생태학회지, 21, 217~224 (1998).
6. 서호영. 서해립. 광양만의 부유성 요각류 출현량의 계절변동. 한국환경생물학회지, 11, 26~34 (1993).
 7. 송미연, 최병래, 박경숙, 이인숙. 온산만의 퇴적물과 총알고둥(*Littorina brevicula*)내 중금속 분포. 한국생태학회지, 20, 51~60 (1997).
 8. 신상호. 광양만 바지락 (*Tapes philippinarum* : bivalvia)의 성장과 생산. 여수대학교 대학원 석사학위논문 118. (1996).
 9. 안용락. 광양만 잘피밭에 서식하는 십각류 군집의 계절변동. 부산수산대학교 대학원 석사학위논문 70 (1996).
 10. 위인선, 전순배, 이종빈, 나명석. 광양만 미생물 군집에 관한 환경요인 분석. 한국환경생물학회지, 11, 11~16 (1993).
 11. 유수현. 서남해역에서 성게의 배우자와 배아를 이용한 연안해수 환경평가에 관한 연구. 전남대학교 석사학위논문, 73 (1992).
 12. 유춘만, 주현수, 박종천, 이우범, 이원교. 말뚝성게(*Hemacentrotus pulcherrimus*)의 배우자를 이용한 광양만 해수의 생물학적 수질평가. 한국환경생물학회지 16, 319~327 (1998).
 13. 윤성진. 광양만 주변 해역의 동물플랑크톤 분포 : 수괴지표종을 중심으로. 한국해양대학교 대학원 석사학위논문 114 (1998).
 14. 최승호. 광양만 주변 해역의 식물플랑크톤의 군집특성. 한국해양대학교 대학원 석사학위논문 97 (1998).
 15. 최정민. 광양만과 여수해만의 퇴적환경. 여수대학교 대학원 석사학위논문 66 (1997).
 16. 추현기. 광양만 대도주변 어류의 종조성 변화. 부경대학교 대학원 석사학위논문 59 (1997).
 17. 平野敏行編, 沿岸域保全のための海と環境科學. 東京, 570 (1986).
 18. 한국과학기술원. 여천공단 주변마을 환경영향 및 대책에 관한 연구보고서. 1099 (1996).
 19. APHA, AWWA, AEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed., APHA, Washington (1992).
 20. Sobel, A.E., H. Yuska, D.D. Peters, and B. Kramer. The biochemical of Pb. J. Biol. Chem. 132, 239~265 (1940).
 21. Takamatsu, T, M. Kawashima, and M. Koyama. General distribution profiles of thirty-six elements in sediments and manganese concretions of Lake Biwa. Natl. Inst. Environ. Stud. Res. Rep. 75, 1~18 (1985).