

이때 패류를 지표종으로 이용한 해양환경오염 연구

이 수 형

한국해양연구소 해양화학연구부

=Abstract=

Marine Environmental Pollution Studies Using Bivalves as a Bioindicator

Soo Hyung Lee

Chemical Oceanography Division, KORDI, Ansan P. O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Marine environmental pollution studies using bivalves as an indicator organism are described. The utility of the Mussel Watch in providing a measure of environmental persistent pollutants is also reviewed. Finally, the data from the Korea Mussel Watch in 1990 are presented and compared with those from other regions in the world.

서 론

PCB(polychlorinated biphenyls), 유기염소계 살충제 등의 유기 독성 화합물이나 카드뮴, 수은, 납, 구리, 크롬, 비소 등의 중금속은 환경에 유입되면 그 양이 극히 미량일지라도 일단 하등 동·식물의 생체 내에 생물농축(bioaccumulation)될 뿐만 아니라 먹이사슬을 통해 생물확대(biomagnification)됨으로써 결국은 우리 인간에게까지 해를 미치는 무서운 지속성 오염 물질(persistent pollutant)이다. 그 좋은 예로 1956년부터 일본 규슈에서 발생하여 수천 명의 무서운 신경 장애 환자를 발생시켰던 미나마타병은 수은중독 사건이다. 이 병이 1956년에 처음 발생하기 시작해서 1989년 말까지 규슈의 구마모토현과 가고시마현에서 미나마타병으로 판명된 환자 수는 모두 2,266명이었다(구와바라, 1990). 이 중 57명은 부모로부터 유전된 태아성 환자이며, 이 병에 의한 사망자만도 30여년간에 걸쳐 무려

938명에 이르고 있다. 그밖에도 미나마타병이 아닌가 하고 의심되는 환자 수가 3,500여명이나 된다고 한다. 또한 PCB는 1968년 일본의 유쇼병(Yusho disease)을 야기시킨 독성물질인데 이 병으로 1,200여명이 피부가 검게 변하고 발진이 생기는 피부병을 앓는 중독 현상을 일으켰음에도 불구하고 여전히 전기 절연체, 변압기, 플라스틱 제조 등에 사용됨으로써 환경에 널리 퍼져 있다(Clark, 1992).

어느 특정 해역에서 지속성 오염 물질의 오염도를 측정하는 방법에는 해수나 해저 퇴적물, 또는 이 해역에 서식하는 정착성 생물(indigenous biota)을 이용하는 방법 등 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 해수의 수질 분석을 통한 오염도 측정 방법은 해수 자체가 해류, 조석 등으로 인해 시시각각으로 유동함으로써 1 - 2회의 측정만으로는 정확한 오염도 조사가 곤란하며, 또 해수 중의 대부분 지속성 오염 물질 농도는 10-12 - 10-15 g/g(Goldberg *et al.*, 1978)으로 극히 낮아 분석하기에 매우 까다로운 단점이 있다. 해저 퇴적물의

경우도 오염 물질이 단기간 내에 퇴적되는 게 아니고 오랜 시일이 걸려야 하며 그것도 연안처럼 조석차가 심하고 생물 활동이 활발한 곳에서는 난류(turbulence)와 생물교란(bioturbation) 때문에 규칙적인 퇴적을 기대하기가 어렵다. 이와 반면에 이매패류(bivalves)와 같은 연체동물(mollusks)들은 일생을 통해 활동 범위가 거의 한 지역에 국한되면서도 중금속이나 유기 독성 화합물, 또는 방사성 물질 등을 생물농축 시키기 때문에 이들 오염 물질의 오염 감시 목적으로 이용할 수 있다. 이러한 오염 조사 또는 오염 감시 목적으로 이용되는 생물들을 지표생물(indicator organisms) 또는 감시생물(sentinel organisms)이라고 한다(NAS, 1980).

흔히 오염된 해역에서는 이 환경에 적응하는 생물 종이 출현하게 되는데 이것을 기회종(opportunistic species)이라고 해서 오염에 대한 지표종(indicator species)으로 이용하기도 한다(Clark, 1992). 그런데 이 지표종이라는 용어는 오염뿐만 아니라 다른 영역에서 사용하기도 한다. 예를 들면 부유성인 유생(larva)들은 대부분 자체의 유영 능력이 없어 해류에 의해 유동이 됨으로써 어떤 특정 유생들을 해류 유동 규명을 위한 지표종으로 이용할 수 있다(이, 1992). 따라서 앞으로는 "지표 생물"과 "지표종"이라는 용어를 인위적으로라도 구분해서 사용하는 것을 제안하고 싶다.

지표 생물을 이용한 오염 감시 방법은 생물 감시(biomonitoring)라고 하며, 전 세계적으로 가장 널리 수행되고 있는 생물감시 프로그램으로는 "세계 홍합감시(International Mussel Watch)"를 들 수 있다(NAS, 1980; IMWC, 1992). 홍합감시 프로그램의 일차적인 목적은 연안 해역에서의 미량 오염 물질 농도에 대한 장기적인 정보를 제공하고, 어떤 오염 물질의 생체 중의 농도가 비정상적으로 높은 해역을 찾아냄으로써 오염의 조기 경고 체제(early warning system) 역할을 하는 것이다. 본 논문에서는 홍합감시를 중심으로 이매패류를 지표종으로 이용한 해양 환경오염 연구에 대하여 소개하기로 한다.

오염지표종

우선 지표 생물을 이용한 연안 해역의 오염도 측정 방법의 유용성을 구체적으로 열거하면 다음과 같다(Goldberg, 1986).

1. 지표 생물은 해수 중의 오염 물질을 생체에 수백 배 내지 수백만배 농축시켜 농도를 크게 함으로써 분석이 용이하다.

2. 지표 생물은 국지성 생물이므로 특정 해역의 오염 상태에 대한 정보를 제공해 준다.

3. 지표 생물을 이용하므로 생물유효성(bioavailability) 조사를 별도로 할 필요가 없다.

4. 진주담치(*Mytilus edulis*)와 같이 세계적으로 널리 분포되어 있는 생물 종을 이용하면 오염 물질의 지역간, 국가간 오염도 비교가 가능하다.

5. 지표 생물은 오염 물질에 대한 내성(tolerance)이 특히 강하므로 일반 생물이 폐사된 오염 해역에서도 살아 남아 오염도에 대한 정보를 제공해 줄 수 있다.

6. 지표 생물은 종(species)이 대량 분포되어 있어서 매년 1 - 2회 정도 정기적으로 시료 채취를 하여도 그 분포에 큰 영향을 주지 않는다.

7. 지표 생물은 여러 가지 현장 실험을 위해 한 해역에서 다른 해역으로 이식(transplantation)이 가능하다.

8. 굴이나 홍합 등의 지표 생물은 우리 인간에게 매우 유용한 수산물이기 때문에 오염 물질의 생체부하량(body burden)을 이용하여 국민 보건에 대한 안전 기준을 설정할 수 있다.

9. 이매패류와 같은 지표 생물 내에서의 오염 물질의 생물학적 반감기(biological half-life)는 보통 수개월 정도로써 반감기가 하루 이하 되는 해수나 일년 이상 되는 퇴적물을 이용한 오염 감시가 적합하지 않는 경우 지표 생물을 이용하는 방법이 요긴하게 활용될 수 있다.

이와 반면에 지표 생물을 이용한 오염 측정 방법에는 다음과 같은 난점도 많이 내포되어 있다(NAS, 1980).

1. 생물학적 변수가 많다. 예를 들면 동일종이라 하더라도 지표 생물의 연령, 성별, 시료의 채취 시기 및 채취 위치에 따라 오염 물질의 농도가 다를 수 있다.

2. 지표 생물종에 따라 오염 물질 종류에 따른 생물 농축 선호도가 다르다.

3. 수온이나 염분 변화에 따라 오염 물질 흡수가 영향을 받는다.

4. 생물 개체마다 오염 물질 흡수에 대한 고유 변이성(inherent variability)을 가지고 있다.

지표 생물을 이용한 지속성 오염 물질의 환경오염을

연구하는데는 이상에서 언급한 바와 같은 장·단점이 있으므로 이점을 잘 감안해서 이 방법을 활용하지 않으면 안될 것이다.

이미 위에서 언급한 바와 같이 오염지표종은 정착성 생물이고, 시료 채취가 용이하며, 세계적으로 널리 분포되어 있으면서 오염 물질을 체내에 잘 축적시키는 특징을 가져야 하는데, 이 목적에 가장 적합한 생물종이 바로 이매패류인 홍합과 굴 등이다.

우리 나라에 서식하는 홍합속(*Mytilus*)의 종으로는 홍합(*Mytilus coruscus* Gould, 1861), 진주담치로 불리는 두 종(*Mytilus edulis* Linnaeus, 1758과 *M. edulis galloprovincialis* Lamarck, 1819) 그리고 동해담치(*Mytilus grayanus* Dunker, 1853) 등 4종이 알려져 있다(유, 1976; 제, 1989). 그러나 우리 나라 연안에 주로 많이 서식하는 홍합종은 진주담치와 홍합이다(제 등, 1990). 굴의 경우는 참굴(*Crassostrea gigas*)이 남해안을 중심으로 폭넓게 분포되어 있고 벚굴(*Ostrea denselamellosa*)도 일부 분포를 보이고 있으나 그 밖의 종은 서식 분포에 대해 깊이 있게 연구된 바 없다. 따라서 우리 나라에서 지표 생물을 이용한 지속성 오염 물질의 전국 연안의 오염도 조사를 위해서는 홍합이 가장 적합하다고 할 수 있다. 이 홍합을 이용한 연안 해역의 오염 감시 활동이 바로 “홍합 감시(Mussel Watch)”인 것이다. 그러나 넓은 의미로는 홍합 외에 굴 등 다른 지표 생물을 이용한 오염 감시 활동도 모두 홍합 감시에 포함된다고 하겠다.

홍합 감시 연구에 고려해야 할 사항

1. 오염 물질 성분의 손실 및 오염 문제

지속성 오염 물질은 대부분 생체 중에서 미량 농도로도 아치사효과(sub-lethal effect) 등 생물에 피해를 유발할 수 있기 때문에 측정하고자 하는 농도 역시 대체로 낮은 게 특징이다. 따라서 시료 채취 시부터 실험실에서 분석이 완료될 때까지 오염 물질 성분이 손실되거나 오염되지 않도록 주의해야 한다. 특히 시료를 처리하는 과정에서 성분이 손실 또는 오염되는 경우가 많은 데, 가령 패각을 除殼(shucking)할 때 패각 내에 들어 있는 해수를 제거하는 과정에서 혈액 림프(hemolymph)가 함께 손실되지 않도록 조심해서 다루어야 하며, 시료를 건조시킬 경우에도 가급적 동결건

조(freeze drying)를 통해 측정 성분의 휘발을 막아야 한다. 그러나 시료 건조의 경우는 측정 성분과 건조 목적에 따라 오븐 건조 방법도 사용이 가능하며 이때도 외부로부터의 오염을 방지해야만 한다.

2. 시료 채취 시기 및 장소

홍합과 굴 등 이매패류 생체 중의 오염 물질 농도와 생체 부하량(body burden)은 계절에 따라 변한다(NAS, 1980). 따라서 전국 연안의 오염 조사를 위한 시료 채취는 매년 동일한 계절에 하는 것이 바람직하다. 특히 산란기 때는 오염 물질이 알과 함께 체외로 배출되기 때문에 시료 채취 시기는 산란기로부터 2개월 전이 가장 적당하다고 알려져 있다(NAS, 1980). 우리 나라의 경우 지역에 따라 산란 시기가 다르기는 하지만 대체로 남해안에서 진주담치는 3 - 4월(유 등, 1970), 참굴은 늦은 봄에서 이른 여름 사이가 되므로 시료 채취에 적당한 시기는 이론적으로는 각각 늦은 겨울과 이른 봄이 좋다고 하겠다. 그러나 생물종과 지역에 따라 산란 시기가 다르고 또 기상도 시료 채취 선택에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 우리 나에서는 10 - 11월에 집중적으로 생물 시료를 채취하는 것도 한 방법이 아닌가 생각된다.

시료 채취 장소는 기본적으로 한 지역을 대표할 수 있는 지점을 선택해야 한다. 특히 오염이 심한 해역은 몇 개의 지점에서 연중 수회 시료를 채취함으로써 정밀 조사를 하는 것이 바람직하다. 그러나 생물 시료가 원하는 지점에 없는 경우가 많고 또 여러 해역에서 연중 수회 시료 채취를 한다는 것도 현실적으로 어려워 이런 때에는 차선책을 강구할 수 밖에 없다. 전국 또는 지구 규모의 오염 모니터링을 위한 시료 채취는 일년에 1회 정도라도 충분히 목적을 달성할 수 있다.

3. 생물 시료의 연령 및 성별

오염 물질에 따라서는 생체 중의 농도가 홍합의 연령(또는 패각 크기)에 따라 변하기도 한다(NAS, 1980). 그러나 어떤 일반적인 규칙성을 가지고 변화하는 않으며 오염 물질의 종류와 생물 종에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. Boyden(1974)은 이매패류의 무게와 중금속 부하량과의 관계를 다음 식으로 나타낸 바 있다.

$$Y = aW^b \quad (1)$$

(1)식에서 Y는 생물 개체 당 중금속 부하량이고 W는 생물 개체의 무게이며 a와 b는 정수이다. $b=1$ 이면 패류의 중금속 부하량은 그 무게에 비례하게 되고, $b < 1$ 이면 무게가 작은 패류가 무게가 큰 패류에 비해 체내의 중금속 농축 속도(metal accumulating rate)가 빠르며, 반대로 $b > 1$ 이면 무게가 큰 패류의 중금속 농축 속도가 더 빠름을 나타낸다. 우리 나 카드뮴과 크롬의 부하량은 대체로 진주담치의 무게에 비례하는 반면 구리와 아연은 무게가 작은 진주담치의 체내에 보다 빠른 속도로 농축되는 것으로 조사되었는데 이 결과는 Boyden(1974)의 연구 결과와 잘 일치하고 있다(이 등, 1982).

따라서 이매패류 등의 지표 생물을 이용한 해양 오염 조사에 있어서는 각 지역 시료들의 조건을 가능한 동일하게 유지하기 위하여 殼長 크기가 일정범위 안에 들어오는 것만 선택해서 오염 물질 농도를 측정하는 게 바람직하다. 지역간 시료의 각장 차이는 10 mm가 넘지 않는 것이 이상적이지만 미국에서는 최대 30 mm 차이까지도 허용되고 있다(NAS, 1980). 우리나라에서 홍합 시료의 각장이 50 - 80 mm 정도 되면 대략 2 - 3년 생으로 오염 조사 목적으로 이용하기에 적당하다고 하겠다.

대부분의 홍합 감시에 의한 오염 조사에서는 홍합 개체의 암수 구별을 하지 않는 게 보통이다. 그러나 홍합종과 오염 물질에 따라서는 암컷과 수컷 사이에 생물 농축되는 선호도가 뚜렷하게 다르다는 보고도 있다(Alexander and Young, 1976; Watling and Watling, 1976). 그러나 우리 나에 가장 폭넓게 분포되어 있는 *Mytilus edulis* 종에 대해서는 아직까지 암수 간에 중금속의 경우 이러한 생물 농축 선호도 차이가 있다는 보고가 나와 있지는 않으나(NAS, 1980), 기타 오염 물질 등에 대해서는 보다 많은 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

4. 생물 시료의 淸臟(depuration)

홍합과 굴 같은 이매패류는 여과식자(filter feeder)로서 소화관에는 플랑크톤류의 먹이 생물은 물론 해수나 퇴적물로부터 유입된 무기입자들도 함유되어 있다. 따라서 이매패류를 이용한 해역의 중금속 오염 조사를 위해서는 현장에서 시료를 채취한 후 깨끗한 해수에 일정 시간 동안 담가 뚫으로써 소화관에 들어 있던 먹이 찌꺼기나 퇴적물 등을 체외로 배설시켜야 한다. 그

렇지 않으면 플랑크톤류의 먹이 찌꺼기나 퇴적물 중의 오염 물질 성분이 지표생물의 생체 분석에 결정적인 영향을 줄 수도 있기 때문이다. 이러한 중금속 오염 조사용 홍합 시료의 청장 시간은 금속에 따라 변화가 크긴 하지만 최소한 48시간 이상 되어야 효과적인 것으로 보고되고 있다(이 등, 1982). 그러나 생물 시료의 청장은 생물종과 오염 물질 따라 실시 여부를 결정해야 하지만, 시료처리시 해부해서 소화관 내의 내용물을 완전히 제거해 버리는 것도 한 방법일 수 있다(Latouche and Mix, 1982). 반면에 유기 독성 오염 물질 조사에서는 생물 시료의 청장 여부가 별로 문제는 되지 않는다(NAS, 1980).

5. 고유 변이성(inherent variability)

비록 채취 시기 및 장소, 연령(또는 패각 크기), 성별 등 모든 조건이 같다고 해도 이매패류 지표 생물 개체간에는 고유한 차이가 있기 때문에 오염 물질 농도 역시 차이가 있을 수 있다. 이 생물 개체마다의 고유한 차이를 고유 변이성이라고 한다. 예를 들어 동일 해역에 서식하는 *Mytilus edulis* 종의 홍합 생체 중의 카드뮴 농도는 구리, 납, 아연에 비해 개체간의 농도 차이가 작은 것으로 알려져 있다(NAS, 1980). 이 생물 개체마다의 고유 변이성 때문에 지표 생물을 이용한 해양 오염 조사에서는 일정 숫자 이상의 개체 중의 오염 물질 농도를 측정해야만 한다. 이 오염 물질 농도가 통계적인 의미를 갖기 위한 최소한도의 생물 개체수는 25개로 보고되고 있다(NAS, 1980). 그러나 조사 해역 숫자가 많을 경우에는 분석해야 할 시료 수가 기하급수적으로 많아지기 때문에 현실적으로 수행하기가 매우 어려워진다. 이럴 때에는 25개 생체 시료를 합쳐 균질화(homogenization)시킴으로써 한 개의 시료로 만들어 사용하면 간편하다. 또한 홍합 감시와 같은 정기적인 오염 모니터링 목적을 위해서는 지표 생물의 생체를 해부해서 부위별로 오염 물질 농도를 분석할 필요는 없으며 생체 전체를 분석하는 것으로도 충분하다고 하겠다.

6. 생물 시료의 분석

실험실에서 생체 중의 지속성 오염 물질 함량분석시 측정 성분의 손실이나 오염없이 시료를 전처리(pretreatment) 한 후 분석 장비를 사용해서 그 농도를 정확하게 측정해 내는 일이 결코 쉬운 일은 아니다.

많은 분석자들은 실험실의 공기, 인체, 실험 기구, 시약 등으로부터 오염시키거나 아니면 시료 처리 과정에서 측정 성분의 손실을 야기시킴으로써 잘못된 분석 결과를 보고하고 있다. 더욱 문제가 되는 것은 분석자가 분석 결과에 대한 검증없이 자료를 발표하는 일이다. 생체 중의 지속성 오염 물질은 대부분 미량(ppm내지 ppb)이기 때문에 분석 결과의 품질 보증(quality assurance)과 품질관리(quality control)를 하지 않으면 큰 오류를 범할 수 있는 것이다. 분석 방법의 정확도(accuracy)와 정밀도(precision) 확보를 통한 분석 자료의 품질 보증 및 품질관리를 위하여는 미국 표준국(National Institute of Standards and Technology), 캐나다 국립연구소(Research Council of Canada) 또는 일본 공해연구소(National Institute for the Environmental Studies) 등에서 제조 판매하는 공인된 표준물질(Standard Reference Material)을 구입해 분석 때마다 사용하거나 실험실간 상호 검증(inter-laboratory calibration) 확인 실험을 통해 꾸준히 분석 기술을 향상시켜야 한다.

국외의 연구 현황

세계적으로 굴이나 홍합과 같은 지표 생물을 이용한 해양 환경오염을 본격적으로 연구하기 시작한 것은 1960년대 말부터였다(Sprague, 1970; Butler *et al.*, 1971; Phillips, 1977; 1980). 1978년 12월에는 스페인의 바르셀로나에서 그동안 축적된 홍합 감시(mussel watch) 연구에 대한 정보 교환을 위하여 처음으로 워크숍을 개최하였다. 이 워크숍에서는 두 가지 주제가 제기되었는데, 첫째는 오염 현황에 관한 실제적인 정보를 얻는 것과 둘째는 인간이 배출하는 오염 물질 의한 오염도의 전 지구적 자료의 비교와 세계 연안에 대한 기초과학적인 지식을 얻는 일이었다(森田, 1989). 미국에서는 1976년 처음으로 Mussel Watch Program이 시작되어 전국 연안의 홍합과 굴을 지표 생물로 하여 그 속의 중금속, PCB, 석유탄화수소(petroleum hydrocarbons), 초우라늄원소(transuranic elements) 등에 대한 오염 조사를 계속 실시해 오고 있다(Goldberg *et al.*, 1983; NOAA, 1987; 1989). Lauenstein *et al.*(1990)은 이 프로그램을 통해 1980년대에 얻은 홍합과 굴 중의 중금속 농도를 1970년대 자료와 비교해 본 결과 전국적으로 구리는 증가한 반면 카드뮴과 납은 오히려

감소하였으며 그밖에 은, 아연, 니켈 등은 별다른 차이가 없는 것을 확인하였다. 이와는 별도로 캘리포니아주에서도 "State Mussel Watch" 프로그램을 1977년부터 지금까지 연 1회씩 꾸준히 계속해 오고 있다(Martin, 1985). 이 프로그램의 특징적인 것은 자연산 홍합 중의 오염 물질 조사뿐만 아니라 점오염원 근처의 오염심화지역(hot spot)에 "가두리 홍합 측정망(caged mussel monitoring)"을 설치하고 지속적으로 오염을 감시하는 방법을 병행하고 있는 점이다. 한편 호주에서는 Victoria주의 Port Phillip Bay에서 1970년대부터 계속 지표 생물을 이용한 해역의 오염 감시 활동을 펴 오고 있다(Phillips *et al.*, 1992). 그밖에도 국제적으로 지표 생물을 이용한 해역의 오염 측정에 대한 공동 노력은 꾸준히 계속되고 있으며(NAS, 1980; IOC Summary Report, 1981; ICES, 1988; IMWC, 1992), 오염 지표 생물을 이용한 오염도 측정에 관해서도 활발한 연구들이 지속적으로 수행되고 있다(Ayling, 1974; Hung *et al.*, 1981; Hammond, 1982; Moore, 1987; Martin *et al.*, 1988; 森田, 1989; Higashiyama, 1991; Shchekaturina *et al.*, 1995; Granby and Spliid, 1995). 세계적으로 홍합 감시와 관련된 연구 자료들은 Cantillo(1991)가 취합해서 일차 정리한 바 있다.

국내의 연구 현황

우리 나라의 경우 1970년대까지는 수산 생물에 대한 중금속 조사가 간헐적으로 있었을 뿐(원, 1973; 이 등, 1975; 수산진흥원, 1983; 도 등, 1981) 오염 지표 생물을 이용한 연안 해역의 오염도 측정에 대해서는 체계적인 조사 연구가 없었다(이 등, 1982). 그러다가 1980년대에 들어와서야 비로소 진주담치(*Mytilus edulis*)를 지표 생물로 이용한 해역의 중금속 오염 측정에 관한 연구가 체계적으로 시작되었으며(이 등, 1982), 1987 - 1990년까지 3년에 걸쳐서는 홍합 감시 프로그램의 일환으로 전국 연안에 서식하는 홍합 중의 중금속 함량을 조사하였다(이 등, 1988; 1989; 1990). 이 과정에서 홍합 중의 중금속 분석을 위한 시료의 간단한 전처리 방법이 개발되기도 하였다(Lee *et al.*, 1989). 반면에 PCB, PAH(polycyclic aromatic hydrocarbons), DDT(dichlorodiphenyl trichloroethane) 관련 화합물, TBT (tributyltin) 등 지표 생물을 이용한 유기 독성

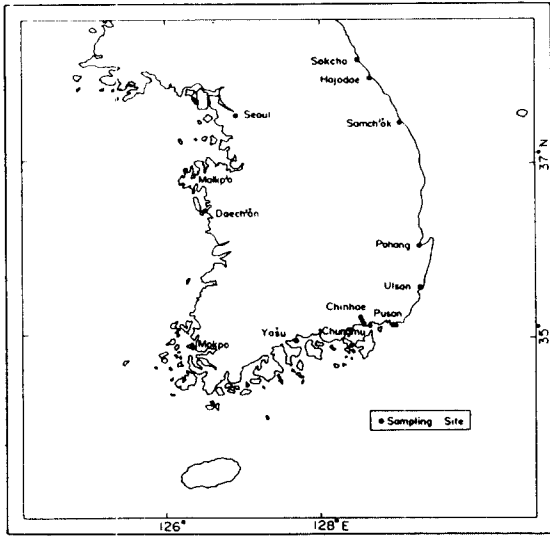


Fig. 1. Map showing mussel sampling sites (Lee *et al.*, 1990)

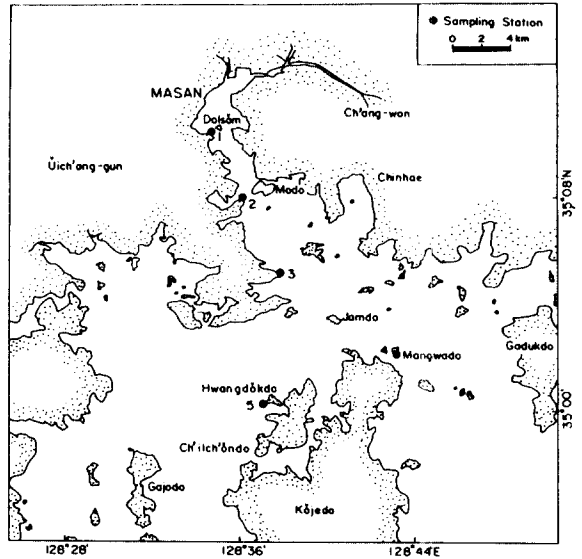


Fig. 2. Map showing mussel sampling sites in Chinhae Bay (Lee *et al.*, 1990).

화합물에 대한 연구는 1990년대에 들어와서야 본격적으로 연구되기 시작하였다(Kahng, 1995; 황, 1994).

참고로 이 등(1990)은 1990년에 조사한 전국 연안 12개 해역, 16개 정점에서 자연산 홍합 시료를 채취해서 카드뮴, 구리, 납, 아연, 철, 망간, 수은, 니켈, 크롬, 비소, 알루미늄, 스트론튬, 티탄, 몰리브덴 등 14가지 중금속 농도를 측정하였는데 그 조사 정점과 일부 조사 결과가 Fig. 1 - Fig. 12에 나와 있다. 마산 내만은 진주담치 중의 구리, 아연, 망간, 니켈, 크롬 농도가 전 연안에서 가장 높고 또 납과 철 농도 역시 비교적 높아 전체 조사해역 중 가장 중금속 오염이 심한 곳으로 나타났다(Fig. 4, 6, 8, 10, 11). 다소 특이한 것은 카드뮴은 서해 연안에서, 그리고 수은과 비소는 동해안의 속초 연안이 가장 높게 나타난 사실이다(Fig. 3, 9, 12). 홍합과 진주담치의 중금속 농도를 비교해 볼 때 카드뮴과 수은은 홍합이 높은 반면 기타 금속에서는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 또한 본 조사 결과를 외국의 조사 자료와 비교해 보면 우리나라 홍합 중의 중금속 농도는 마산 내만을 제외하고는 아직 자연 상태 농도 수준을 나타내고 있는데 이것은 아직 우리나라 산업화 역사가 짧기 때문이 아닌가 생각된다 (Table 1).

Kahng(1995)은 1987 - 1994년까지 마산 만에서 홍합 중의 총 PCB, BHC(benzenehexachloride), TBT 함량 등을 조사하였는데 1987 - 1990년 자료는 이 등(1990)의 홍합 감시 프로그램에서 채취해서 보관하고 있던 시료를 분석하여 얻은 것이다. 이 조사에서 총 PCB농도는 '87년부터 '90년까지 급격한 추세를 보이다가 '91년 이후 현격한 감소를 나타내는데 이것은 '87 - '90년 사이에 수행된 퇴적물 준설의 영향 때문이며, 또 내만에서 외양으로 나가면서 농도가 감소하는 양상을 보이는 것은 마산 내만이 오염원임을 말해 준다(Fig. 13). 반면에 BHC에서는 내외만 사이에 뚜렷한 농도 차이를 보이지 않는데 이것은 마산 내만이 이 물질의 오염원이 아님을 암시한다(Fig. 14). TBT는 선박이나 가두리 양식장의 방오페인트(antifouling paint)에 방오제(antifoulant)로 사용되는데 해양에 유입된 후 비표적생물(non-target organisms)에게까지 부작용을 일으켜 해양 생태계 파괴뿐만 아니라 수산 생물인 굴, 진주담치, 어류 등에도 영향을 미쳐 인간의 건강을 위협하고 있다. 황(1994)이 '94년 6월 진해만에서 조사한 진주담치와 굴 중의 TBT농도는 마산 내만이 높고 외양으로 나가면서 감소하는 추세를 나타내고 있으며, 원문만은 진주담치 0.64 ppm, 굴 0.61 ppm으로 마산

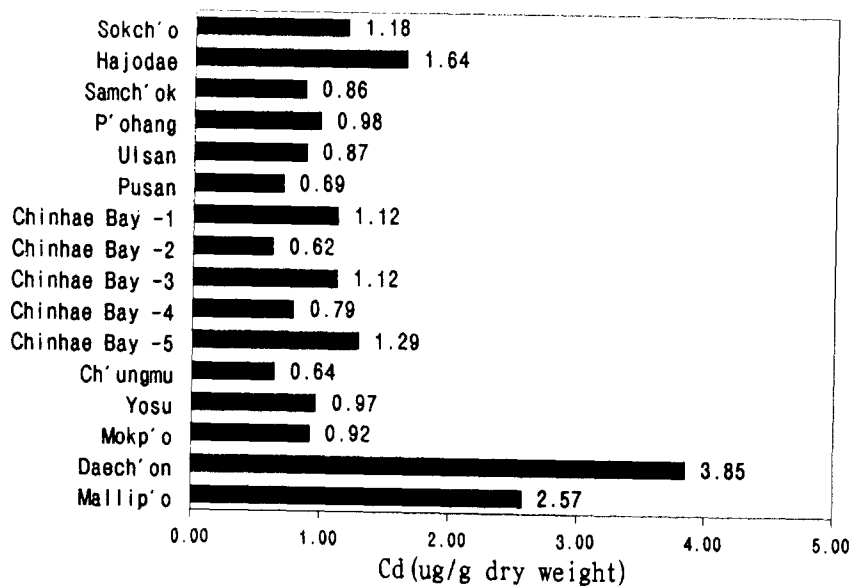


Fig. 3. Cadmium concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

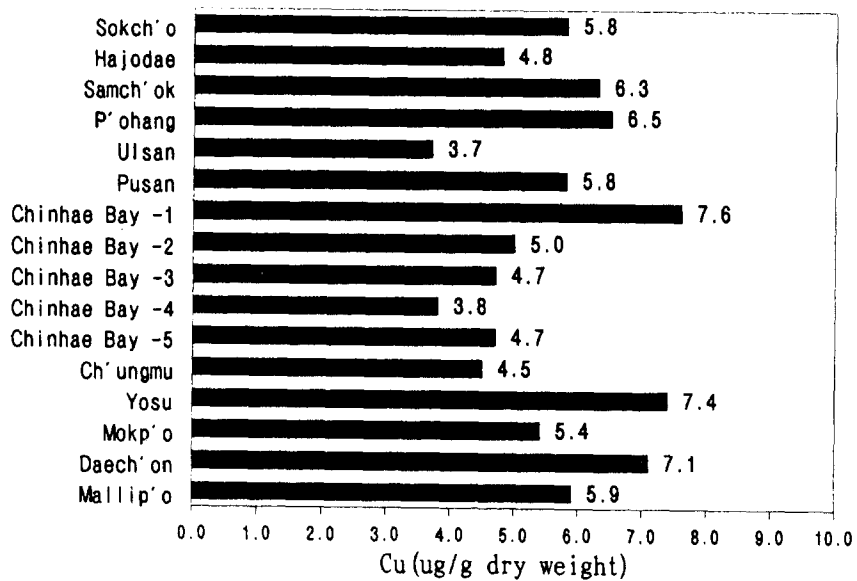


Fig. 4. Copper concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

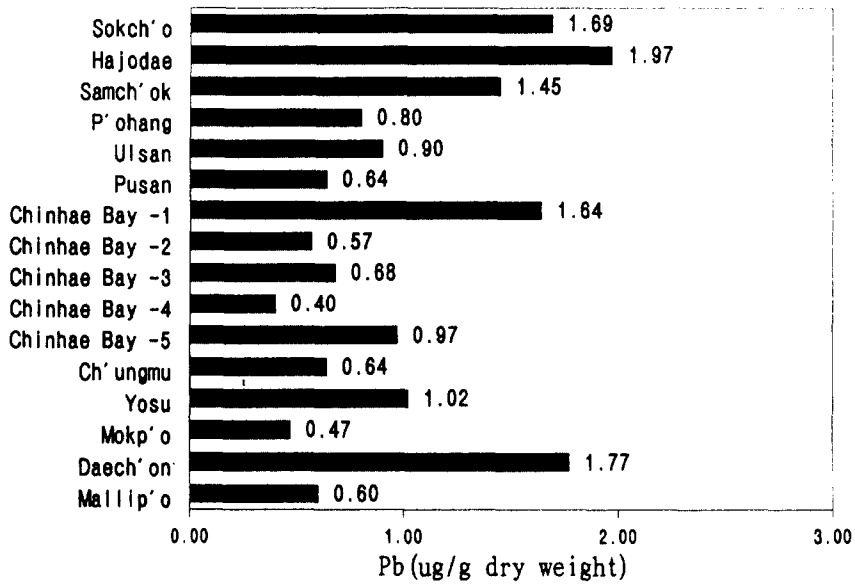


Fig. 5. Lead concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

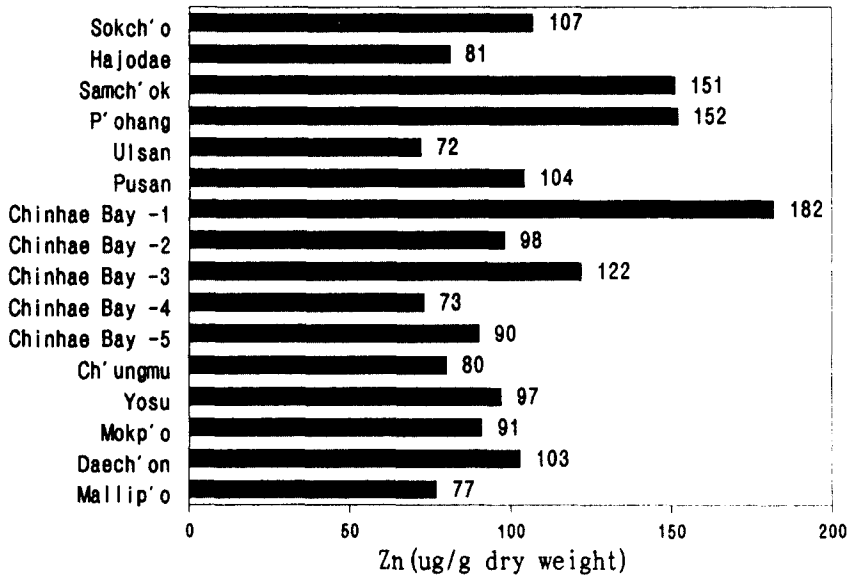


Fig. 6. Zinc concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

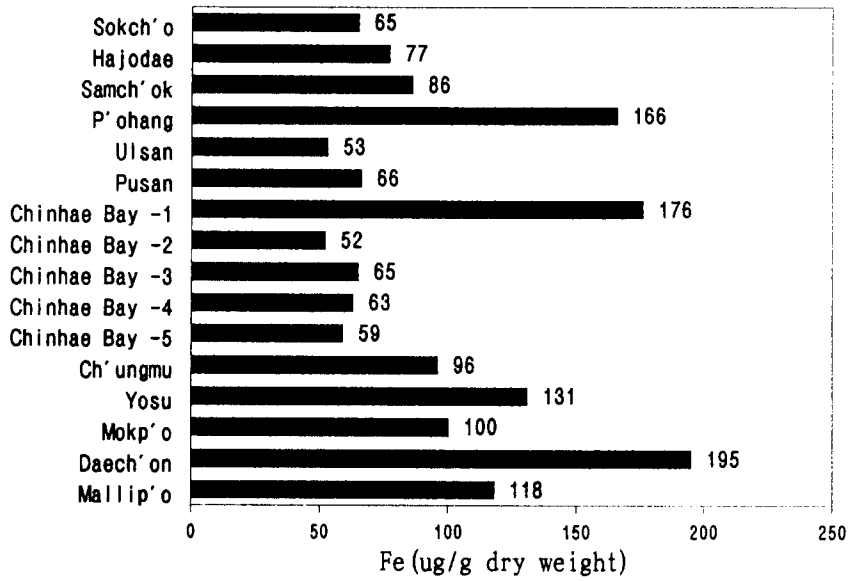


Fig. 7. Iron concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

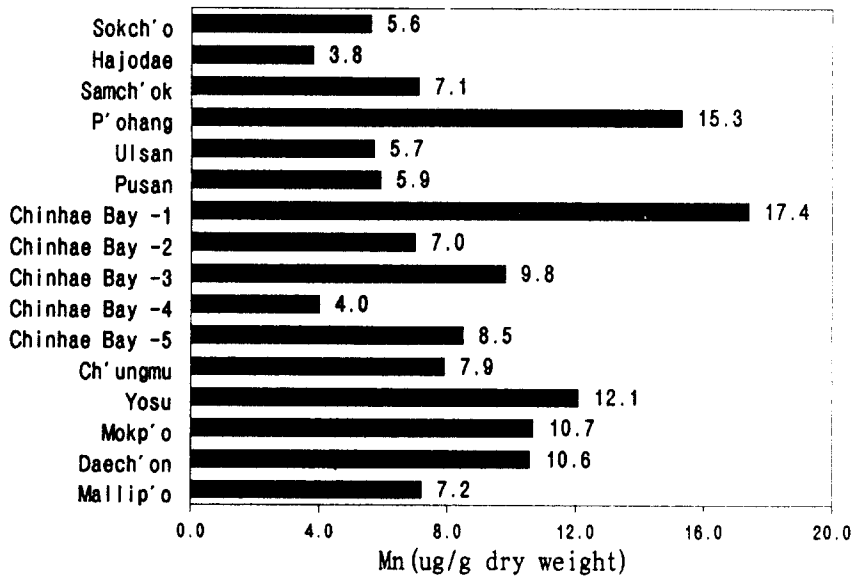


Fig. 8. Manganese concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

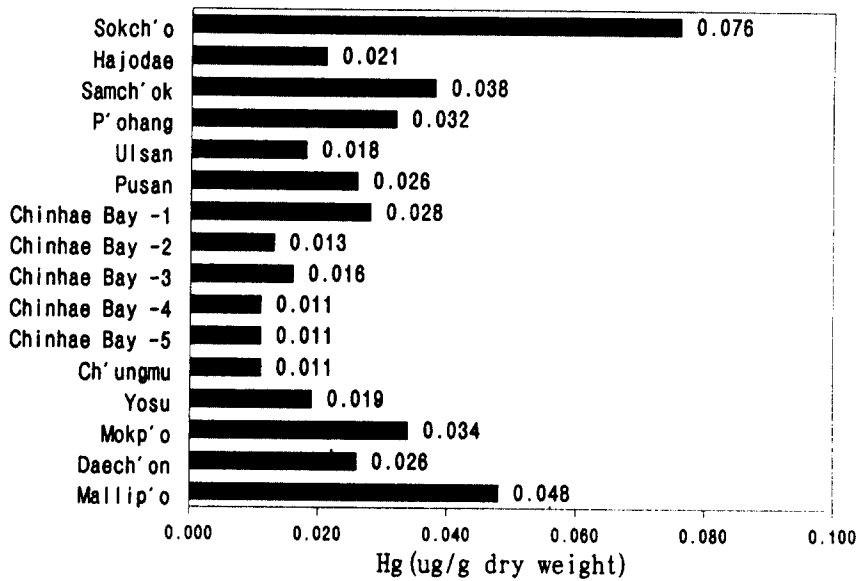


Fig. 9. Mercury concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

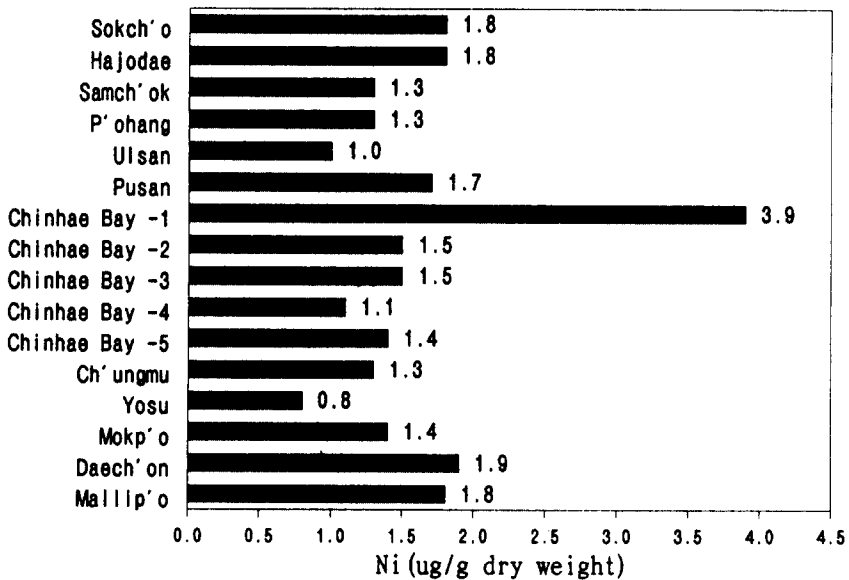


Fig. 10. Nickel concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

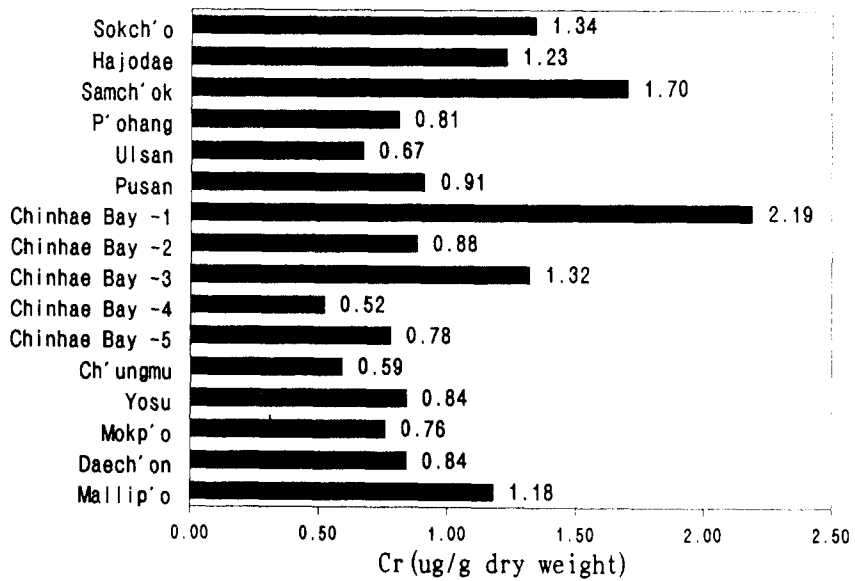


Fig. 11. Chromium concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

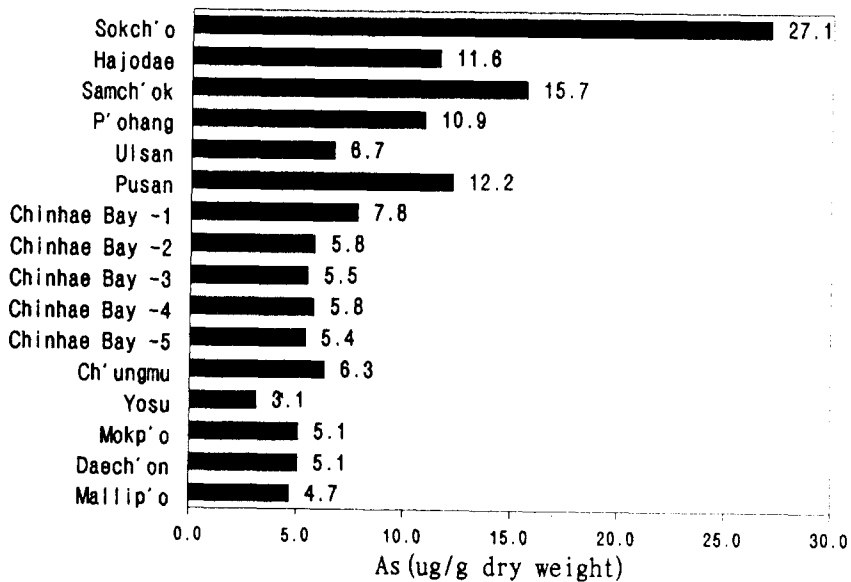


Fig. 12. Arsenic concentrations in mussels samples in 1990 (Lee *et al.*, 1990).

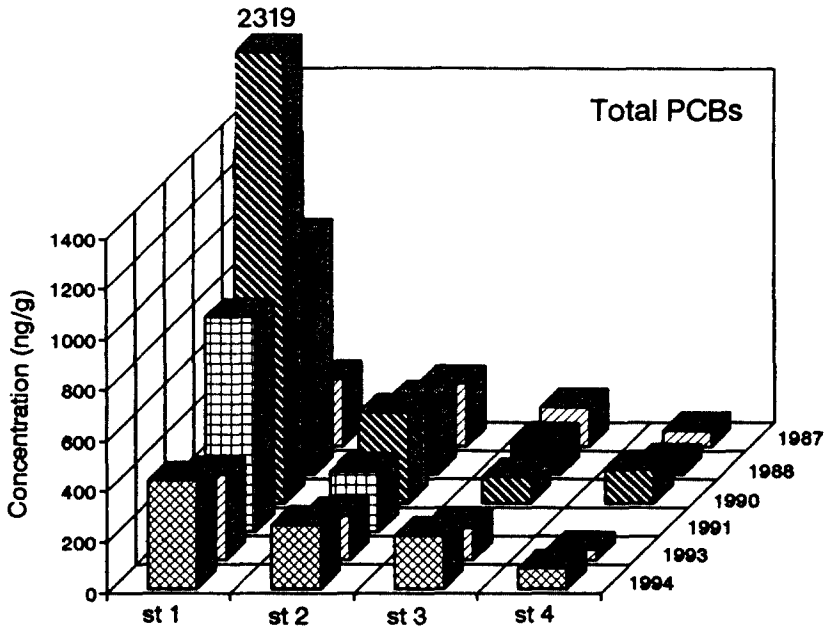


Fig. 13. Temporal variation of total PCB concentrations in mussel tissues at four Mussel Watch sites in Chinhae Bay during 1987 - 1994 (Kahng, 1995).

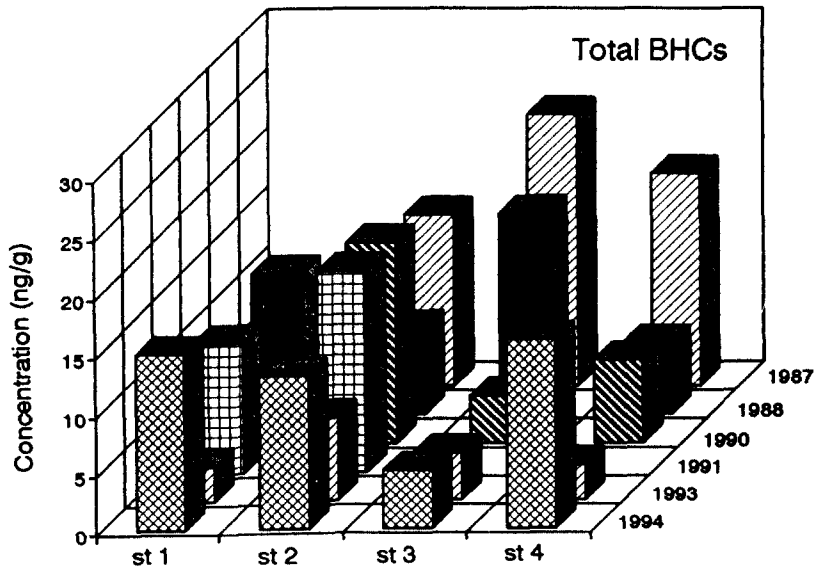


Fig. 14. Temporal variation of total BHCs concentrations in mussel tissues at four Mussel Watch sites in Chinhae Bay during 1987 - 1994 (Kahng, 1995).

Table 1. Comparison of metal concentrations in mussels from the Korea coastal waters with those from elsewhere in the world ($\mu\text{g/g}$ dry wt.).

Sampling site	Cd	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn	Hg	Ni	Cr	As	Al	Sr	Ti	Mo	Source
Narragansett Bay, East Coast,	1.26	11	2.86	92	-	-	0.09	3.96	0.9	11.33	-	-	-	-	NOAA(1987)
San Diego Bay, West Coast,	6.53	17	4.43	273	-	-	0.19	2.53	2.36	16	-	-	-	-	"
Narragansett, USA	1.7	102	4.1	138	170	15.0	0.19	4.2	-	-	70	34	-	-	(Goldberg <i>et al.</i> (1978)
La Jolla, USA	2.0	7.8	2.9	177	170	3.9	-	1.7	-	-	100	48	-	-	"
Neuport, Belgium	0.58	8.3	2.4	130	-	-	0.32	-	-	-	-	-	-	-	Meeus-Verdine <i>et al.</i> (1983)
"	-	-	-	40	776	-	0.97	-	1.23	-	-	-	-	-	Bertine <i>et al.</i> (1972)
Poole Harbor, UK	4.65	-	7-19	64-154	87-154	3-5	-	-	-	-	-	-	-	-	Boydent(1975)
Tasmania, Australia	13	9.5	75	177	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cooper <i>et al.</i> (1982)
Raymut, Oman	7.6	4.0	-	37.5	60	3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	Burns <i>et al.</i> (1982)
Shinda Coast, Taiwan	3.06	8.19	61.13	-	-	-	0.016	-	-	-	-	-	-	-	Hung <i>et al.</i> (1981)
Yokyo Bay, Japan	1.50	10.5	2.00	243	425	18.5	-	2.86	1.73	14.3	462	44	75	0.91	Morita(1989)
Kosong Korea	0.87	5.87	6.43	-	-	-	0.41	-	-	-	-	-	-	-	Worn(1973)
Chinhae	0.59	5.57	8.93	-	-	-	1.83	-	-	-	-	-	-	-	"
Sokcho	0.10	3.96	6.00	-	-	-	0.84	-	-	-	-	-	-	-	"
Imwon	2.9	6.6	1.12	59	170	5.5	-	-	4.4	-	-	-	-	-	Lee <i>et al.</i> (1982)
Chinhae Bay	1.9	5.4	1.09	69	450	12.8	-	-	2.2	-	-	-	-	-	"
Yosu	2.4	3.7	1.14	50	790	17.8	-	-	3.6	-	-	-	-	-	"
Panwol	2.5	5.9	0.65	72	430	17.7	-	-	4.1	-	-	-	-	-	"
East Coast(<i>M. coruscus</i>)	1.09	4.3	0.69	86	278	8.6	0.073	-	-	-	-	-	-	-	Lee <i>et al.</i> (1988)
East Coast(<i>M. edulis</i>)	0.54	4.0	0.56	111	152	13.0	0.022	-	-	-	-	-	-	-	"
South Coast(<i>M. edulis</i>)	1.15	4.8	0.56	105	171	12.1	0.022	-	-	-	-	-	-	-	"
West Coast(<i>M. coruscus</i>)	2.39	11.7	0.31	77	251	13.7	0.039	-	-	-	-	-	-	-	"
East Coast(<i>M. coruscus</i>)	1.03	6.5	0.80	87	102	6.1	-	-	-	-	-	-	-	-	Lee <i>et al.</i> (1989)
East Coast(<i>M. edulis</i>)	0.78	4.2	0.30	129	80	7.4	-	-	-	-	-	-	-	-	"
South Coast(<i>M. edulis</i>)	0.97	5.1	0.20	127	115	12.8	-	-	-	-	-	-	-	-	"
West Coast(<i>M. coruscus</i>)	2.29	7.8	0.70	81	329	13.0	-	-	-	-	-	-	-	-	"
East Coast(<i>M. coruscus</i>)	1.41	5.3	1.83	94	86	4.7	0.049	1.8	1.29	19.4	46	51	33	1.10	Lee <i>et al.</i> (1990)
East Coast(<i>M. edulis</i>)	0.90	5.5	1.05	105	102	9.4	0.029	1.2	1.06	11.1	49	33	25	0.84	"
South Coast(<i>M. edulis</i>)	0.91	5.4	0.78	104	90	9.3	0.019	1.6	0.98	6.3	49	33	25	1.23	"
West Coast(<i>M. coruscus</i>)	2.57	59	0.60	77	118	7.2	0.048	1.8	1.18	4.7	66	38	26	0.50	"

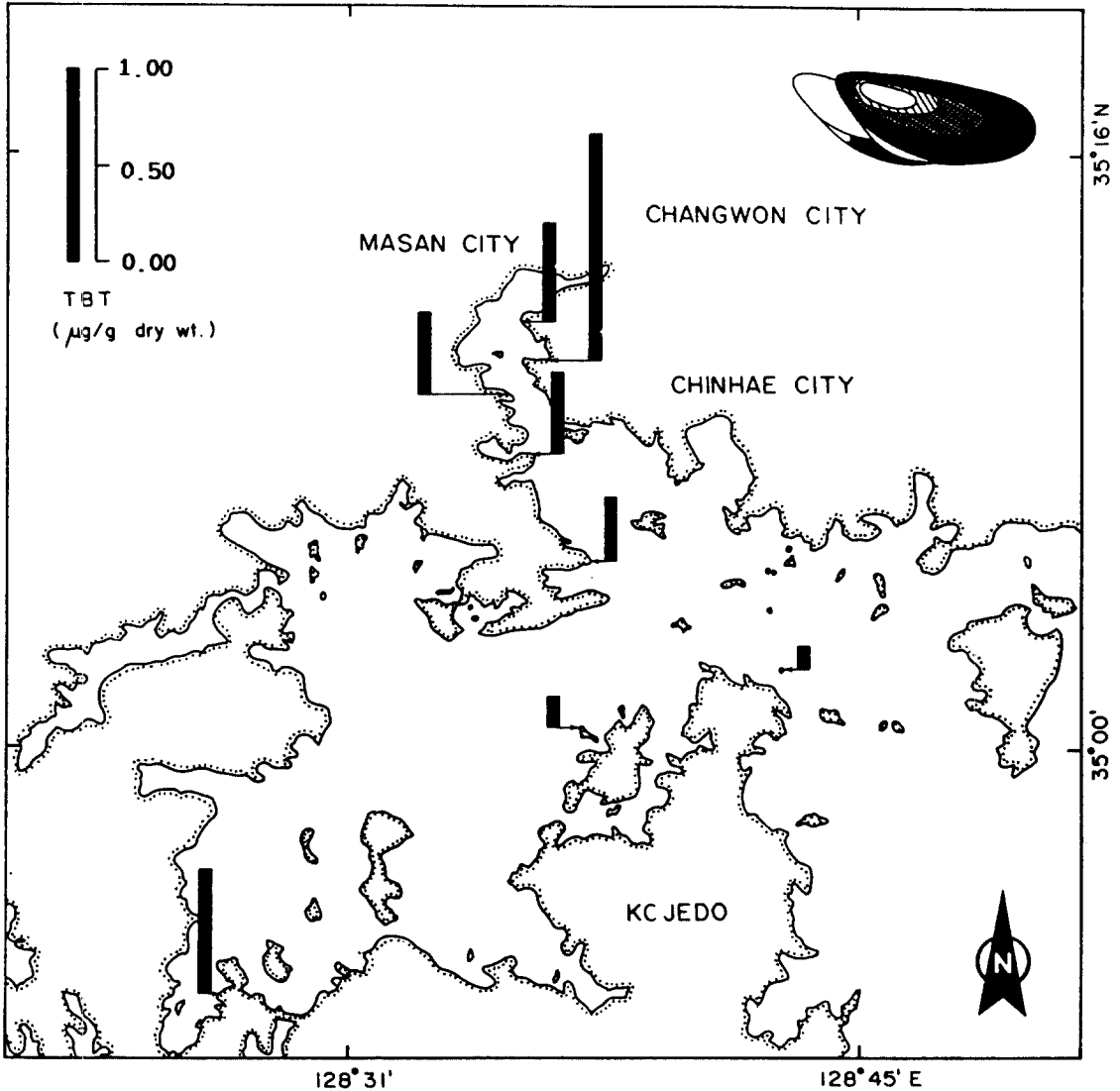


Fig. 15. Distribution of TBT concentrations in oysters (*Crassostrea gigas*) in Chinhae Bay in 1994 (Hwang, 1994).

외만보다는 높은 농도를 보인다(Fig. 15, 16). '90년대 들어 남해안 굴 양식장의 생산량이 급격히 감소하는 추세에 있는 원인이 혹시라도 TBT오염과 관련은 없는지도 변밀히 조사되어야 할 것이다.

결 론

이미 앞에서 상세히 언급한 바와 같이 홍합과 굴 등의 이매패류는 지속성 오염 물질에 의한 해역의 오염을 감시하는데 중요한 지표 생물로 이용될 수 있다. 특히 오염 심화 해역에서는 "가두리 홍합 측정망" 설치를 통해 지속적인 오염 감시도 가능하다. 뿐만 아니라 오염물질의 생체 부하량과 생리학적인 스트레스에 의한 아치사효과와의 관계를 조사함으로써 오염이 생물에 미치는 영향도 파악할 수 있다. 그밖에도 홍합과

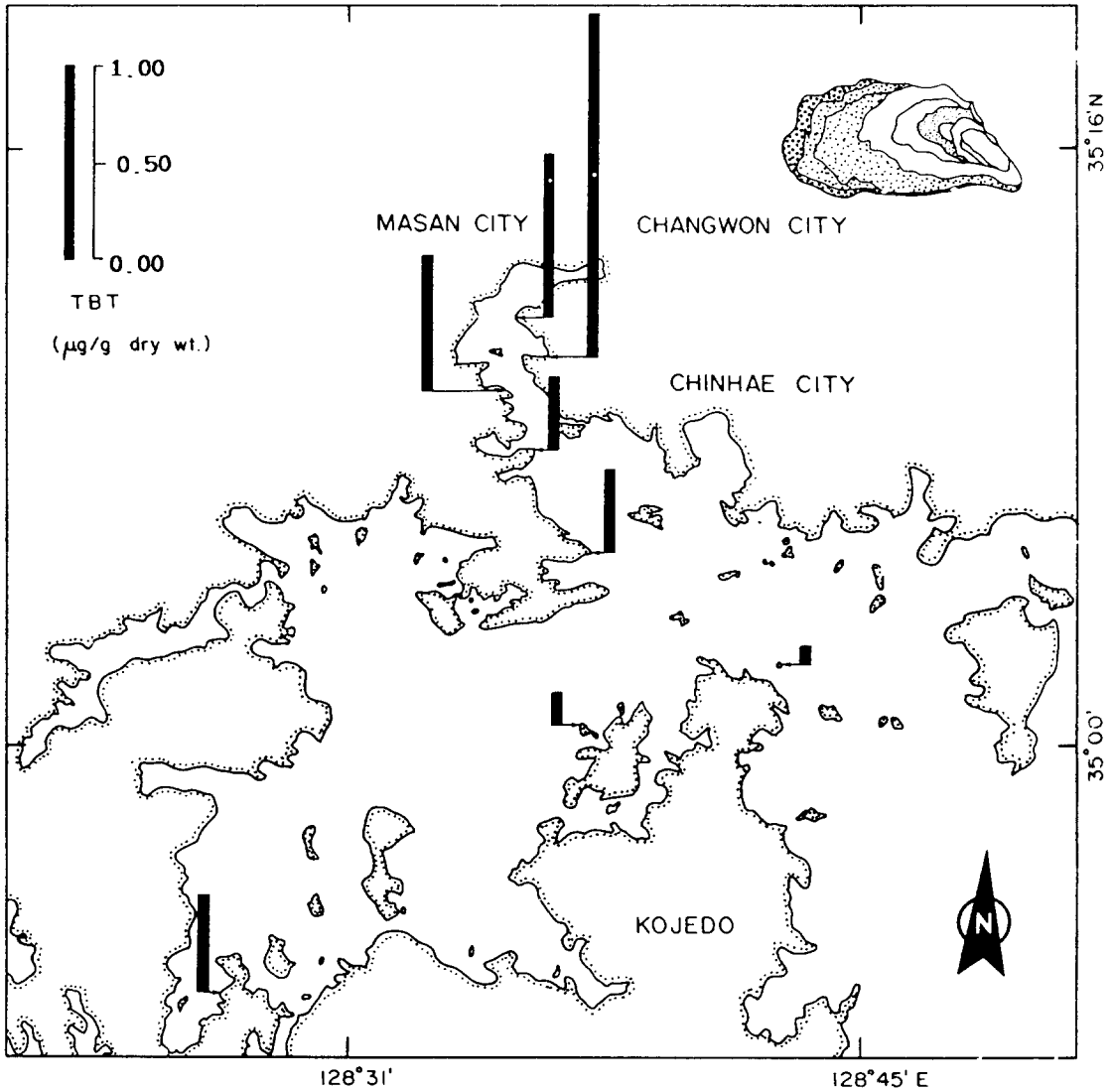


Fig. 16. Distribution of TBT concentrations in mussels (*Mytilus edulis galloprovincialis*) in Chinhae Bay in 1994 (Hwang, 1994).

굴 등의 지표 생물은 우리 식생활에 없어서는 안될 중요한 수산물이기 때문에 이들의 조직병리학적 차원의 건강 여부도 반드시 측정해야만 한다. 이렇듯 이때 패류를 이용한 해양 환경오염 연구는 활용 분야가 매우 다양함에도 불구하고 아직까지 우리 나라가 초보적 연구 수준을 벗어나지 못하고 있음은 매우 안타까운 일이다. 연안 오염이 날로 가속해 되어 가고 있는 요즈음 오염 감시와 국민 보건 차원에서도 지표 생물을 이

용한 해양 환경오염 연구는 절실히 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

- 구와바라 시세이 (1990) 미나마타의 아픔. pp. 174. 을지서적, 서울.
 도갈병, 배준웅, 홍석 (1981) 마산항 오염의 종합적조사.

- 경남대학교 부설 환경연구소 연구보고, 9-33.
- 수산진흥원 (1983) 한국 연안어장 보전을 위한 환경오염 조사연구. 국립수산물진흥원사업보고 제58호. pp. 626.
- 원종훈 (1973) 한국산 어패류종의 수은, 카드뮴, 납, 구리의 함량. *한수지*, **6**: 1-19.
- 유성규, 김기주, 이종구 (1970) 연안산 중요 조개류의 증식에 관한 생물학적 연구. 4. 진주담치의 성장에 대하여. *한국수산학회지*, **3**(2): 103-109.
- 유종생 (1976) *원색한국패류도감*. pp. 196. 일지사, 서울.
- 이광우, 이수형, 양동범, 오재룡, 김은수 (1982) 생태계내에 있어서 오염물질의 이동체계에 관한 연구. *한국해양연구소 보고서 BSPPE00032-60-4*, pp. 77.
- 이동수 등 (1988) 연안환경 보전기술 개발연구. *한국해양연구소 보고서 BSPG00057-184-4*, pp. 292.
- 이동수 등 (1989) 연안환경 보전기술 개발연구. *한국해양연구소 보고서 BSPG00083-242-4*, pp. 360.
- 이수형 등 (1990) 연안환경 보전기술 개발연구. *한국해양연구소 보고서 BSPG00112-315-4*, pp. 260.
- 이용호, 유병호, 양승택 (1975) 패류의 가공적성 2. 바지락 중금속 함량의 시기적 변화. *한수지*, **8**: 85-89.
- 이종화 (1992) *해양생물학*. pp. 957. 동화기술.
- 제종길 (1989) 한국산 연체동물의 우리말 이름. *한국패류학회지*, 별권 제1호: 1-91.
- 제종길, 장창익, 이수형 (1990) 한국산 홍합속(*Mytilus*) (홍합과: 이매패강) 3종의 형태 특성과 분포. *한국패류학회지*, **6**(1): 22-32.
- 황현민 (1994) 진해만의 퇴적물, 진주담치 및 굴중의 TBT 분포에 관하여. *한양대학교 대학원 석사학위논문*, pp. 54.
- 森田昌敏. (1989) ムラサキガイ等の二枚貝中に含まれる微量元素及び有機汚染物質. *きくのつ* pp. 108, 環境廳 國立公害研究所 F-8-89/NIES.
- Alexander, C.V. and Young, D.R. (1976) Trace metals in southern California mussels. *Mar. Poll. Bull.*, **7**(1): 7-9.
- Ayling, G.M. (1974) Uptake of cadmium, zinc, copper, lead and chromium in the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, grown in the Tamar River, Tasmania. *Water Res.*, **8**: 729-738.
- Bertine, K.K. and Goldberg, E.D. (1972) Trace elements in clams, mussels and shrimp. *NATO Subcommittee on Oceanographic Research Technical Report No. 56, Belgium*.
- Boyden, C.R. (1974) Trace element content and body size on molluscs. *Nature*, **251**: 311-314.
- Boyden, C.R. (1975) Distribution of some trace metals in Poole Harbour, Dorset. *Mar. Poll. Bull.*, **6**: 180-187.
- Burns, K.A., Villeneuve, J.P., Anderlin, V.C. and Fowler, S.W. (1982) Survey of tar, hydrocarbon and metal pollution in the coastal waters of Oman. *Mar. Poll. Bull.*, **13**: 240-247.
- Butler, P.A., Andren, L., Bonde, A., Jernelou, A. and Reish, D.J. (1971) Monitoring organisms. *Proc. FAO Tech. Conf. Mar. Pollut., FAO Fish Rep.*, **99**: 101-112.
- Cantillo, A.Y. (1991) Mussel Watch Worldwide Literature Survey - 1991. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA 63. *National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S.*
- Clark, R.B. (1992) Marine Pollution. pp. 166. *Clarendon Press, Oxford*.
- Cooper, R.J., Langlois, D. and Olley, J. (1982) Heavy metals in Tasmanian shellfish. *J. Applied Toxicol.*, **2**: 99-109.
- Goldberg, E.D. (1986) The Mussel Watch Concept. *Environmental Monitoring and Assessment*, **7**: 91-103.
- Goldberg, E.D., Bowen, V.T., Farrington, J.W., Harvey, G., Martin, J.H., Parker, P.L., Risebrough, R.W., Robertson, W., Schneider, E and Gamble, E. (1978) The mussel watch. *Environmental Conservation*, **5**: 101-125.
- Goldberg, E.D., Koide, M., Hodge, V., Flegal, A.R. and Martin, J. (1983) "U.S. mussel watch: 1977-1978 results on trace metals and radionuclides". *Estuar. Coastal Shelf Sci.* **16**: 69-93.
- Granby, K and Spliid, N.H. (1995) Hydrocarbons and organochlorines in common mussels from the Kattegat and the Belts and their relation to condition indices. *Mar. Poll. Bull.*, **30**(1): 74-82.
- Hammond, L.S. (1982) *Mytilus edulis* as a biological indicator of heavy metal pollution: A review. *Marine Science Laboratories, Queenscliff, Australia Technical Report No. 23*.
- Higashiyama, T., Shirashi, H., Otsuki, A. and Hashimoto, S. (1991) Concentrations of organotin compounds in blue mussels from Tokyo Bay. *Mar. Poll. Bull.*, **22**: 585-587.
- Hung, T.C., Kuo, C.Y. and Chen, M.H. (1981) Mussel

- watch in Taiwan, Republic of China. (1) Bioaccumulative factors of heavy metals. *Science Report of the National Taiwan University. Acta Oceanographica Taiwanica*, 12: 67-83.
- ICES. (1988) Results of the 1985 Baseline Study of Contaminants in Fish and Shellfish. Cooperative Research Report No. 151. *ICES Copenhagen, Denmark*.
- IOC Summary Report. (1981) First Session of the WESTPAC Task Team on marine pollution research and monitoring using commercially exploited shellfish as determinants. Manila, Phillipines, 26-30 January 1981.
- IMWC. (1992) The International Mussel Watch. pp. 122, *The International Mussel Watch Committee*.
- Kahng, S.-H. (1995) Bioaccumulation and stress effects of persistent toxic organic contaminants in marine bivalves and gastropods in Chinhae Bay. *Ph. D. Thesis, Seoul National University*, pp. 184.
- Latouche, Y.D. and Mix, M.C. (1982) The effects of depuration, size and sex on trace metal levels in bay mussels. *Mar. Poll. Bull.*, 13: 27-29.
- Lauenstein, G.G., Robertson, A. and O'connor, T. (1990) Comparison of trace metal data in mussels and oysters from a mussel watch programme of the 1970s with those from a 1980s programme. *Mar. Poll. Bull.*, 21(9): 440-447.
- Lee, S.H. and Lee, K.W. (1984) Heavy metals in mussels in the Korean coastal waters. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 19(2): 111-117.
- Lee, S.H., Oh, J.R., Kim, S.H. and Cho, S.R. (1989) Comparison of sample preparation for atomic absorption determination of heavy metals in mussels. *Ocean Research*, 11(2): 1-4.
- Martin, M. (1985) State mussel watch: Toxics surveillance in California. *Mar. Poll. Bull.*, 16(4): 140-146.
- Martin, M., Stephenson, M.D., Smith, D.R., Gutierrez-Galindo, E.A. and Munozo, G.F. (1988) Use of silver in mussels as a tracer of domestic wastewater discharge. *Mar. Poll. Bull.*, 19: 512-520.
- Meus-Verdinne, K., Van Cauter, R. and De Borger, R. (1983) Trace metal content in Belgium coastal mussels. *Mar. Poll. Bull.*, 14: 198-200.
- Moore, M.N., Livingstone, D.R. and Widdows, J. (1987) Hydrocarbons in marine molluscs: biological effects and ecological consequences. *In: Metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment*. Varanasi, U. (ed), pp.291-328, *CRC Press Inc., Boca Raton, FL*.
- NAS. (1980) The international mussel watch. pp 248, Washington, D. C. *National Academy of Sciences*.
- NOAA. (1987) National status & trends program for Marine environmental quality. Progress Report. A summary of selected data on chemical contaminants in tissues collected during 1984, 1985, and 1986. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 38, *National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S.*
- NOAA. (1989) National status & trends program for marine environmental quality. Progress Report. A Summary of selected data on tissue contaminants from the First three years(1986-1988) of the mussel watch project. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 38, *National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S.*
- Phillips, D.J.H. (1977) The use of biological indicator organisms to monitor trace metals in marine and environments. - a review. *Environ. Pollut.*, 13: 281-317.
- Phillips, D.J.H. (1980) Quantitative aquatic biological indicators. pp. 460, *Applied Science Publishers, LTD., London*.
- Phillips, D.J.H., Richardson, B.J., Murray, A.P. and Fabris, J.G. (1992) Trace metals, organochlorines and hydrocarbons in Port Phillip Bay, Victoria: A historical review. *Mar. Poll. Bull.*, 25: 200-217.
- Shchekaturina, T.L., Khesina, A.L., Mironov, O.G. and Krivosheeva, L.G. (1995) Carcinogenic polyaromatic hydrocarbons in mussels from the Black Sea. *Mar. Poll. Bull.*, 30(1): 38-40.
- Sprague, J.B. (1970) Measurement of pollutant toxicity to fish. II. Utilizing and applying bioassay results. *Wat. Res.*, 4: 3-32.
- Watling, H.R. and Watling, R.J. (1976) Trace metals in *Choromytilus meridionalis*. *Mar. Poll. Bull.*, 7(5): 91-94.