

인천연안역 저서동물의 종조성을 이용한 환경평가

이재학 · 고병설 · 박흥식
한국해양연구소 해양생물연구부

Marine Environmental Assessment based on the Benthic Macroinfaunal Compositions in the Coastal Area of Incheon, Korea

Jae-Hac LEE, Byoung-Seol KOH and Heung-Sik PARK

Biological Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

In order to select an effective and appropriate evaluation method for the marine environmental protection and management, it is necessary to evaluate the present status of environmental conditions and to monitor and regulate the hazardous waste continuously. Among the evaluation methods that use benthic fauna, some graphical methods and biological index methods such as species abundance-biomass (SAB), Rank-frequency diagram (RFD), Abundance-Biomass comparison (ABC), Log-normal distribution (LND), and Benthic Pollution Index (BPI) modified by Infaunal Trophic Index were used for the assessments of marine environment in the Incheon coastal area.

Even though the graphic methods are convenient for easy glimpse of general trend of environmental condition but because they require sufficient ecological data, those methods do not fit for analysis or comparison of regional and detailed environmental condition.

On the other hand, when BPI was applied, it was able to compare the spatial benthic conditions. Through considering the functional aspects of benthic fauna which can not be obtained in the cluster analysis, BPI was made it possible to measure or trace down the source of pollution. In the case of the environmental assessment result analyzed in Incheon coastal area, the north eastern part of Yongjongdo was more influenced by the pollution than the outer area of Incheon. The research indicates that especially Incheon harbor has been greatly affected.

Key words : benthic fauna, biological index, Benthic Pollution Index, Incheon

서 론

최근, 선진국가는 물론 우리나라에서도 연안역에 대한 무분별한 개발보다는 해양환경을 보전하고 관리하고자 하는 노력에 많은 관심이 기울어지고 있다. 청정해역에 대한 보전과 오염해역에 대한 개선의 노력과 같은 해양환경의 관리를 위해서는 현재 상태를 올바르게 평가하는 일이 우선되어야 하며, 이 때의 환경평가는 객관적이고도 타당성 있는 방법으로 시행되어야 한다.

해양환경을 평가하는 방법으로는 크게 수질에 의한 평가방법, 퇴적물에 함유된 원소의 함량 분석에 의한 평가방법, 해양생물에 의한 평가방법으로 나누어 볼 수 있다. 해양생물 가운데 저서동물은 대부분이 고착성이거나 이동력이 있어도 행동반경이 좁기 때문에 저서환경의 변화는 물론 수계의 환경의 변화에도 능동적으로 대처할 능력이 부족하다. 특히 저서환경의 변화는 저서동물 군집에 영향을 미치기 때문에, 생물상의 변화를 조사함으로써 환경의 변화를 파악할 수 있다 (Gray, 1974, 1981; Hartley, 1982). 따라서 저서 동물 군집을 조사하고 분석하는

것은 해양 저서환경을 모니터링하는데 매우 필수적인 요소이다.

저서동물을 이용한 환경평가의 방법에는 저서동물 군집의 다양도 지수를 이용한 기법 (Gray and Mirza, 1979) 과, 그래프를 이용한 대수-정규 분포 곡선 (Gray, 1979, 1981; Gray and Mirza, 1979; Andrew and Rickard, 1980; Bonsdorff and Koivisto, 1982, Gray and Pearson, 1982; Uglund and Gray, 1982; Shaw et al., 1983; Rygg, 1985; Nelson, 1987), 순위 빈도 곡선 (Frontier, 1985), 종-개체수-생체량 곡선 (Pearson and Rosenberg, 1978), 개체수-생물량 비교법 (Warwick, 1986; Warwick et al., 1987; Beukema, 1988; McManus, 1990; Dauer et al., 1993; Warwick and Clarke, 1994) 등을 들 수 있으며, 저서동물의 섭식유형을 이용한 내서동물 식성지수 (Word, 1978)가 있다.

국내에서는 최근에 들어서야 저서동물을 이용한 환경평가에 관한 연구가 시도되었다. Yoo (1992)는 경기만에서 대수-정규분포를 이용하여 저서동물 군집의 안정도를 측정하였으며, Lee et al. (1993)은 진해만을 대상으로

저서동물의 분포와 내서동물 식성지수 (Infaunal Trophic Index; Word, 1978)를 이용하여 환경평가를 시도하였고, Lim and Hong (1994)은 진해만에서 그래프를 이용한 평가방법을 제시하였다. KORDI (1993, 1994, 1995)는 저서생물상을 이용한 연안 환경 평가기법 개발에 대한 연구를 실시하였으며 특히 Word (1978)의 내서동물 식성지수를 변형, 보완한 새로운 평가방법인 저서오염지수 (Benthic Pollution Index)를 이용하여 서해연안의 해양환경을 평가한 바 있다.

본 연구는 저서환경 요인에 대한 다양한 조사와 함께 저서동물에 대한 군집분석과 시공 분포양상에 대한 정보가 풍부한 인천연안역 (Koh et al., 1997)을 대상으로 종 조성을 이용한 상기의 여러 가지 환경평가 기법을 적용한 결과를 비교하고, 그 효율성을 검토해 봄으로써 인천연안역에서 지속적으로 해양환경을 평가하는 방식을 제안하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

본 조사 해역은 환경처 (1991)에서 연안역 수질 등급 관리를 위하여 정해 놓은 "인천연안역" 가운데 영종도 북동쪽 해역에 위치한 세어도에서 소래 포구 입구 및

팔미도 외해역에 이르는 해역이다. 조사정점으로는 조하대의 16개의 정점을 설정하여 (Fig. 1) 1994년 5월에서 1995년 2월에 걸쳐 계절별로 총 4회 조사하였다. 저서동물의 시료 채집은 van Veen 채니기 (채취면적 $0.1m^2$)를 사용하였으며, 각 정점에서 3회씩 반복 채집을 하였다. 채집된 퇴적물은 선상에서 직경이 1 mm인 체에 걸러서 남은 잔존물을 10% 포르말린에 고정하여 실험실로 운반하였다. 실험실에서는 해부현미경 하에서 분류군별로 선별하고 종 수준까지 동정 및 계수 하였다.

본 연구에서 적용한 저서동물을 이용한 환경평가 방법으로는 종-개체수-생물량 곡선 (SAB Curves; Pearson and Rosenberg, 1978), 순위-빈도 곡선 (Rank-Frequency Diagram; Frontier, 1985), 개체수-생체량 비교법 (Abundance-Biomass Comparison (ABC) method; Warwick, 1986), 대수-정규 분포 곡선 (Log-normal distribution; Gray, 1979), 내서동물 식성지수 (Infaunal Trophic Index; Word, 1978)를 응용한 저서 오염 지수 (Benthic Pollution Index; KORDI, 1995)를 Koh et al. (1997)에 의한 집괴분석 및 환경 자료에 의한 결과에 따라 정점군별 또는 정점별로 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 인천연안역 저서동물의 군집구조

인천연안역에서 1994년 5월부터 1995년 2월까지 16개 정점에서 계절별 저서동물의 군집구조 및 환경에 관한 조사를 실시 하였다 (Koh, 1996). 조사자료 중 정점간 저서동물의 군집구조와 유사도를 알아보기 위해 집괴분석을 실시한 결과, 크게 4개의 정점군 (Group)으로 나뉘어졌다 (Koh et al., 1997). 팔미도 남서쪽 외해역에 위치한 정점 15, 16 (정점군 I)과 주수로역과 시화방조제 앞쪽에 위치한 정점 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 (정점군 II), 영종도 북동쪽에 위치한 정점 1, 2, 3, 4 (정점군 III)이 저서동물의 종조성이 유사한 정점군으로 구분되었다. 또한 인천항내의 정점 5와 소래 입구역인 정점 12 (정점군 IV)가 하나의 정점군으로 구분되었다 (Fig. 2).

Koh et al. (1997)은 집괴분석 및 환경자료의 결과를 토대로 외해에 위치한 정점군 I에서 내만에 위치한 정점군 IV로 갈수록 오염되어진 양상을 보인다고 하였다. 실제로 환경 및 생물학적 특성에서 각 정점군간 퇴적물의 일부 중금속 농도와 퇴적물의 입도, 용존산소량, 염분의 차이가 뚜렷했으며, 종 다양도 면에서도 정점군 별로 차이를 나타냈다.

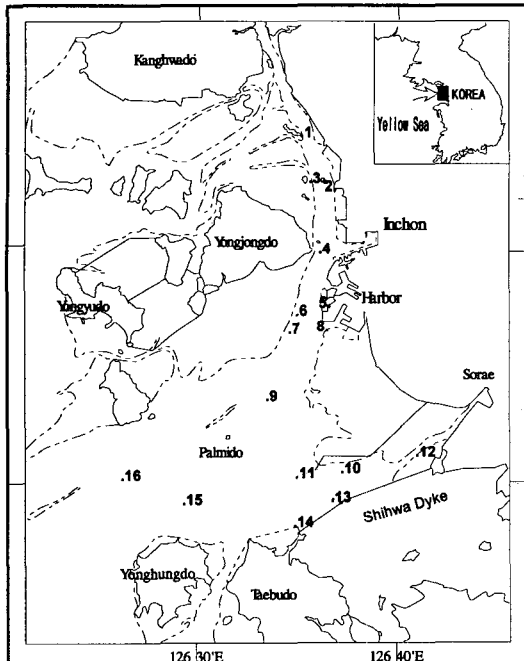


Fig. 1. Index map of study area and sampling stations.

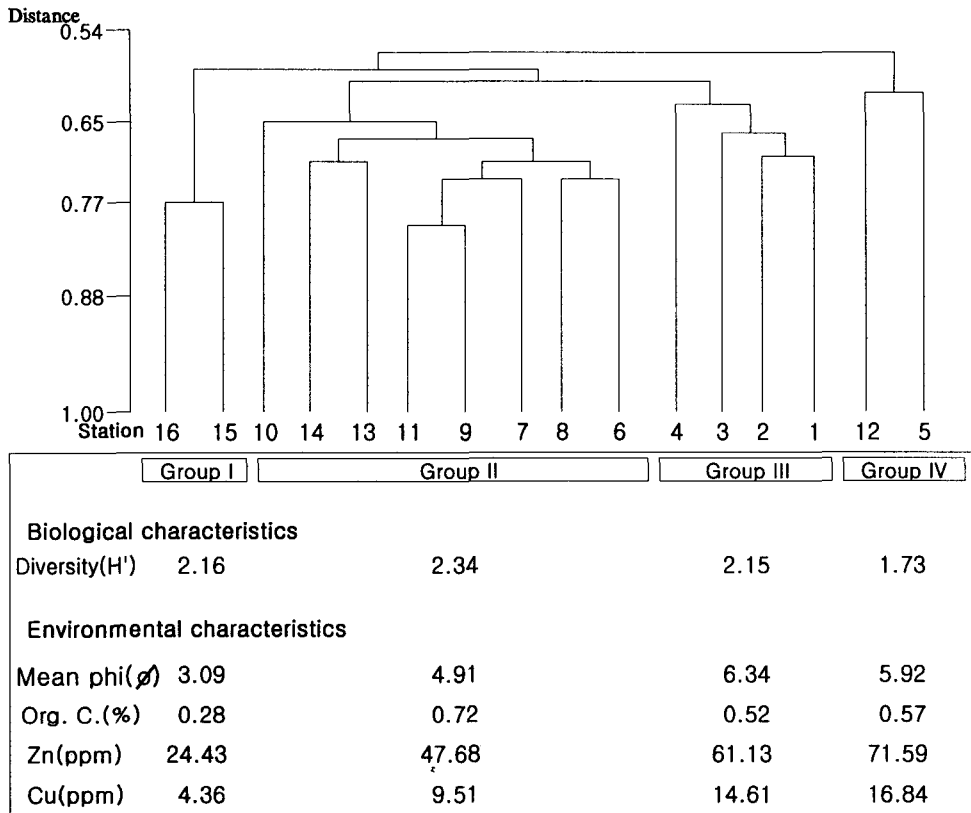


Fig. 2. Dendrogram resulted of cluster analysis (Koh et al., 1997) and biological and environmental characteristics at each station group in Incheon coastal area. (Org. C.: Organic carbon in surface sediment; Zn, Cu: Sampled in surface sediment)

2. 종-개체수-생체량 곡선 (SAB Curves; Pearson and Rosenberg, 1978)

Pearson and Rosenberg (1978)은 생물 자료의 가장 기본이 되는 종수, 개체수, 생체량의 변화를 그래프로 표현하여 (SAB curves) 시공간적인 오염의 정도를 설명한 바 있다. 인천 연안역에서 각 정점군에 대한 종-개체수-생체량 곡선을 살펴보면, 정점군 I에서는 계절별로 생체량과 개체수의 변화양상이 유사한 형태를 보였으며 (Fig. 3), 특히, 겨울철의 경우 개체수와 생체량이 동시에 감소하는 안정적인 구조를 나타냈다. 정점군 II의 경우도 개체수와 생체량이 계절별로 유사한 변화 양상을 보였다. 정점군 III에서는 여름철부터 개체수는 증가하지만 생체량은 감소하다가 가을철 이후 증가하는 양상을 보였다. 이는 여름철에 새로 가입된 개체군이 가을철 이후에 지속적으로 성장하는 것으로 해석할 수 있다. 하지만 정점군 IV에서는 여름철 이후 생체량이 급속하게 감소한데 비해 개체수는 계속하여 증가하는 양상을 나타냈는데, 이러한 현상은 여름철 군집조성에 심각하게 영향을 주

는 환경적 변화가 발생하였고, 이후에 다량의 생물군이 가입되었지만 생체량은 여전히 감소한 것으로 보아 새롭게 가입된 동물군이 주로 기회종으로 구성되어진 것으로서 정점군 IV의 경우 저서군집이 안정적이지 못한 상황을 나타낸다고 해석할 수 있다. 하지만 이와 같은 해석은 저서동물의 가입과 사망이 계절성을 가지지 않는다는 전제조건이 있어야 한다. 이러한 조건을 충분히 해결하기 위해선 장기적인 모니터링으로 자료가 축적되어야 한다. 사실, 종-개체수-생체량 곡선은 일정지역에 일시적으로 가해진 오염원에 따른 시간적, 또는 공간적인 개념에서 군집이 회복되는 상태를 상대적으로 비교할 수 있도록 고안된 것이기 때문에 장기간의 모니터링이 이루어져야 하며, 공간적인 비교를 시행할 경우에는 오염 지역에 대한 정확한 파악이 선행되어야 한다.

크기의 비 (B/A)-개체수의 비 (A/S) 곡선의 경우 정점군 I에서는 계절적인 차이를 거의 볼 수 없는 안정된 상황을 나타냈으며, 정점군 II에서 생체량의 비중은 감소함에 비해 개체수는 증가하는 양상을 보였다. 이러한

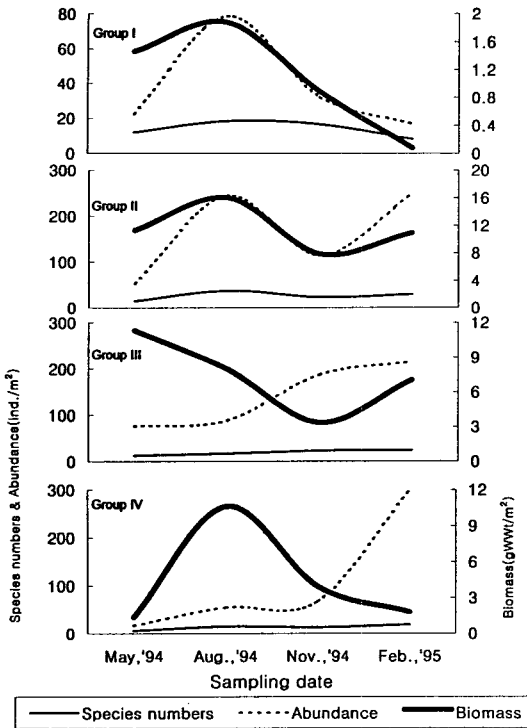


Fig. 3. Species-Abundance-Biomass curve at each station group in Incheon coastal area.

양상은 정점군 III에서도 나타났는데, Pearson et al. (1982)에 의하면, 군집 조성에 있어 안정화 되기 전 단계인 전이과정 (transition stage)으로 해석할 수 있다. 하지만 정점군 IV에서는 급격한 개체수 변화와 생체량의 감소가 여름철 저서군집에 강한 영향을 미친 부분이 있는 것으로 해석되며, 겨울철 기회종 등이 대량 출현하는 것을 반영해 주고 있다 (Fig. 4). 중-개체수-생체량 곡선에 의한 분석결과는 집괴분석에 의한 결과로 해석된 Koh et al. (1997)의 결과와 유사한 양상을 보였다고 할 수 있다.

3. 순위-빈도 곡선 (Rank-Frequency Diagram; Frontier, 1985)

Frontier (1985)의 순위-빈도 곡선 (Rank-Frequency Diagram)은 하나의 군집에서 최우점종이 전체 개체수에서 차지하는 비율은 군집의 성숙정도에 따라 달라지므로, 우점도가 높고 다양도가 낮은 군집에서의 순위-빈도 곡선의 형태는 기울기가 커지게 된다는 점을 착안하였다. 이 방식은 초기 군집형성에 있어 극상 (Climax)에 이르는 과정을 연속적으로 표현할 수 있으며, 정량적인 변화 뿐 아니라 환경의 변화에 따른 종의 참여량을 파악할 수 있다. 따라서 시·공간적인 분석이 가능하다. 하지만 소수종 (rare species)의 역할이 무시되며, 뚜렷한 우점종이

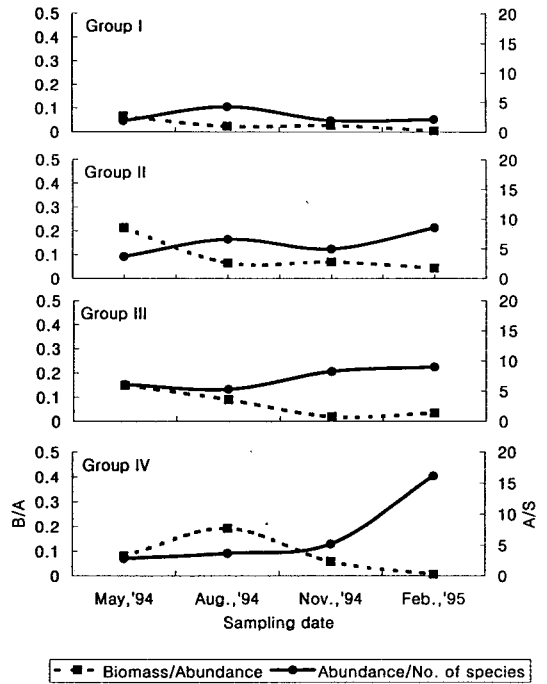


Fig. 4. Abundance ratio (A/S) and the size ratio (B/A) at each station group in Incheon coastal area.

없거나 채집된 생물량이 빈약한 경우에는 군집구조에 대해 잘못된 해석을 할 수 있다. Hily (1983)는 군집의 발달 단계와 오염의 정도를 잘 반영한다고 하였으며, 국내에서는 Lim (1993)이 진해만을 대상으로 이 방법을 이용하여 환경구배에 따른 군집구조를 잘 비교한 것으로 나타났다.

인천연안역에서는 각 정점군별 큰 차이는 없지만 정점군 I에서 IV로 갈수록 기울기가 조금씩 커짐을 알 수 있다 (Fig. 5). 기울기가 커진다는 것은 우점종의 비중이 커지고 다양도가 감소한다는 것으로 Koh et al. (1997)에 의한 분석과 유사한 결론을 보였다. 하지만 그래프상에서 각 군집별로 비교하기가 쉽지 않기 때문에 뚜렷한 양상을 보이지 않은 경우에 해석하기 어려운 단점이 나타났다.

4. 개체수-생물량 비교법 (Abundance - Biomass Comparison (ABC) method; Warwick, 1986)

Warwick (1986)은 군집내의 개체수 누적 비율 곡선과 생물량 누적 비율 곡선을 서로 비교함으로써 오염의 영향을 예측할 수 있는 개체수-생물량 비교법 (Abundance-Biomass Comparison, 일명 ABC-method)을 제안하였다. 이 방법은 환경오염이 발생할 경우 군집이 일시적으로 교란 (disturb)되면서 기회종이 대량 가입하게 되고,

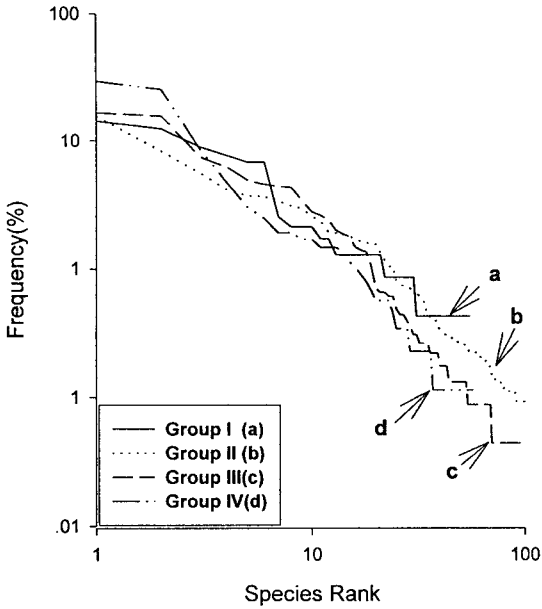


Fig. 5. Rank-frequency diagrams at each station group in Incheon coastal area.

따라서 누적비율에 따라 개체수 곡선이 급격히 상승하는 점을 포착하여 개발된 것으로, 만일 환경이 복원되는 과정인 전이상태로 군집변화가 진행되는 단계에서는 이들 곡선은 서로 교차하거나 근접하게 된다. 이 방법은 대조 정점 (control point)이 없이도 저서동물 군집의 오염상태를 평가할 수 있는 장점이 있다. Warwick et al. (1987)은 이 방법이 오염에 의한 환경교란 뿐만 아니라 자연적인 물리적 교란과 생물학적 교란에 대해서도 적용할 수 있다고 하였고, Beukema (1988)는 이 방법을 정량화하기 위한, 개체수 누적비율과 생체량 누적비율의 차를 합산한 방법 (S(N-B))을 개발하여 환경을 평가한 바 있다. 이 방법은 오염의 정도를 수치화하여 상호 비교할 수 있게 하였다. 그러나 최근 들어 이 방법으로 오염을 평가하는데 대한 오류가 지적되고 있다. 즉, 오염이 발생하는 해역에서 살아남은 개체의 크기가 크고, 생체량이 높은 생물이 채집되는 경우 해석에 혼란을 줄 수 있다 (Dauer et al., 1993; Warwick and Clarke, 1994; Lim and Hong, 1994) 또한 역으로 생각하면, 비오염지역에서 대량의 생물개입이 발생할 경우 개체수의 누적비율이 증가할 수 있는 단점을 지니기도 한다.

인천 연안역에서는 위의 방법을 다모류의 자료만으로 평가하였다. 다모류의 경우 r-전략자가 많이 포함된 동물 군이기 때문에 분석 결과에서는 오히려 실제 상황보다 더 오염된 것으로 해석될 수 있다. 그러나 실제 결과는 정점군 I의 경우 군집이 안정화 상태로 진행되는 전이과

정으로 해석되었고, 정점군 II, III, IV에서는 안정된 군집 구조를 보이는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 따라서 Koh et al. (1997)에 의한 해석과 앞의 다른 방법과는 완전히 상반된 결과를 나타냈다. 이 방법은 Lim and Hong (1994)에서도 적용상에 일부 문제점이 제기되었다. 이론적인 근거는 다른 평가방법과 유사하지만 사용방법과 적용에 있어서 지역적 또는 자료의 검증과 검토가 필요한 기법으로 생각된다.

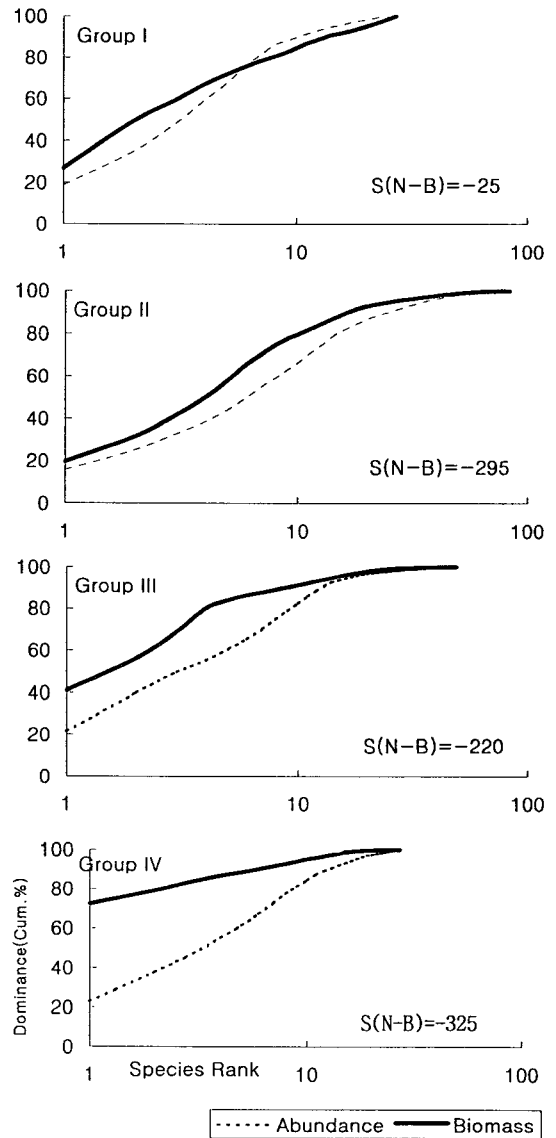


Fig. 6. Abundance-Biomass comparison (ABC) curves at each station group in Incheon coastal area.

5. 대수-정규 분포 곡선 (Log-normal distribution; Gray, 1979)

대수-정규 분포 곡선은 가장 안정된 군집의 경우 서식 분포가 대수-정규분포를 이룬다는 이론을 근거로 저서동물 군집구조를 해석하고, 군집의 안정도를 파악하는데 이용되었다 (Andrew and Rickard, 1980; Bonsdorff and Koivisto, 1982, Gray and Pearson, 1982; Shaw et al., 1983; Rygg, 1985). 이 방법은 보다 다양한 서식처에서 출현한 생물이 일정 군집을 대표할 수 있는 충분한 시료가 확보되어 있을 때 더욱 유효한 결과를 도출할 수 있기 때문에 충분한 생물 자료를 통해 전반적인 오염 상황을 평가하는 것이 바람직 하며, 시간적인 비교는 물론 공간적인 비교, 퇴적상에 따른 생물상의 차이점에 따른 군집구조를 파악할 수 있다 (Gray, 1979, 1981; Bonsdorff and Koivisto, 1982).

안정된 군집의 경우 기하학적 계급 (Geometric class)에 따른 각 계급 간에 직선 구조를 이루지만, 군집내에 교란이 발생할 경우에는 변곡점이 생기게 된다. 또한 대수 정규 분포를 연결한 선이 이루는 각도의 차로 분석하기도 하는데, 일반적으로 각도가 클수록 (약 50° 이상) 오염되지 않은 것이고, 각도가 작은 경우에는 오염이 발생한 것으로 해석하기도 한다 (Gray and Mirza, 1979).

인천연안의 각 정점군을 Gray (1982)와 동일한 척도의 규모 (scale)로 나누어 그려 본 결과, 정점군 I의 경우 직선으로 연결되기 어려운 상황을 나타냈으며, 정점군 II와 III의 경우에는 4 계급에서 변곡되는 양상을 보였고, 정점군 IV의 경우에는 5계급에서 변곡이 발생하였다 (Fig. 7). 정점군 I의 결과는 주로 생물자료가 이 방법을 사용하기에 충분치 않은 경우이다. 또한 다른 정점군에서의

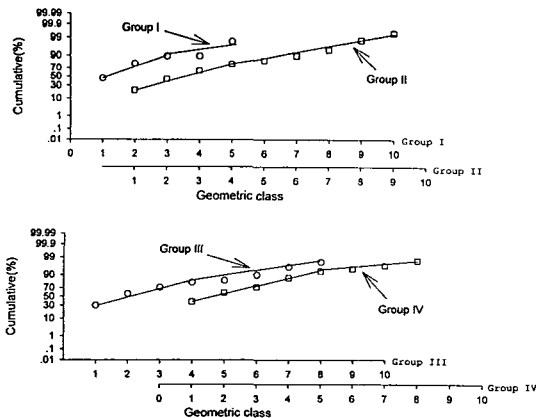


Fig. 7. Log-normal plots at each station group in Incheon coastal area.

결과도 변곡점을 구하는데 있어 어느정도 임의성이 작용하는 것으로 나타났다. 즉, 뚜렷한 변곡 양상을 보이는 계급군을 찾기 어려운 상황으로 오염 현황을 비교하기에는 다소 무리가 따르는 것을 볼 수 있다. 대수-정규 분포 곡선은 여러차례 이용되었지만 적용에 있어 다양한 결과를 나타냈으며 (Rygg, 1985), Lim and Hong (1994)에 의한 시도에서는 매우 적절한 결과를 도출하였다.

6. 내서동물 식성지수 (Infaunal Trophic Index; Word, 1978)를 응용한 저서 오염 지수 (Benthic Pollution Index; KORDI, 1995)

내서동물 식성지수 (Infaunal Trophic Index)의 경우 저서생물의 섭식형태와 환경 자료를 대비하여 유기오염에 따른 군집 동태를 파악할 수 있다 (Word, 1978). 이는 저서 동물의 섭식구조를 근거로 작성되었기 때문에 종의 개념에서 기능적인 면을 보강한 방법으로써, 채집 방법이 서로 다른 자료나 서로 다른 환경간에 비교가 가능할 뿐만 아니라, 정점간의 비교가 가능하다는 장점이 있다. 하지만 지수 계산에 앞서, 출현한 모든 생물의 섭식유형에 대한 자료가 요구되는 어려움이 있다.

저서 오염 지수 (Benthic Pollution Index)는 Word (1978)의 내서동물 식성지수의 공식을 기본으로 저서동물을 기능군별로 4개 등급으로 나누었고, 각 지수가 0~100의 범위내에서 나타날 수 있도록 하였다. 다만, 각 기능군에 속하는 섭식유형에 일부 변화를 주어, 각 정점별 출현종 가운데 여과식자와 대형 육식자는 기능군 그룹

Table 1. Seasonal variation in Benthic Pollution Index at each station in Incheon coastal area

Station	May, '94	Aug, '94	Nov, '94	Feb, '95	Average	B.P.I. Level
1	50	52	56	63	55	II
2	69	51	39	52	53	II
3	62	80	53	72	67	I
4	57	62	54	49	56	II
5	37	53	43	47	45	III
6	73	69	98	92	83	I
7	99	66	56	87	77	I
8	60	64	63	73	65	I
9	72	72	69	92	76	I
10	83	57	60	49	62	I
11	75	94	79	64	78	I
12	85	63	57	84	72	I
13	82	41	69	60	62	I
14		67	51	65	61	I
15	100	67	78	74	80	I
16	72	71	79	65	72	I

I에, 표층퇴적물식사와 여과식과 퇴적물식을 동시에 수행하는 종들을 기능군 그룹 II에, 표층하퇴적물식사는 기능군 III그룹에, 그리고 오염지시종들은 기능군 그룹 IV에 할당하였다. 이때, 계산된 지수가 0에 가까워지면 군집 환경이 매우 악화된 것이고, 100에 가까울수록 매우 안정된 환경을 지닌 것으로 해석할 수 있다. 특히, 대상 해역에서 우점종들의 기능군에 대한 구분은 지수값을 좌우하는 경우가 발생하기 때문에 각 종들의 정확한 섭식 유형 및 생태학적 자료가 입력되어야 한다. 인천 연안 지역 16개 정점에서 실시한 4계절 조사를 근거로 저서동물의 기능군에 따른 저서 오염 지수를 계산한 결과, 총 4개 등급 중에 3개 등급 (I, II, III 등급)으로 형성되어 있는 것으로 나타났다 (Table 1). I 등급 ($60 < BPI < 100$)에 해당하는 지역은 12개 정점으로 나타났고, II등급 ($50 < BPI \leq 60$)에 해당하는 정점은 3개 정점 (정점 1, 2, 4)으로 염화 수로에 위치한 정점군으로 구성되었다. 한편 III등급 ($40 < BPI \leq 50$)에 해당하는 정점은 단 1개 정점 (정점 5)으로 인천항 내에 위치한 곳이다. 정점군별 평균지수값을 보면 I 등급군은 71으로 가장 높은 수치인 안정적인 환경상태를 보여주었으며 II등급군은 55로 안정되지 못한 군집구조를 나타내었고, III등급군의 경우도 45로 가장 낮은 수치를 나타내어 상대적인 오염도가 가장 높은 지역으로 볼 수 있다. 각 등급에 포함된 정점의 계절별 지수값을 비교해 보면 일부 정점의 경우 (정점 2, 7,

10, 11) 계절적인 편차가 크게 나타났다. 가장 낮은 수치를 나타낸 정점 5의 경우 계절 간에 편차가 작게 나타내고 있어 항시 불안정한 군집구조를 보이고 있는 것으로 해석할 수 있다. 반면, 정점 2의 경우 1994년 11월의 지수값이 39로 IV 등급에 해당하는 지수를 나타내다가 1994년 5월에는 69로 I등급에 해당하는 지수를 나타냈다 (Table 1). 정점 2의 경우에는 1994년 11월에 다모류이면서 반내서성 섭식자 (Subsurface deposit feeder)인 *Sternaspis scutata*가 대량으로 출현한 것이 원인으로 나타났다. 이러한 지수값의 계절적 변동은 생물량의 변동에 따른 차이로 섭식 유형별 생물의 가입, 경쟁, 개체군의 사망률 등에 의해 좌우된다고 볼 수 있다 (Rygg, 1985).

집괴분석의 결과에서는 정점 12의 경우 정점 5와 더불어 저서환경이 가장 열악한 구역으로 해석하였는데, 실제 저서오염지수에서는 1등급으로 표현되었다. 이러한 결과는 크게 두가지의 문제로 해석할 수 있다. 첫번째는 집괴분석에서의 정점군 구분에 일부 문제가 제기되는 부분으로 실제 정점간 유사성이 매우 낮음에도 불구하고 이를 하나의 정점군으로 나열하였기 때문이다 (Fig. 2). 실제로 Koh et al. (1997)의 경우 집괴분석 결과를 환경자료와 대비하여 이들을 하나의 정점군으로 나눈 것으로 군집구조의 유사성 보다는 환경의 유사성을 고려하였다. 두번째는 정점 12에서 특히 1995년 2월에 여과식을 하는 이매패류인 *Ruditapes philippinarum*와 퇴적물 식자인

Table 2. Species composition of each functional group in Incheon coastal area

Functional Group	No. of Species	Individuals	Characteristic species (Taxon.)
F.G.I	44	2,460	<i>Ruditapes philippinarum</i> (Bi) <i>Glycera</i> sp. (Po) <i>Modiolus senhausia</i> (Bi) <i>Nephtys caeca</i> (Po) <i>Mandibulophoxus</i> sp. (Cr)
F.G.II	55	3,580	<i>Raeta pulchella</i> (Bi) <i>Chaetozone setosa</i> (Po) <i>Ampharete</i> sp2. (Po) <i>Glycinde</i> sp. (Po) <i>Aricide</i> sp. (Po) <i>Nephtys oligobranchia</i> (Po) <i>Anaitides koreana</i> (Po)
F.G. III	11	1,745	<i>Heteromastus</i> sp. (Po) <i>Sternaspis scutata</i> (Po) <i>Mediomastus</i> sp. (Po) <i>Lumbrineris cruzensis</i> (Po)
F.G. IV	3	46	<i>Capitella capitata</i> (Po) <i>Theora fragilis</i> (Bi) <i>Pseudopolydora kempfi</i> (Po)

(Bi: Bivalvia, Cr: Crustacea, Po: Polychaeta)

*Raeta pulchella*가 대량 출현한 것으로 환경의 호전을 나타내는 것인지 아니면 일시적인 가압의 현상 때문인지에 대한 검토가 필요하리라 생각된다.

기능군 그룹 I의 경우 44종, 2,460개체로 구성되었으며, 대부분의 정점에 걸쳐 고른 출현 양상을 보인 *Glycera* sp. *Nephtys caeca* 등과 정점 9와 12에서 다량 출현한 이매패류인 *R. philippinarum* 등이 포함되었다. 기능군 그룹 II에서는 55종, 3,580개체로 구성되었으며, 대부분의 정점에서 고른 출현양상을 보이는 *Chaetozone setosa*, *Glycinde* sp. *Nephtys oligobranchia*, *R. pulchella*가 주 종으로 구성되었다. 기능군 그룹 III의 경우 11종, 1,745개체로 *Heteromastus* sp. *Mediomastus* sp. *S. scutata*, *Lumbrineris cruzensis* 등이 특징종으로 나타났다 (Table 2).

오염 지시종으로 구성된 기능군 그룹 IV의 경우는 *Capitella capitata*, *Theora fragilis*, *Pseudopolydora kemp* 등 3종만이 출현하였는데, 대부분 짧은 생존기간에 다량의 개체가 서식하는 기회종들로 구성되어 있다. 인천연안역 항구 부근(정점 5)에 있어서 이러한 종이 나타나 낮은 수치를 나타냈다.

Fig. 8에서는 Koh et al. (1997)의 결과와 더불어 Lim et al. (1995)에 의한 결과를 추가하여 경기만 전 연안에 걸쳐 지수값을 표시하였다. 이러한 저서오염지수에 의한 구역별 등급군은 생물자료를 사용한 집괴분석에서 나타나는 구역과 유사한 양상을 나타냈다.

결론

저서동물상을 이용한 오염평가 방법들은 대개 군집 생태학의 이론을 근거로 하였으며, 평가방식에 대한 단점을 보완하면서 다양하게 발전하였다. 환경평가 기법들은 그 나름대로의 장·단점을 지니고 있어서 우리나라 서해안과 같이 복잡한 연안 환경 구조를 지닌 곳에서 각기 다른 연안에 공통적으로 적용하여 해양환경을 가장 효율적으로 평가할 수 있는 방법을 선정하기는 매우 어려운 일이다. 그러므로 인천연안역 저서동물군집을 이용하여 환경평가 방법인 종-개체수-생체량 곡선 (SAB), 순위-빈도 곡선 (RFD), 개체수-생체량 비교법 (ABC), 대수-정규 분포 곡선 (LND), 그리고 내서 동물 식성지수를 응용한 저서 오염 지수 (BPI)에 적용하여 인천 연안역의 환경을 오염이란 관점에서 가장 객관적인 수치로 표현하고자 하였으며, 그리고 가장 효율적인 평가 방법을 선정하고자 하였다. Table 3은 상기한 환경평가 방법을 인천연안역에 적용해 본 결과에 대하여 +와 -기호를 이용하여 환경의 안정도 및 오염의 정도를 표현한 것이다.

이 중 종-개체수-생체량 곡선, 순위-빈도 곡선과 저서 오염 지수에 의한 방법 등이 해석상에 약간의 차이는 있지만 Koh et al. (1997)에 의한 환경 및 군집의 집괴분석에 의한 결과와 유사하게 나타났다.

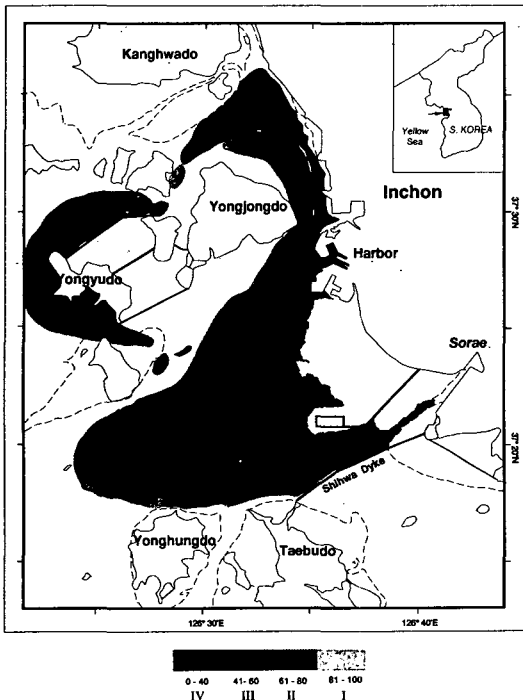


Fig. 8. Plots of values of Benthic Pollution Index (BPI) based on Lim et al. (1995) and Koh et al. (1997) in Incheon coastal area. (I~IV : Pollution Levels)

Table 3. Marine environmental assessment in Incheon coastal area

Methods	SAB	RFD	ABC	LND	BPI
Group I	+	+	-		+
Group II	-	+	+	-	-
Group III	-	-	+	-	-
Group IV	--	-	+	-	-

SAB : SAB Curves (Pearson & Rosenberg, 1978)

RFD : Rank-Frequency Diagram (Frontier, 1985)

ABC : Abundance - Biomass Comparison (ABC) method (Warwick, 1986)

LND : Log-normal distribution (Gray, 1979)

BPI : Benthic Pollution Index (KORDI, 1995)

++ : Clean, + : Natural, - : Polluted, -- : Very polluted

종-개체수-생체량 곡선의 경우 정점군 IV의 오염 현황을 잘 표현하였으며, 순위-빈도곡선은 상세한 관찰에 의하면 각 정점군간의 차이를 볼 수 있지만 명확한 판정을 내리기에는 어려운 구조를 보여주었다. 한편, 저서오염지수에 의하면 출현 종의 섭식유형이라는 기능적인 면을 주입하여 생물들을 4개의 등급으로 나누고 기본공식에 따라 분석된 것으로써 민감도가 높아 정점간의 비교까지도 가능하였다. 이를 정점군별 평균 지수 값으로 보더라도 정점군 I이 가장 높은 수치로 가장 안정된 환경이었고 그 다음이 정점군 II, III, IV로 갈수록 오염이 심한 지역으로 분석되었다.

그러나 개체수-생물량 비교법에서는 오히려 반대적인 해석으로 항구 주변의 해역이 안정된 평형상태의 군집임을 보여주어 전혀 다른 결과를 나타냈다. 대수-정규분포곡선에서는 정점군 II~IV 모두 비슷한 기울기에 유사한 지점에서 변곡이 나타났다. 실제 변곡 위치를 결정하는데 명확한 계급군을 찾을수 없기 때문에 인위적인 요소가 포함되어 있었다. 따라서 심각한 오염이 발생하여 시간적인 변화과정을 비교하는 경우를 제외하고는 유사한 상황에서 공간적인 비교를 시도할 경우 민감한 분석법은 못되는 것 같다.

상기의 모든 그래프에 의한 방법들에 있어선 각각의 장단점이 있었다. 그 중에서도 전체를 한 눈에 파악할 수 있는 장점이 있지만 보다 지역으로 또는 세부적으로 비교 분석될 수 없는 단점이 있었다. 사실 그래프에 의한 방법들은 정확한 결과를 유도하기 위해서는 충분한 생물시료의 양적크기가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 시·공간적으로 하나 이상의 채집단위를 묶어서 평가하는 방법으로, 저서동물 종조성의 유사도를 기반으로 한 집괴분석에 의하여 구분된 해역을 시·공간적으로 비교하는 방법을 취해왔다. 그러나 집괴분석에 의하여 구분된 해역을 오염의 정도로 판정하기에는 다소 무리가 따를 수 있었다.

집괴분석은 저서동물의 출현양상만을 고려하기 때문에 저서동물의 섭식형과 생태학적 특징 및 오염에 대한 반응도 등이 고려되지 않고 오염의 정도를 평가하기에는 알맞지 않다. 또한 집괴분석은 유사도 지수를 달리 사용함에 따라 서로 다른 결과를 도출해 낼 수 있으며, 집괴분석에 사용되는 생물자료의 변환 등에서도 해역구분이 달라질 수 있다. 그러나 저서 오염 지수는 각 정점별 우점종을 도출해 낸 후 기능군으로 할당되어 오염 지수를 계산하기 때문에 정점별로 상대적인 오염의 정도를 비교

할 수 있을 뿐만 아니라 비슷한 오염 지수를 가지는 정점들을 묶어서 해역별 비교도 가능하며 시간적인 오염의 경로를 추적할 수도 있다. 본 연구에서는 저서동물의 계절적인 종조성의 변화를 고려하여 정점별 저서 오염지수를 4계절 평균한 값으로 인천연안의 전반적인 오염의 정도를 표시하였다. 집괴분석 결과로 얻어진 해역에 대하여 기존의 환경 평가 방법을 적용해 본 결과 구분하기 힘들거나 오염의 정도를 정점별로 비교할 수 없었던 것에 비하면 저서오염지수에 의하여 구분되어진 해역에 대하여 기존의 평가 방법을 적용해 본 결과 오염의 정도를 판정할 수 있었다. 앞으로 기능군에 대한 계속적인 고찰을 통하여 보완이 이루어지고 타해역에서도 적용 검증된다면 보다 객관적인 해양환경을 평가하는 방법으로 저서오염지수의 활용이 해양 환경 평가에 적절한 방법이라고 생각된다.

요 약

연안역의 환경을 오염이란 관점에서 가장 객관적이고 효율적인 평가 방법을 선정하기 위하여 인천연안역을 대상으로 저서동물군집을 이용한 환경평가 방법인 종-개체수-생물량곡선(SAB), 순위-빈도 곡선(RFD), 개체수-생물량 비교법(ABC), 대수-정규 분포 곡선(LND), 내서 동물 식성지수를 응용한 저서 오염 지수(BPI)에 적용하여 환경평가를 실시하였다.

그래프를 이용한 평가방법은 환경상태를 한 눈에 파악할 수 있는 장점이 있지만, 충분한 생물자료가 요구되기 때문에 지역적으로 또는 세부적으로 비교·분석될 수 없는 단점이 있었다. 반면 저서오염지수에 의하면 정점간의 비교가 가능하였으며, 집괴분석의 결과에서 얻을 수 없는 출현종의 기능적인 면을 고려하여 오염의 정도나 경로까지 추적할 수 있었다. 여러 환경평가방법을 적용한 결과를 종합해 볼 때, 인천연안역은 외해역 보다는 영종도 북동쪽 해역이 다소 오염의 영향을 받고 있었으며, 특히 인천항이 오염의 영향을 크게 받고 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- Andrews, M.J. and D.G. Rickard. 1980. Rehabilitation of the Inner Thames Estuary. *Mar. Pollut. Bull.* 11, 327~332.
- Beukema, J.J. 1988. An evaluation of the ABC-method (abundance/biomass comparison) as applied to macrozoobenthic communities living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea, *Marine Biology*, 99, 425~433.

- Bonsdorff, E. and V. Koivisto. 1982. The use of the log-normal distribution of individuals among species in monitoring zoobenthos in the northern baltic Archipelago. *Mar. Pollut. Bull.* 11 (9), 324~327.
- Dauer, D.M., M.W. Luckenbach, A. J. Rodi, Jr. 1993. Abundance biomass comparison (ABC method): effect of an asturine gradient, anoxic/hypoxic events and contaminated sediments, *Marine Biology*, 116, 507~518.
- Frontier, S. 1985. Diversity and structure in aquatic ecosystems. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 23, 253~312.
- Gray, J.S. 1974. Animal-sediment relationship. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 12, 223~261.
- Gray, J.S. 1979. Pollution-induced changes in populations. *Phil. Trans. R.Soc. Lond. B.* 286, 545~561.
- Gray, J.S. 1981. Detecting pollution induced changes in communities using the log-normal distribution of individuals among species. *Mar. Pollut. Bull.* 12 (5), 173~176.
- Gray, J.S. and F.B. Mirza. 1979. A possible method for the detection of pollution-induced disturbance on marine benthic communities. *Mar. Pollut. Bull.* 10 (5), 142~146.
- Gray, J.S. and T.H. Pearson. 1982. Objective Selection of Sensitive Species Indicative of Pollution-Induced Change in Benthic Communities. I. Comparative Methodology. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 9, 111~119.
- Hartley, J.P. 1982. Methods for monitoring off-shore macrobenthos. *Mar. Pollut. Bull.* 13, 150~154.
- Hily, C. 1983. Macrozoobenthic colonization after dredging in a sandy mud area of the Bay of Brest enriched by organic matter, *Oceanol. Acta. Proc.*, 17th European Mar. Biol. Symp., Brest, France, 113~120.
- Koh, B.S. 1996. A Study on the Marine Environmental Assessment based on the Benthic Macrofaunal Community in the Coastal Area of Incheon, Korea. M.S. Thesis, Inha Univ. 86pp (in Korean).
- Koh, B.S., J.H. Lee and J.S. Hong. 1997. Distribution Patterns of the Benthic Macrofaunal Community in the Coastal Area of Incheon, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea.*, in press, (in Korean).
- KORDI. 1993. Marine environmental assessment based on the benthic faunal communities-Report of Management Technique for Marine Environmental Protection. First year, 95pp (in Korean).
- KORDI. 1994. Marine environmental assessment based on the benthic faunal communities-Report of Management Technique for Marine Environmental Protection. Second year, 244pp (in Korean).
- KORDI. 1995. Marine environmental assessment based on the benthic faunal communities-Report of Management Technique for Marine Environmental Protection. Last year, 339pp (in Korean).
- Lee, J.H., J.G. Je, H.S. Lim, J.W. Choi and B.S. Koh. 1994. Marine environmental assessment based on the benthic faunal community in Chinhae Bay, Korea. KORDI, BSPE 00417-684-3 73pp (in Korean).
- Lim, H.S. 1993. Ecology on the Macrozoobenthos in Chinhae Bay of Korea. Ph.D. Thesis, Nat. Fish. Univ. of Busan, 311pp (in Korean).
- Lim, H.S. and J.S. Hong. 1994. An Environmental Impact Assessment Based on the Benthic Macrofauna in Chinhae Bay, Korea. - An Application of Some Graphic Methods by Distribution Pattern of Individuals Among Species -. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 27 (5), 659~672 (in Korean).
- Lim, H.S., J.H. Lee, J.W. Choi and J.G. Je. 1995. Macrobenthic community on the soft-bottom around the Yongjong Island, Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 28 (5), 635~648 (in Korean).
- McManus, J. M. & D. Pauly. 1990. Measuring ecological stress: variations on a theme by T. M. Warwick, *Marine Biology*, 106, 305~308.
- Nelson, W.G. 1987. An evaluation of deviation from the lognormal distribution among species as a pollution indicator in marine benthic communities. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 113, 181~206.
- Pearson, T.H. and R. Rosenberg. 1978, Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Rev.*, 16, 229~311.
- Pearson, T.H., G. Duncan and J. Nuttal. 1982. The Loch Eil Project: Populations Fluctuations in the Macrobenthos. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 56, 305~327.
- Rygg, B. 1985. Distribution of Species along Pollution-induced Diversity Gradients in Benthic Communities in Norwegian Fjords. *Mar. Pollut. Bull.* 16 (12), 469~474.
- Shaw, K.M., P.J.D. Lamshead and H.M. Platt. 1983. Detection of pollution-induced disturbance in marine benthic assemblages with special reference to nematodes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 11, 195~202.
- Ugland, K.I. and J.S. Gray. 1982. Lognormal distribution and the concept of community equilibrium. *Oikos* 39, 171~178.
- Warwick, R. M. 1986. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, 92, 557~562.
- Warwick, R. M., T. H. Pearson and Ruswahyuni. 1987. Detection of pollution effects on marine macrobenthos: further evaluation of the species abundance/biomass method. *Marine Biology*, 95, 193~200.

- Warwick, R. M., K. R. Clarke. 1994. Relearning the ABC: taxonomic changes and abundance/biomass relationships in disturbed benthic communities. *Marine Biology*, 118, 739~744.
- Word, J. Q. 1978. The infaunal trophic index, Coastal water research project. Annul report, 19~39.
- Yoo, J.W. 1992. The community structure and distribution of the benthic macrofauna in Han estuary and Kyonggi Bay, Korea. M.S.Thesis, Inha Univ., 100 pp.
- 환경처. 1991. 해양오염측정망 운영지침.
-
- 1997년 1월 22일 접수
1997년 9월 2일 수리