

영일만 유입오염부하량과 수질의 시·공간적 변동특성(II) - 유입오염부하량과 수질의 상호거동 -

윤한삼* · 이인철* · 류청로*
*부경대학교 해양공학과

Spatial and Temporal Variation Characteristics between Water Quality and Pollutant Loads of Yeong-il Bay (II) - Mutual Variation between Inflowing Pollutant Loads and Water Quality -

HAN-SAM YOON*, IN-CHEOL LEE* AND CHEONG-RO RYU*
*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Yeong-il Bay 영일만, Hyeong-san River 형산강, Precipitation 강우량, Pollutant Load 오염물질, Spatial Distribution Characteristics 공간분포특성, Cluster Analysis 군집분석, Nutrient Trap 영양염집적해역

ABSTRACT: This study investigates the distribution characteristics and relationship of water quality, and analyzes the spatial and temporal variation and distribution of the pollutant loads at Yeong-il Bay. The results of these analysis, the concentrations of nutrient loads (T-N and T-P), both appeared to be at the maximum value in November, while most small values were taken in May for the T-N, and in August for the T-P. For COD, the maximum concentration was in August, which has much precipitation during the same season, T-N was at the mean, and T-P was at the minimum value. Using the cluster analysis to develop the division of the sea basin by the dendrogram, before and after construction of Pohang New-port, the variation characteristics of water quality of Yeong-il Bay were discussed. The inflowing pollutant loads were transported to the landward by the high-density salinity water volume of the bottom layer therefore, it formed nutrient trap or coastal trapping areas of the pollutant load. By this mechanism, it is clear that the water volume with high-density nutrient exists on both sides of the Pohang New-port. Thus, the sea basins increasing concentration of the pollutant load at Yeong-il Bay are most prevalent at Hyeong-san estuary, the Pohang Old, and New-port. To improve water quality of this sea basin, the reduction of these nutrients loads should be the highest priority.

1. 서 론

영일만은 포항신항을 비롯 인근지역의 대규모 산업단지로부터의 산업폐수, 인구밀집지역인 포항구항 도시하천을 통해 배출되는 생활폐수, 유역내 가축사육에 의해 발생하는 축산폐수 등이 만내로 유입됨으로써 만내오염물질의 절대량이 증가하여 연안수질오염이 더욱 심화되고 있는 실정이다(김기태, 1992; 강양순 등, 2002; 김종규, 2000).

최근에는 영일신항 등 연안해역 개발과 아울러 연안환경의 변조 및 연안수질오염의 심각성이 구체적으로 대두되고 있으며, 해역에 따라서는 연안생태계 변화(Lee et al., 2000), 해양생물 서식처의 파괴, 어류의 갑작스런 집단폐사, 기형어류의 출현 등 각종 이상조집도 나타나고 있다(이인철, 2001, 2002).

특히 영일만내로 유입되는 오염물질 유입원은 구체적으로 형산강을 비롯, 냉천을 포함한 6개의 소하천, 포항제철의 3개 배수구, 포항구항의 도시하천 유입구 등이 있으며(Fig. 1에서 ①~⑥), 이러한 오염물질의 유입 및 확산으로 인해 오염부하량(COD) 및 영양염(총인, 총질소 등)의 증가, 해수 및 저질의 오염정화능력 저하와 더불어 적조 및 부영양화 등 만내 수질 및 생태계에 미치는 악영향이 크게 증가하고 있다.

현재 영일만은 국내 해역관리등급기준을 근거로 하여 3개 등급의 수질환경기준관리영역으로 나누어 관리되고 있으나, 형산강이나 포항구·신항 및 인근 육역으로부터의 유입오염물질의 만내 거동에 대한 평가, 만내 수질에 미치는 영향평가 등에 대한 과학적이고 체계적인 연구는 미흡한 실정이며 이에 대한 재조명이 요구되어지고 있다.

또한 영일만은 현재 1997부터 2003년까지 연차별로 송도동, 항구동 및 포항구항 해역에 저질개선을 위한 준설사업이 진행되고 있으나 이로 인해 만내 수질에 미치는 영향은 수-저질의 물

제1저자 윤한삼 연락처: 부산광역시 남구 대연3동 599-1
051-620-6222 yoonhans@mail.pknu.ac.kr

질순환예측, 내부생산성 평가, 만내 수질에 미치는 유기물의 기여 등과 관련하여 보다 상세한 검토가 필요할 것이다.

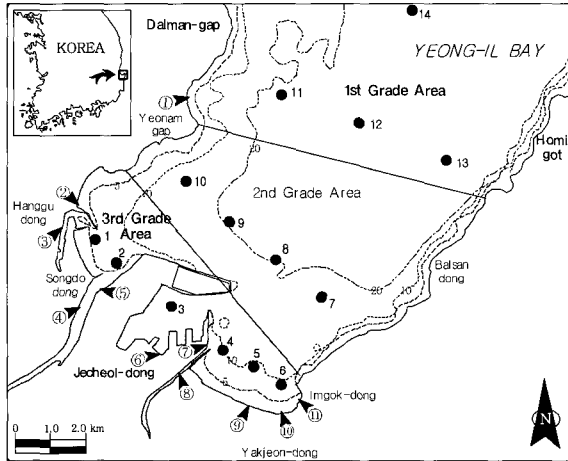


Fig. 1 Grades of water quality and river-inflow points

이에 본 연구는 기수행된 영일만내 유입 하천유량과 유입오염부하량의 계절변동(윤한삼 등, 2003)의 연속된 연구과제이며, 상세한 연구분야에 대한 기초단계로서 만내수질의 경년변동, 육역으로부터의 유입오염부하량과 만내 수질간의 상호관계, 만내 오염물질의 해역 분포 및 변동 특성, 만내유입 오염물질의 거동특성에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 수질자료

본 연구는 국립수산과학원(구 국립수산진흥원)에서 실시한 1987년(포항신항 건설 전)의 15개 조사정점, 1993년부터 2000년까지 9년간(건설 후)의 14개 조사정점에서의 영일만 수질조사자료를 이용하여 영일만 수질의 경년변동, 수질상호간의 관련성을 고찰하였다. 수질조사정점은 건설후의 경우 Fig.1에 도시되어진 1~14정점이며, 건설전의 경우 후술하는 Fig.6과 Fig.10에 나타내었다. 사용되어진 수질항목은 수온(Water temperature), 염분(Salinity), 용존산소(DO), 생·화학적산소요구량(COD), 총질소(T-N), 총인(T-P) 등 6개 항목이다.

2.2 군집분석(Cluster analysis)

영일만 수질환경의 각 정점별 공간적 특성(특히, 포항신항 건설 전과 건설 후의 수질환경변화특성)을 살펴보기 위해 영일만내 6개 수질조사항목들에 대해 군집분석(Cluster analysis)을 수행하고, 군집분석결과를 덴드로그램(Dendrogram)으로 제시한 후 그 특성에 대해서 고찰하였다.

여기서 군집분석이란 일반적으로 각 객체(대상)의 유사성을 측정하여 유사성이 높은 대상집단을 분류하고, 같은 군집에 속한 객체들의 유사성과 서로 다른 군집에 속한 객체간의 상이성을 규명하는 통계분석방법으로, 대상들을 분류하기 위한 명확한 기준이 존재하지 않거나 기준이 밝혀지지 않은 상태에서 다양한

특성을 지닌 대상자들을 분석하는데 사용되는 기법이다(최종성, 2001).

본 연구에서 적용된 군집간의 거리는 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 채택하였으며, 군집화 방법에는 최장연결법(Complete Linkage Method)에 의해 검토하였다(박철석, 1998). 또한 조사자료는 수질항목별로 전 해역 표·저층 자료를 모두 평균하여 통계분석 하였다. 이상의 군집분석을 통해 해석한 결과를 바탕으로 영일만내에서의 수질특성에 따른 해역분할도를 작성하고, 유입 오염물질의 공간분포 특성에 대해서 고찰하였다.

2.3 오염물질의 거동특성

영일만 개발에 따른 오염물질의 시·공간적 변화를 살펴보기 위해 국립해양조사원(1971)의 영일만 및 부근일대 해양관측결과 보고서에 제시되어진 영일만 육수확산도를 근거로 하여 정점 2, 9, 8, 13에서의 층별 수질 및 오염물질의 시·공간 분포특성을 살펴보았다.

이를 위한 해석방법은 형산강으로부터 유출되어진 담수가 영일만내로 유입됨으로부터 외해로 유출되는 경로 상에서의 표층과 저층의 수온, 염분 및 영양염(T-N, T-P)농도 변화를 갈수기와 홍수기로 나누어 분석하였다. 또한 포항신항 건설 전(1987년)과 건설 후(1997년)에 대해서 군집분석결과에 따른 각 수괴의 수질특성을 공간분포를 통해 비교·검토하고, 개발에 따른 만내 수질변화에 대해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질의 경년변동

윤한삼 등(2002)의 1993년부터 2000년까지(8년간)의 수질항목 분석 결과에 따르면, 영일만의 경우 수온은 17~18℃를 유지하고 염분은 약 2‰ 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 DO와 COD의 농도변화를 보면, 상호 증감경향에는 차이를 보이나, 1996년 이후 COD의 감소가 부각되어 나타나는 것으로 보고 되었다.

Fig. 2는 1997년부터 2000년까지(4년간)의 계절별 수질 평균치의 변동을 나타낸 결과로(흰점-표층, 검은 점-저층), 각 연도별 총강우량은 각각 1202.90, 2267.80, 1808.32 1046.76mm이었다.

계절별로 수온의 변동은 크지 않으나, 염분의 경우 수심 상·하층의 변동이 하계의 경우 크기는 4.5‰ 정도 차이를 보이며, 동계의 경우는 거의 일정하다. DO의 경우 표층과 저층의 농도가 동계와 춘계의 경우 높고, 하계와 추계에 낮은 경향을 나타내었는데, 수질환경 기준상 전층에 6ppm이상의 I 등급 기준을 만족한다. 또한 층별로 살펴보면 9월의 저층이 대체로 낮고 5월의 경우 표층과 저층이 모두 높다. COD의 경우 2월과 5월이 작은 반면 8월이 크게 나타나고, 최근 들어 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 영양염인 T-N, T-P의 경우는 모두 11월이 가장 큰 경향을 보이지만, T-N농도의 경우 5월에 가장 낮고, T-P농도의 경우 8월에 가장 낮게 나타났다. 강우량이 많은 8월의 경우 COD는 최대값을 나타내지만 상대적으로 T-N은 평균치를, T-P는 최저치를 나타내고 있다.

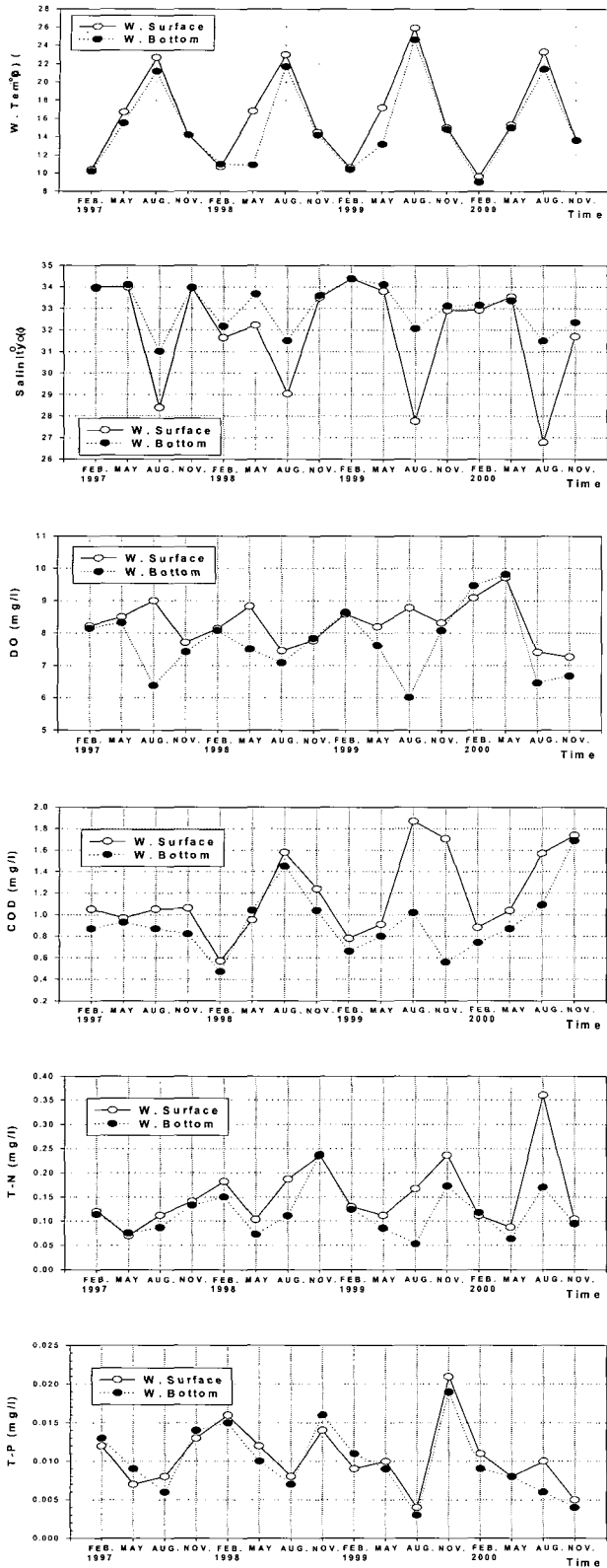


Fig. 2 Monthly variation of water quality

이상의 결과를 통해 영일만의 수질경년변동특성을 살펴보면 영일만의 수질은 육상으로부터의 담수유입에 따라서 계절별

변동을 나타내며, 대체로 만내 표층보다 저층에서의 수질이 악화되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 김기태(1992)가 지적한 바와 같이 (포항)신항 축조와 같은 인위적인 자연변조로 인한 해류의 차단이 막대한 오염원을 항 저층에 축적시키고, 아울러 형산강 하구에 위치한 송도해수욕장의 경우 1992년부터(수질오염으로 3급수 판정) 해수욕장으로서 그 역할을 수행하지 못한다고 지적한 바와 유사한 결과이다.

3.2 수질의 공간분포특성

포항신항 건설 후 영일만내 오염물질거동 패턴을 살펴보기 위해 Fig. 1에서 형산강 하천수 유출경로상에 위치하는 조사정점 2, 9, 8, 13에서의 표층과 저층의 수온, 염분 및 영양염(T-N, T-P) 농도 변화를 갈수기와 홍수기에 대해서 나타낸 것이 각각 Fig. 3 과 Fig. 4이다.

수온의 경우, 갈수기시 형산강에서 유출된 하천수의 영향으로 만중앙부에서 상승, 외해로 갈수록 감소하며, 표층과 저층의 경향은 거의 동일하다. 홍수기시 표층의 높은 수온의 하천수가 만내유입후 외해로 갈수록 감소경향을 나타내지만 저층의 경우는 갈수기시와 유사한 경향을 나타낸다. 염분의 경우, 일반적으로 외해로 갈수록 증가하고, 갈수기시는 표층이, 홍수기시는 저층이 염분농도가 높지만, 정점 8의 경우 표층과 저층이 역전되는 현상을 나타내었다.

영양염의 공간변동특성을 살펴보면 형산강 입구에서 가장 높고, 외해로 갈수록 낮아지는 경향을 T-N, T-P 모두 나타내었다.

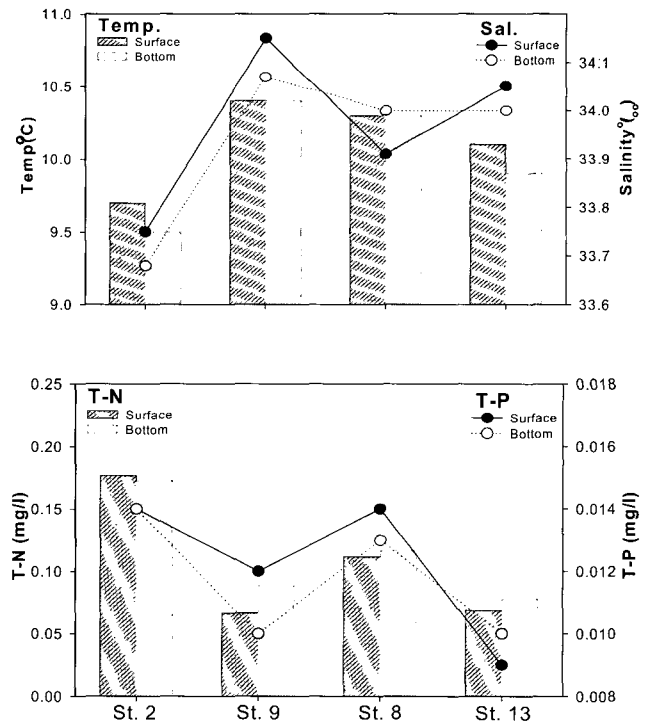


Fig. 3 Spatial distribution of pollutant load(February)

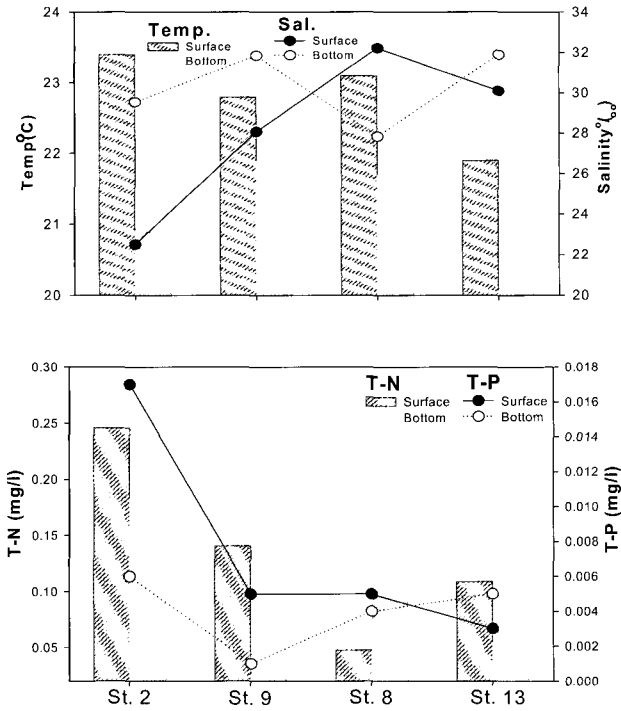


Fig. 4 Spatial distribution of pollutant load(August)

그러나 표층과 저층에서의 영양염 농도는 갈수기시와 홍수기시 다른 경향을 나타내었는데, 갈수기시 형산강 하구 표층에서 높게 나타난 T-N의 농도가 외해로 갈수록 저층이 표층보다 커지는 경향을 나타내고, 홍수기시는 정점 8을 제외하고는 표층이 크고, 저층이 낮으며, 외해로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. T-P의 해석결과에서도 T-N과 유사한 경향이 보였다.

이상과 같이 형산강으로부터 유출되어진 오염물질의 영일만 내 거동 패턴을 살펴보면 정점 8의 경우(포항제철 제4투기장 전면인근해역)는 염분의 표층과 저층의 역전현상과 주변정점들에 비해서 고농도의 영양염 수괴가 나타나는데, 이는 만내 유동장 특성상 오염물질의 수렴지역이 될 가능성이 높은 것으로 생각되어진다. 또한 영일만에 있어서의 수질상호관련성은 Fig. 5에서와 같이 영양염(T-N, T-P)과 COD의 상관성이 각각 93%, 87%로 매우 높게 나타났으며, 질소와 인의 경우 또한 약 98%의 높은 상관성이 나타남으로써, 거의 선형적인 관계를 보였다.

3.3 수질의 군집분석

Fig. 6과 Fig. 7은 영일만내 6개 항목의 수질자료로부터 포항 신항 건설 전(15개 정점)과 건설 후(14개 정점)의 군집분석에 의한 덴드로그램(Dendrogram)과 해역분할도를 나타낸다. Fig. 6에서 포항신항 건설 전인 87년의 경우 형산강 하구역(A), 포항구항 전면해역(B), 포항신항 인근해역(C), 영일만 중간역(D), 외해(E) 등 크게 4개의 특징적 영역으로 구분하였으며, 97년의 경우는 87년과 달리 냉천 인근해역(D), 임곡동 전면해역(E), 외해영역(F)으로 더욱 세분화되어진다. 이와 같이 영역이 세분화되어지는 것은 만내 수질이 일정한 수괴를 가지지 않고 주변환경에 따라서 영향을 받기 때문으로 생각할 수 있다.

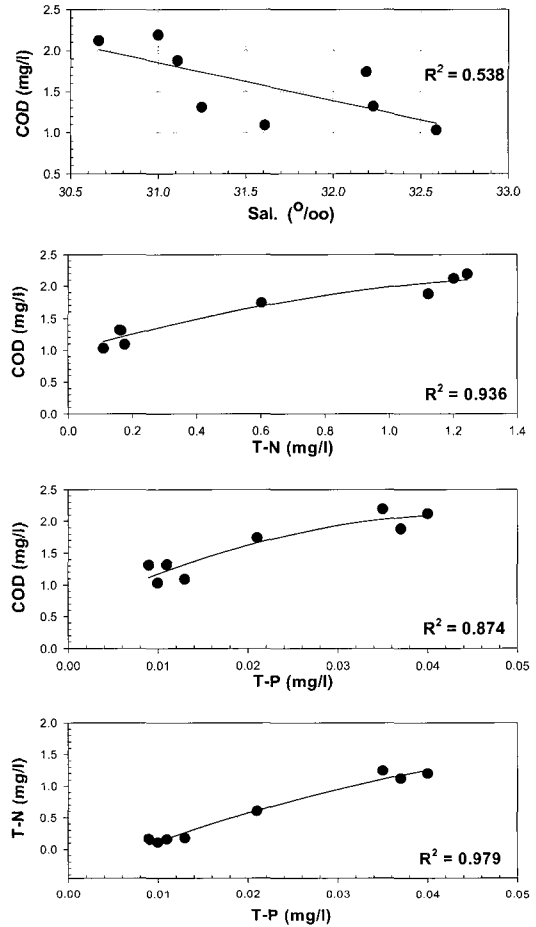


Fig. 5 Relationship of water quality

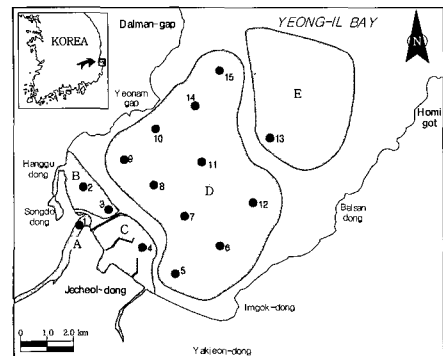
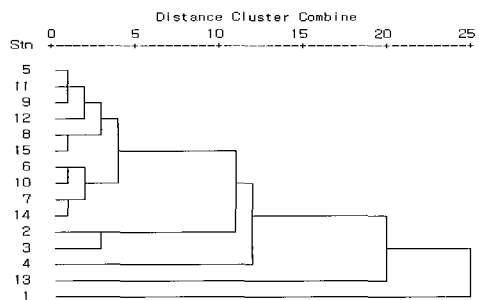


Fig. 6 Dendrogram and division of sea basin by cluster analysis(before construction)

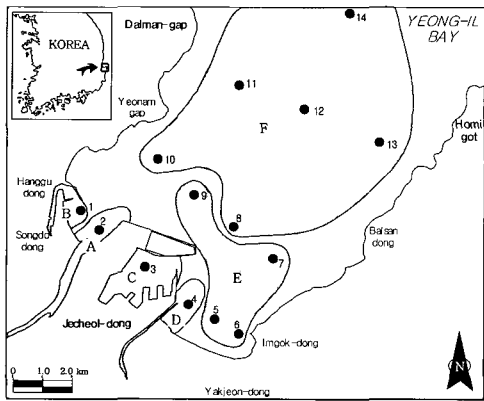
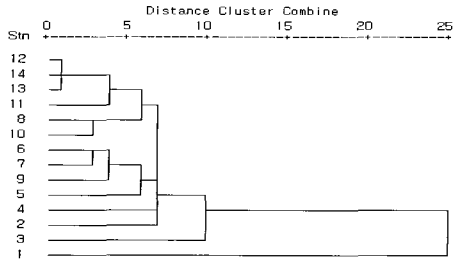


Fig. 7 Dendrogram and division of sea basin by cluster analysis(after construction)

이상과 같이 수질의 군집분석을 통해 포항신항 건설 전·후 해역분할에 따른 수질환경변화의 공간분포를 나타내면 Fig. 8과 Fig. 9와 같다.

건설 전의 경우(Fig. 8) 형산강 하구입구(A)를 제외하고는 염분농도가 약 33.6‰, COD는 1.23~1.6mg/l로 낮게 나타났으며, 영양염의 경우 T-N은 외해로 감에 따라 감소하는 경향을, T-P도 비슷한 경향을 보이고 있으나, 포항구항 인근해역(B)에서 낮고 포항신항 인근해역(C)과 영일만 중간역(D)에서 상대적으로 높은 수치를 나타내었다. 건설 후의 경우(Fig. 9) 염분은 외해 영역(F)을 제외하고는 대체로 낮은 상태를 나타내었고, 포항구항 해역(B)과 포항신항 내부해역(C)에서 상대적으로 낮은 수치를 나타내었다. COD와 DO농도의 지역별 특성을 살펴보면 포항구항 해역(B)과 포항신항 내부해역(C)에서 COD농도가 높고, 특히 포항구항 해역(B)이 낮은 DO 농도를 나타내어 전체 해역 중 가장 수질조건이 악화되어 있다는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 영일만의 외해해역(F)은 평균 COD농도가 0.56로 나타났다.

한편, 영양염농도의 변화를 살펴보면, 포항구항이 질소와 인 농도가 6개 해역 중 가장 높게 나타났으며, 외해로 감에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이상의 결과에서 87년의 경우 영일만 해역은 하구입구를 제외하고는 외해수와의 혼합이 강한 특성을 보이고 있으나, 포항신항 건설 후 외해수와의 해수교환의 차단효과 발생으로 인구밀집지역인 포항구항 인근해역과 포항신항 인근해역이 전반적으로 수질이 악화되어 있음을 알 수 있다.

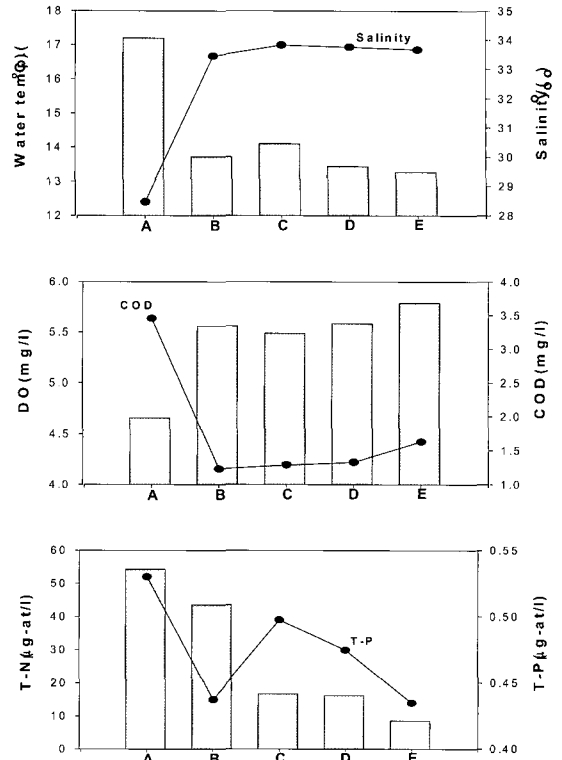


Fig. 8 Change of water quality at each sea basin by dendrogram(before construction)

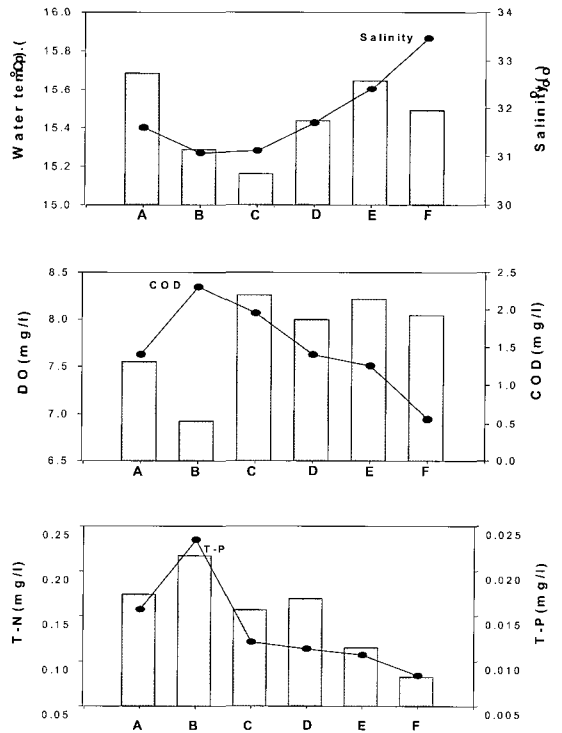


Fig. 9 Change of water quality at each sea basin by dendrogram(after construction)

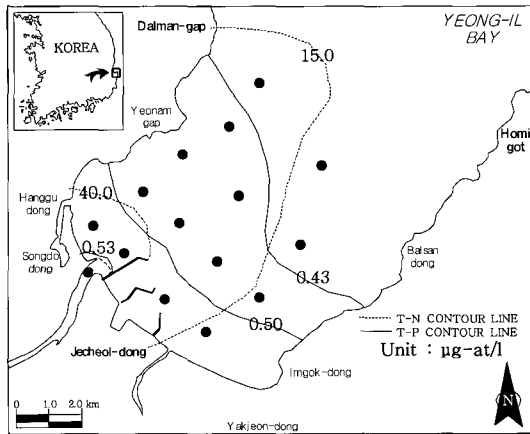


Fig. 10 Spatial concentration distribution of nutrient(before construction)

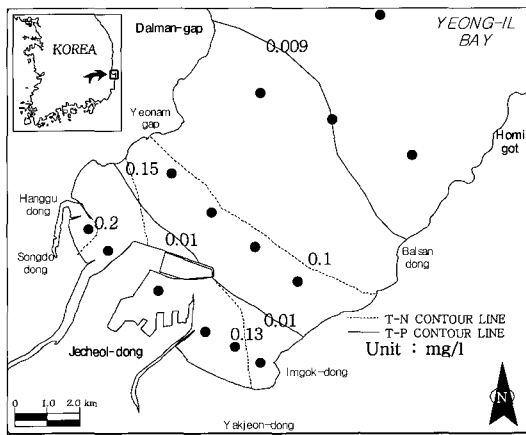


Fig. 11 Spatial concentration distribution of nutrient(after construction)

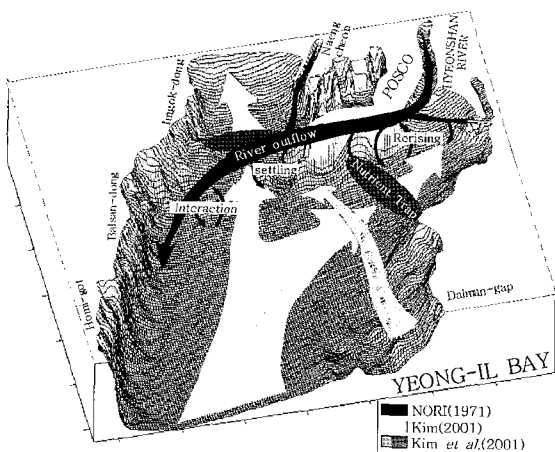


Fig. 12 The ideal system of river outflow and pollutant load movements

영양염 T-N, T-P의 농도분포를 해역분할을 고려하여 포항신항 건설 전·후에 대해 작성한 것이 각각 Fig. 10과 Fig. 11이다.

건설 전(Fig. 10)의 T-N의 경우 형산강 하구역(A)에서 최고치 약 54.215µg-at/l, 포항구항 인근해역은 약 43µg-at/l를 나타내고 외해와 인접한 해역중에서 영일만 북쪽 해안이 남쪽해안보다 영양염 농도분포가 큰 것을 알 수 있다. 이에 반해 건설 후(Fig. 11)는 포항신항을 중심으로 동·서측해역에 고농도의 영양염분포가 나타났으며 외해로 갈수록 육지해안선과 평행하게 농도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 T-P의 경우도 건설 전에는 형산강 하구입구에 한정되어진 고농도 분포가 건설 후에는 T-N의 농도 분포와 비슷한 경향을 나타내었다.

3.4 유입오염물질의 거동특성

이상의 수질항목의 군집분석 및 해역분할도를 통해서 영일만 유입오염물질의 거동특성을 모식화하면 Fig. 12와 같다. 영일만내 해수유동 및 잔차류 특성을 나타낸 그림을 통해 육상으로부터 만내로 유입된 오염물질이 만내 거동중에 해수와 희석 또는 침강되고, 침강된 오염물질은 저층의 고밀도 염분유량에 의해 만내 저층의 육지방향으로 운반될 것으로 생각할 수 있다.

이와 같이 운반된 오염물질은 영양염집적해역(Nutrient trap)을 형성하게 되는데 담수의 유입량이나 혼합형태에 따라 재부상하는 특성도 있을 것으로 생각된다. 따라서 영일만내 유입오염물질은 표층을 통한 외해로의 유출뿐만 아니라, 만내 저층에 영양염집적해역 저층에 축적될 것으로 판단된다. 이러한 현상은 포항신항을 중심으로 만내 저층의 양방향으로 Coastal trapping area을 형성시키며, 만내 수질오염을 가중시킬 것으로 생각된다.

이는 국립수산과학원(1971)과 김종규(2001)의 연구에서도 알 수 있듯 달만갑 해역에서 유입되는 약 10 cm/sec의 잔차류 성분에 의해 형산강과 냉천에서 유출된 하천수는 영일만의 동측 내만을 따라 외해로 유출된다는 것과 김현덕 등(2001)의 수치모형실험을 통해 영일만 중앙으로 돌출한 포항신항의 영향으로 일월동(도수 해수욕장) 전방해역에 정체성 해역이 형성된다고 보고한 기존 연구결과와 유사하다.

따라서 이상과 같은 영양염집적해역의 형성이 만내 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해서는, 앞으로 수·저질의 물질순환의 예측, 내부생산성 평가, 만내 수질에 미치는 유기물의 기여 등과 관련하여 보다 상세한 검토가 필요할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 영일만내 수질자료를 바탕으로 수질의 경년변동특성 및 수질항목별 상관관계에 대해 논의하고, 만내 오염물질의 해역 분포 및 변동 특성, 만내유입 오염물질의 거동특성에 대해서 고찰하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 영일만의 계절별 수질변동특성에 있어서 COD의 경우 2월과 5월이 작은 반면 8월이 크게 나타나고, T-N, T-P의 경우 두 가지 모두 11월이 가장 큰 경향을 보이지만, 질소농도의 경우 5월에 가장 낮고, 인농도의 경우 8월에 가장 낮게 나타났다. 또한 강우량이 많은 8월의 경우 COD는 최대값을 나타내지만 상대적으로 T-N는 평균치를, T-P는 최저치를 나타내고 있다.

(2) COD농도와 영양염(T-N, T-P)과의 상관성에 있어서는 영양염농도가 증가하면 COD농도도 증가하는 경향으로 상관계수도 각각 93%, 87%로 매우 높게 나타났다.

(3) 영일만 수질자료의 군집분석을 통해서 포항신항 전·후에 대한 해양분할도를 작성한 결과, 포항신항 개발후 포항신항을 중심으로 동·서측해역에 고농도의 영양염 수피가 나타났으며, 영일만은 인구밀집지역인 포항구항 인근해역과 포항신항 인근해역이 전반적으로 수질이 악화되어 있는 것으로 나타났다.

(4) 영일만내로 유입된 오염물질은 해수중 희석 또는 침강되고, 침강된 오염물질은 저층의 고밀도 염분유량에 의해 육지방향으로 운반되어 영양염집적해역(Nutrient trap)을 형성시켜 만내 수질오염을 가중시킬 것으로 생각된다.

한편, 영일만은 현재 영일신항건설이 진행중이므로 차후 영일신항 건설로 인한 해수흐름의 차단, 해수교환의 감소, 육상유입 오염물질의 외해유출 감소로 인해 야기되는 영일만내 수질악화에 대해서는 더욱 심도 깊은 연구가 추진되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 강양순, 김귀영, 심정민, 성기탁, 박진일, 공재열 (2002). "영일만 수질의 시공간적 변동", 한국수산학회지, 제35권, 제4호, pp 431-437.
- 국립해양조사원(NORI) (1971). 영일만 및 부근일대 해양관측결과 보고서, pp 34-49.
- 국립수산과학원 (1996~2000). 한국해양환경조사연보.
- 국립수산과학원 (1988). 연안어장기본조사보고서(경상북도편), pp 192-200.
- 김기태 (1992). 동해 남부 해역의 연구, 영남대 출판부, pp 17-33.
- 김종규 (2001). "영일만의 조석간차류 거동특성", 한국해양환경 공학회지 제4권, 제1호, pp 14-23.
- 김현덕, 김종인, 류청로 (2001). "영일만내의 유동과 수질특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 28-37.
- 박철석 (1998). 연안역 어업환경변화의 해석과 어업보상평가 연구, 부경대학교 박사학위논문, pp 30-47.
- 이동철 (2002). 영일만 연안의 이화학적 환경요인에 따른 식물플랑크톤의 계절적인 변동, 영남대학교 박사논문.
- 이인철 (2001). "부영양화해역의 내부생산효율에 대한 계절변동 특성", 한국해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 53-59.
- 윤한삼, 이인철, 류청로, 박종화 (2002). "영일만내 개발에 따른 오염물질의 시·공간적 변동특성", 한국수산학회 춘계학술 발표논문, pp 219-220.
- 윤한삼, 이인철, 류청로 (2003). "영일만 유입오염부하량과 수질의 시·공간적 변동특성(I) -하천유량과 유입오염부하량의 계절변동", 한국해양공학회지, 제17권 제4호, pp 23-30.
- 최중성 (2001). SPSS ver10을 이용한 현대통계분석, 북두출판사, pp 342-354.
- Lee, I.-C. and Hoshika, A. (2000). "Seasonal Variations in Pollutant Loads and Water Quality in Hiroshima Bay", J. of Japan Society on Water Environment, Vol 23, No 6, pp 367-373 (in Japanese).

2003년 6월 23일 원고 접수

2003년 9월 18일 수정본 채택