

第1次年度
報告書

BSPE 97607-00-1040-2

鎮海·馬山灣 水質環境 管理모델 開發(Ⅰ)

Development for the Water Quality Management Model
in Chinhae-Masan Bay(Ⅰ)

1997. 12.

研究機關
韓國海洋研究所

海洋水產部

제 출 문

해양수산부장관 귀하

본 보고서를 “진해·마산만 수질환경 관리모델 개발”에 관한 연구
과제의 제1차년도 보고서로 제출합니다.

1997년 12월

총괄연구책임자 : 채장원

해수유동 및 수질모델링 분야

연구책임자 : 채 장 원

연 구 원 : 김창식, 오병철, 이종찬, 조홍연

한남대학교 정태성

(주)동일기술공사 유혁근

연구 조원 : 김용권, 박승준, 백원대, 김윤철

최동숙

연안 생태환경분야

연구책임자 : 김 응 서

연 구 원 : 장 만, 김민철, 김정선

연구 조원 : 이종수, 조진하, 오귀숙

요 약 문

I. 연구제목

진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(1)

II. 연구의 목적

진해·마산만의 효율적인 수질관리를 위한 3차원 수질환경변화 예측시스템과 수질환경 자료의 DB 구축

III. 연구의 방법 및 범위

연안역의 수질관리를 위한 수질 모델링 작업을 수행하기 위해서는 수질 변화에 영향을 미치는 제반인자의 지속적인 측정과 주요 수질항목의 변화 경향을 관측해야한다. 따라서 해수수질에 영향을 미치는 주요 하·폐수 유입 오염부하를 측정하고 그에 따른 해수수질의 변화를 측정하였으며 주요 수질항목 측정결과는 수질변동 예측을 위한 수질관리 모형의 구축에 이용하도록 하였다. 조사내용 및 방법과 연구범위는 전년도의 결과를 바탕으로 주요 오염 부하량을 하계에 집중적으로 측정하였으며 마산만은 계절별로 진해만은 5월 및 8월에 각종 해수 수질항목을 측정하였다. 조사지역은 진해·마산만의 해수유동경로 9개 지점, 하·폐수처리장 방류해역 1개 지점, 진해만 6개 지점을 표층, 상층, 하층으로 나누어 측정하였다.

본 과제의 연구내용은 크게 두가지로 이루어져 있다. 첫째는 현장조사를 통해 식물플랑크톤의 생물량, 동물플랑크톤의 생물량, 동물플랑크톤의 섭식률등을 측정하여 마산·진해만의 수질환경관리 3차원 모델 개발에 필요한 생물자료를 제공하는 것이다. 이를 위해 현장에서 6차례에 걸친 실험을 통하여 식물플랑크톤의 생물량, 동물플랑크톤의 개체수와 섭식률을 표층과 저층에서 측정하였다. 둘째는 이 해역에서 기존에 조사되어진 자료를 획득하여 부유생태계의 구성원인 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 종조성, 조사해역내에서의 시·공간적인 분포 형태, 시간에 따른 군집의 천이 형태 등을 파악하여 자료의 DB화와 GIS 개발에 필요한 부유생물 자료와 환경자료를 제공하는 것이다. 이를 위해 마산·진해만에서 1970년대부터 현재까지 약 30년간의 자료를 검토하여 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 우점종의 시간별 변화를 조사하였고, 식물플랑크톤의 생물량의 시간에 따른 변화, 동물플랑크톤 개체수의 시간별 변화를 평가하였다.

육지로부터 공장폐수, 생활하수 등의 오염물질이 유입되는 연안 해양환경에서 오염물의 확산은 퇴적물과 함께 조류 및 파랑 등과 관련되어 뜬짐이나 밀집 이동 형태로 이루어진다. 오염물질은 이동과정에서 일시 침전되었다가 다시 부유되어 오염지역에서 멀리 이동하기도 한다. 따라서 연안 지역에서 오염물질의 이동 모델을 만들기 위해서는 퇴적물의 특성을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 이 사업의 지질분야에서는 퇴적물의 특성과 퇴적물에 함유된 중금속들의 연차적인 변화를 파악하고 진해·마산만의 오염물질의 근원과 이동양상을 밝히는 것이 목적이다. 이에, 연구지역 퇴적물의 지화학적, 퇴적학적 분석결과를 DB화하기 위한 각 분석항목의 정량화 작업, 진해·마산만 주변해역의 퇴적물 특성 분석, 표층퇴적물의 지화학적 년 변화 측정을 위한 조사, 시추퇴적물의 지화학적 특성 조사를 수행하였다.

봄과 여름철에 발생하는 해수의 성층화 현상과 빈산소층의 형성 등, 이러한 수질악화 현상을 좀 더 정확히 분석하고 예측하기 위하여 3차원 수질모델을 수립하였다. 이를 위해, 3차원 해수유동 수치실험과 수질모형의 입력 경계조건 및 검증자료를 확보하기 위한 수질항목 조사, 생물 및 지질조사분석을 수행하였다.

IV. 연구결과 및 활용에 대한 건의

진해·마산만은 진해시, 창원시, 마산시, 고성군, 통영시, 거제시의 육지부로 둘러 쌓여 있는 전형적인 폐쇄성해역이다. 진해·마산만의 해수 유동경로에 따라 측정된 결과에 의하면 진해·마산만의 외해입구에서 마산 내만으로 들어 올 수록 수질이 점점 악화되는 경향을 보여주고 있다. 진해·마산만의 수질측정결과를 항목별, 지점별, 깊이별, 계절별, 연도별 변화로 나누어 고찰하였다.

적조미생물 발생과 표층으로의 담수(오염물질)유입으로 표층의 수질이 상대적으로 좋지 않았다. 마산만 해수이동경로 해역에서 8년동안의 해수수질 변화추이에 의하면 1997년에는 COD, TSS, 질소의 년평균 농도가 낮아졌으며, 반면에 인의 농도는 증가하였다. 그리고 Secchi disk 투명도는 2.2m로 개선되어 전반적으로 해수수질이 다소 좋아졌다. 진해만의 연도별 수질변화는 일정한 경향 없이 증감을 계속하고 있으며, COD의 경우 1995년 이후부터 서서히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 1997년의 식물 플랑크톤 조사결과는 규조류가 72%, 쌍편모조류가 22%로 대부분을 차지하였으며 97년의 결과를 고찰할 때 식물플랑크톤 대발생이 마산만 수로 전정점에 걸쳐서 나타나지 않았으며 현존량 또한 매우 감소한 점이 특이하였다.

마산·진해만에서 보고된 식물플랑크톤은 총 253종이었고, 그 중 규조류는 151종이고 와편모조류는 89종이었다. 동물플랑크톤은 유충섬모충류 28종, 유행동물 1종, 요각류 33종, 지각류 5종, 모악류 3종, 유형류 2종, 다양한 부유성 유생 등이 보고되었다. 마산만에서 엽록소의 양은 하계에 가장 높았고, 동계에 가장 낮았다. 한편 저층보다는 표층에서 더 높았다. 특히 와편모조류가 우점하는 9월에는 표층의 엽록소량은 저층보다 아주 높았다. 동물플랑크톤 중 우점하는 요각류의 개체수는 춘계와 추계에 높고 하계에 낮아, 하계의 높은 식물플랑크톤 생물량의 원인 중에 하나인 것으로 판단되었다. 요각류의 초식률($\mu\text{g} \cdot \text{chl-a}/\text{copepod}/\text{d}$)은 전 실험기간을 통해 0.0096~0.2856, 섭식률($\mu\text{g} \cdot \text{C}/\text{copepod}/\text{d}$)은 0.432~12.852 범위였다. 요각류 군집에 의한 초식률($\mu\text{g} \cdot \text{chl-a} \cdot /\text{l}/\text{d}$)의 범위는 표층에서는 0~3.750, 저층에서는 0.014~0.094이었으며, 전 수층에서의 평균 군집 초식률은 0.007~1.850였다. 일반적으로 표층보다는 저층에서 요각류 군집에 의한 섭식률 변화폭이 적었다. 조사해역에서 요각류 군집은 5월에 식물플랑크톤 생물량의 최대 11.9%까지 섭식하였으며, 10월에 가장 낮아 0.2%를 소비하였다.

보다 정확한 수질예측 모델을 개발하기 위해서는 대발생을 일으키는 우점종 식물플랑크톤에 대한 다양한 초식성 동물플랑크톤의 선호도 및 섭식률 측정이 필요할 것이다. 또한 초식자의 개체수 변동이 식물플랑크톤의 생물량을 조절하는 중요한 인자중의 하나이므로, 동물플랑크톤의 개체수를 조절하는 포식자에 대한 연구가 향후 이루어져야 할 것이다. 한편 적조를 유발하는 식물플랑크톤에 대한 요각류의 섭식효과가 낮으므로, 이들을 소비할 수 있는 대체 천적생물을 찾아내 수질개선에 이용하는 것도 과제로 개발해 볼 가치가 있다. 환경요인의 변동이 심하고, 동·식물플랑크톤의 군집변화가 단기간에 걸쳐 크게 변화하는 곳에서는 많은 자료를 축적하여야 보다

정확한 모델 개발이 가능할 것이다. 따라서 고정 조사해역에서 장기적인 조사가 이루어져야 할 것이다.

진해·마산만의 표층퇴적물은 일반적으로 분급이 불량한 니질 퇴적물로 구성되어 있다. 표층퇴적물은 마산항(M1)에서는 평균입도가 1996년 8.73 ϕ 에서 1997년 6.73 ϕ 로 조립해졌다. 마산항을 제외하고는 전반적으로 표층퇴적물은 평균입도 및 조성비에서 연변화가 거의 없는 것으로 보인다. 1996년과 1997년 표층퇴적물에 함유된 중금속 함량을 비교하면, 마산항(M1)에서는 Al, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd이 증가하였다. 마산만내에서는 Cr, Cu, Zn 등이 증가하였으며, 가덕수로내(G2, G3, G4)에서는 Cr, Co, Ni, Cu, Zn 함량이 증가하였다. 가덕수로내의 중금속 함량의 증가는 마산만내에서의 유입보다는 외해의 오염물질의 유입에 의한 것으로 보인다.

진해·마산만에서 수행된 퇴적물의 특성 및 중금속 함량의 연변화 자료는 연안환경의 퇴적학적 변화를 추정할 수 있는 자료로서 활용될 것이다. 퇴적학적 자료는 수질환경 관리모델 구축을 위해 지속적인 자료의 첨가와 수정이 요구되며, 부유물질의 농도 및 성분분석의 추가적인 자료가 요구된다.

진해·마산만의 3차원 수질관리모델은 오염부하량 모형, 장기 해수유동모형 및 수질모형으로 구성된다. 제1단계에서는 3차원 수질모형을 수립하기 위하여, 3차원 장기 해수유동 모형과 3차원 수질모형의 프로그래밍 작업과 입력자료 산정작업을 수행하였다. 또한, 진해·마산만의 3차원적인 수질환경 특성을 보다 자세하게 파악하기 위하여 수온, 염분, DO 항목에 대한 보충측정을 수행하였으며, 모델의 보정 및 검증자료로 활용하기 위하여 해역의 수질항목 및 오염부하량 자료를 DB화 하였다.

본 연구에서 개발하고 있는 3차원 수질관리모형은 오염부하량 추정모형과 수질모형의 보정·검증과정을 수행하면, 진해·마산만의 효율적인 수질관리 방안 및 개발계획에 따른 수질환경의 영향파악을 수행할 수 있다. 또한, 가상의 시나리오에 대하여 적절한 수질변동을 예측할 수 있으므로, 수질개선을 위한 최적 대안을 도출할 수 있으며, 수질환경의 악화에 따른 저감방안을 제시하는 데 활용할 수 있다.

SUMMARY

I . Title

Development for the Water Quality Management Model
in Chinhae-Masan Bay (I)

II . Goal and Objectives

Development of 3-D water quality management model
and setting up a scientific DB system for Chinhae - Masan Bay

III. Methods and Scope

Major factors and water quality parameters should be monitored to have better understandings of coastal ecosystem and coastal water management by applying water quality modeling. Thus, input loadings and temporal variations of sea water quality were continuously measured and the results were utilized as input data for the establishment of water management model to predict the changes of water quality. The study of input loadings was conducted during the summer months and 16 sites including 12 water exchange channels of Chinhae - Masan Bay were investigated referring the results of previous year.

There are two objectives of the study on the planktonic ecosystem. The first one is to provide plankton data such as phytoplankton biomass in terms of chlorophyll, zooplankton abundance, and ingestion rate through *in situ* experiment both in the surface and bottom layer to develop a 3-D water quality management model in Chinhae–Masan Bay. The second one is to supply the biological and environmental data to develop Geographical Information System (GIS). To do this, previously reported data, for about 30 years, such as spatial and temporal changes in dominant species of phytoplankton and zooplankton, phytoplankton biomass, and zooplankton abundance were reviewed and analysed.

In marine environment, pollutants of industrial and living wastes with sediments are transported in suspension and bed load, related to tidal currents and waves. During the transportation, the materials may be temporarily deposited on the sea-floor and then resuspended into the water column. During these cycles, the contaminants may transport far away from the contaminated site. Therefore, in order to construct a predictive model for contaminant transport in coastal regions, it is necessary to understand details of the sediment characters. The objective of this study is to understand the sediment characters and contents of heavy metals within the sediments and clarify transport mechanisms of contaminants in Chinhae–Masan Bay. Thus, quantitative analysis of sedimentary and geochemical data for water quality model, analysis of sedimentary characteristics, analysis of geochemical properties, and investigation of vertical sedimentary characters are carried out.

Three-dimensional water quality model have been setting up for the more detailed analysis and prediction of the water quality degradation, e.g., stratification and formation of the water mass hypoxia occurring in spring and summer seasons. Three-dimensional tidal circulation modeling, measurement of the water quality constituents, and analysis of the biological and geological data were carried out for the 3-D water quality modeling.

IV. Result and Recommendations

The water quality is directly affected by the incoming loadings because Chinhae-Masan Bay is a typical closed one surrounded by the land. The water quality has been deteriorated as it goes from the mouth of bay to the upper part of bay through the water channel. The results were also presented and discussed by depth profiles of water quality parameters, and seasonal and annual changes in the stations. It was found that the water quality of upper layer was generally bad due to incoming of pollutants through the upper layer of sea water and the occurrence of red tide in upper layer.

In 1997, the water quality in water channels of Masan Bay by secchi disk transparency, COD, suspended solids, and nitrogen has been appeared to be improved when compared to the data obtained during 1990~1997. Annual water quality changes in Chinhae Bay showed a fluctuated trend by water quality parameters measured, however, COD concentration was more or less increased. The most dominant species of phytoplankton was diatom accounted for 72%, and the next abundant one was dinoflagellate accounted for 22% in 1997. Phytoplankton blooms were not found at all sites as

previous years and number of phytoplankton was also remarkably decreased at all sites.

A total of 253 species of phytoplankton, including 151 species of diatoms and 89 species of dinoflagellates, were reported in Chinhae–Masan Bay. Zooplankton community of the study area consisted of 28 species of tintinnids, 1 rotifer, 33 copepods, 5 cladocerans, 3 chaetognaths, 2 appendicularians, and various meroplanktonic larvae of benthic animals. Chlorophyll concentrations were higher in summer and lower in winter, and concentrations in the surface layer were higher than those in the bottom layer. Especially chlorophyll concentrations were extremely higher in the surface layer in September compared with bottom layer, when dinoflagellates were dominant. Copepods, the most dominant zooplankton in the study area, showed higher abundances in spring and fall, and lower abundances in summer. Low grazing pressure in summer was believed to be one of the factor that caused high biomass of phytoplankton in this season. Individual grazing rates of copepod ranged from 0.0096 to 0.2856 chl-a/copepod/d, and individual ingestion rates ranged from 0.432 to 12.852 μg C/copepod/d throughout the experimental period. Community grazing rates of copepods ranged from 0 to 3.750 μg chl-a/community/d in the surface layer, and from 0.014 to 0.094 μg chl-a/community/d in the bottom layer. Average community grazing rates throughout the water column ranged between 0.007 and 1.850 μg chl-a/community/d. Copepod community consumed up to 11.9% of the total phytoplankton biomass in May, and minimum was 0.2% in October.

To improve a water quality model, measurement of selectivity and ingestion rate of herbivorous zooplankton to the dominant phytoplankton species, including toxic phytoplankton, occurring in the study area is necessary. As abundance of herbivorous zooplankton is one of the important factor to control phytoplankton biomass, measurement of predation pressure on the herbivores by planktivorous zooplankton is also necessary in the future study. Copepod is known to be an inefficient grazer on the blooming or toxic dinoflagellates. Thus effort will be made to find a substitute grazer that consume them efficiently, and use it to develop a biological method to improve water quality. Chinhae-Masan Bay is very complicated system where environment and phytoplankton and zooplankton community undergo a rapid change, therefore long-term monitoring is essential for the developing water quality model.

The surface sediments in Chinhae-Masan Bay generally consist of poorly-sorted muddy sediments. The mean-grain size of surface sediments in Masan harbour(M1) was 8.73ϕ in 1996 and 6.73ϕ in 1997, which was coarser in 1996. There is little annually change in mean-grain size and composition of surface sediments in the study area except Masan harbour. The contents of heavy metals showed annual variations between 1996 and 1997. In 1997, the contents of Al, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd increased in Masan bay. The contents of Cr, Co, Ni, Cu, Zn increased in Gadeog channel. The increases in heavy metal contents in Gadeog channel may be due to influx contaminants from the open sea.

The annual data of sediment characters and heavy metal contents can be

used to predict the changes of sedimentary environments in Chinhae–Masan Bay. For development of water quality model, the sedimentary data including characters of suspended materials will be required to add and correct continuously.

Three-dimensional water quality model for the environmental management is based on three submodels, i.e., pollutant load model, long-term water circulation model, and water quality model. In first stage, the model was coded and input parameters were estimated for the three dimensional water quality modeling. Water temperature, salinity and dissolved oxygen in vertical direction at several stations were measured in the bay for the detailed analysis of the water quality characteristics. A DB system of the water quality constituents and pollutant loads was set up for the efficient use of the model calibration and verification in Chinhae–Masan Bay.

Three-dimensional water quality model for the environmental management is now setting up through the linkage of the pollutant load model and model calibration–verification based on the monitoring data. Then, this model can be used to predict the environmental influences due to large scale projects and further to suggest the mitigation measures on the water environment degradation based on the simulation result analysis of various scenarios.

목 차

요약문	3
SUMMARY	9
목차	15
CONTENTS	17
표목차	19
그림목차	21
제1장 서론	25
제2장 진해만 유입 오염 부하량 및 수질모니터링	27
제1절 각종 육상기원 오염물질의 진해만 유입 부하량	27
제2절 진해만의 해수 수질	31
제3절 진해·마산만의 식물플랑크톤	49
제3장 부유생태계 변화 예측	61
제1절 서론	61
제2절 재료 및 방법	62
제3절 부유생태계의 특징	64
제4절 동물플랑크톤의 섭식률	81
제5절 결론 및 향후 연구방향	91
제4장 퇴적환경 및 오염퇴적물 변화 분석	99
제1절 서론	99

제2절 연구방법	99
제3절 진해·마산만 표층퇴적물 특성	100
제4절 수직층서 연구	105
제5절 퇴적물의 중금속 오염	114
제6절 퇴적환경과 오염퇴적물의 집적	128
제5장 3차원 해수유동 및 수질모델링	131
제1절 서론	131
제2절 진해·마산만 3차원 해수유동 모델링	135
제3절 3차원 수질모델의 구조 및 특성	145
제6장 결론 및 토의	175
부록	
A. 자연과학분야 자료 DB 및 현장측정	181
B. 해양방류에 의한 주변해수 수질변화 검토	193
C. 진해·마산만 개발여건 및 수질환경개선 방안	217

CONTENTS

요약문	3
SUMMARY	9
목차	15
CONTENTS	17
List of Tables	19
List of Figures	21
Chap. 1. Introduction	25
Chap. 2. Water quality and pollutant load monitoring in Chinhae Bay	27
Sec. 1. Land-based pollutants loads in Chinhae Bay	27
Sec. 2. Seawater quality in Chinhae Bay	31
Sec. 3. Phytoplankton in Chinhae · Masan Bay	49
Chap. 3. Temporal Succession of Phytoplankton and Zooplankton	61
Sec. 1. Introduction	61
Sec. 2. Materials and Methods	62
Sec. 3. Characteristics of Planktonic Ecosystem	64
Sec. 4. Ingestion rate of Zooplankton	81
Sec. 5. Conclusions and Suggestion	91
Chap. 4. Changes of sediments and contaminants	99
Sec. 1. Introduction	99

Sec. 2. Methods	99
Sec. 3. Characteristics of Surface Sediment	100
Sec. 4. Vertical Sedimentary sequences	105
Sec. 5. Contamination of sediment	114
Sec. 6. Sedimentary environments and accumulation of contaminants	128
Chap. 5. Three-dimensional tidal circulation and water quality modeling ...	131
Sec. 1. Introduction	131
Sec. 2. Three-dimensional tidal circulation modeling in Chinhae-Masan Bay	135
Sec. 3. Structure and characteristics of the 3-D water quality model	145
Chap. 6. Conclusions and discussions	175
Appendix	
A. DB of the Scientific Data and In-situ Monitoring	181
B. Review of the ambient water quality variation due to effluent discharges	193
C. State of the development and water quality improvement method in Chinhae – Masan Bay	217

표 목 차

표 2.1.1	마산·창원시의 토지이용 구분	31
표 2.2.1	마산만의 연도별 수질변화(1990~1997)	49
표 2.3.1	조사 기간 중 출현 식물플랑크톤의 분류군	51
표 2.3.2	조사 기간 중 진해만의 지점별 (A ₁ ~A ₁₀) 식물 플랑크톤의 현존량	55
표 2.3.3	조사 기간 중 진해만의 지점별 (B ₁ ~B ₆) 식물 플랑크톤의 현존량	57
표 2.3.4	조사 기간 중 진해만의 지점별 (A ₁ ~A ₁₀) 우점종 현존량	59
표 2.3.5	조사 기간 중 진해만의 지점별 (B ₁ ~B ₆) 우점종 현존량	60
표 3.3.1	마산만에서 1974년 9월부터 1975년 6월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종	67
표 3.3.2	진해만에서 1976년 7월부터 1978년 5월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종	68
표 3.3.3	진해만에서 1974년 9월부터 1980년 1월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종	69
표 3.3.4	진해만에서 1979년 8월부터 1980년 9월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종	70
표 3.3.5	마산만(덕동)에서의 식물플랑크톤 우점종	73
표 3.3.6	마산·진해만에서 보고된 요각류 (*는 우점종)	76
표 3.4.1	요각류의 초식률 ($\mu\text{g chl-a/copepod/h}$, $\mu\text{g chl-a/copepod/d}$)과 섭식률 ($\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	85
표 4.3.1	마산·진해만에서 채취한 표층 및 시추퇴적물 조사 정점 (1996년)	103
표 4.3.2	마산·진해만에서 채취한 표층퇴적물의 조사 정점 (1997년)	104

표 4.3.3	마산·진해만에서의 표층퇴적물과 시추퇴적물의 특성 (1996년)	107
표 4.3.4	마산·진해만에서의 표층퇴적물의 특성 (1997년)	110
표 4.3.5	1996년, 1997년 표층퇴적물의 변화	112
표 4.5.1	마산·진해만 해역 표층퇴적물에 포함된 중금속 함량 (1996년)	119
표 4.5.2	마산·진해만 해역 표층퇴적물에 포함된 중금속 함량 (1997년)	125
표 4.5.3	마산·진해만 해역 오염퇴적물의 연변화	127
표 5.1.1	하계 마산만의 DO, 질소 및 인 농도(한국해양연구소, 1990)	131

그림 목 차

그림 1.1.1 수질관리모델링을 위한 공동연구 수행시스템	26
그림 2.1.1 진해만의 시료채취 지점	28
그림 2.1.2 조사 지점의 유입유량	29
그림 2.1.3 조사 지점의 COD 부하량	29
그림 2.1.4 조사 지점의 TSS 부하량	29
그림 2.1.5 조사 지점의 T-P 부하량	30
그림 2.1.6 조사 지점의 TIN 부하량	30
그림 2.2.1 방류지점과 인근지점과의 TIN 비교	34
그림 2.2.2 방류지점과 인근지점과의 PO4-P 비교	34
그림 2.2.3 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 COD 농도	35
그림 2.2.4 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 TSS 농도	35
그림 2.2.5 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 TIN 농도	36
그림 2.2.6 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 PO4-P 농도	36
그림 2.2.7 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 Transparency	37
그림 2.2.8 진해만 외만의 지점별(B1-B6) COD 농도	38
그림 2.2.9 진해만 외만의 지점별(B1-B6) TSS 농도	38
그림 2.2.10 진해만 외만의 지점별(B1-B6) TIN 농도	39
그림 2.2.11 진해만 외만의 지점별(B1-B6) PO4-P 농도	39
그림 2.2.12 진해만 외만의 지점별(B1-B6) Transparency	40
그림 2.2.13 깊이별 (A1-A10) COD 농도 비교	42
그림 2.2.14 깊이별 (A1-A10) TSS 농도 비교	42
그림 2.2.15 깊이별 (A1-A10) TIN 농도 비교	43
그림 2.2.16 깊이별 (A1-A10) PO4-P 농도 비교	43

그림 2.2.17 계절별 해수(A1-A10)의 COD 평균농도	44
그림 2.2.18 계절별 해수(A1-A10)의 TSS 평균농도	44
그림 2.2.19 계절별 해수(A1-A10)의 TIN 평균농도	45
그림 2.2.20 계절별 해수(A1-A10)의 PO4-P 평균농도	45
그림 2.2.21 계절별 해수(A1-A10)의 평균 Transparency	46
그림 2.2.22 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 COD 농도	46
그림 2.2.23 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 TSS 농도	47
그림 2.2.24 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 PO4-P 농도	47
그림 2.2.25 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 Transparency	48
그림 3.3.1. 조사 시기의 표층과 저층의 수온과 염분	65
그림 3.3.2. 수온(°C), 염분(%), D.O.(mg/l)의 월별 변화	66
그림 3.3.3. 엽록소량의 연간 변화	74
그림 3.3.4. 마산·진해만의 요각류(copepod)와 지각류(cladocera) 개체수의 계절변화	78
그림 3.3.5. 마산·진해만에 출현하는 요각류의 주간별 개체수 변화	79
그림 3.3.6. 마산내만에서의 채집된 성체 요각류 개체수의 월별 변화	80
그림 3.3.7. 마산만에서 출현한 요각류 개체수의 일일변화	81
그림 3.4.1. 조사정점에서 측정한 표층과 저층의 엽록소량	82
그림 3.4.2. 조사정점에서의 요각류 개체수	83
그림 3.4.3. 표층과 저층에서의 동물플랑크톤 개체당 초식률	86
그림 3.4.4. 조사해역 요각류의 평균 개체당 섭식률 (ingestion rate; $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)의 계절변화	88
그림 3.4.5. 조사해역 표층과 저층에서의 요각류 군집 섭식률과 수층내 평균 군집 섭식률	89
그림 3.4.6. 요각류 군집이 소비한 식물플랑크톤의 양 (전체량에 대한 %)	90

그림 4.3.1. 표층퇴적물 및 시추퇴적물 정점도(마산·진해만, 1996년)	101
그림 4.3.2. 마산·진해만 해역에서 채취한 표층퇴적물의 정점도 (1997년) ...	102
그림 4.3.3. 마산·진해만 해역의 표층퇴적물의 평균입도 (1996년)	106
그림 4.3.4. 마산·진해만 해역의 표층퇴적물의 평균입도 (1997년)	109
그림 4.3.5. 1996년, 1997년 표층퇴적물 및 중금속 비교 정점도	111
그림 4.5.1. 표층퇴적물 함량에 포함된 중금속 함량 (마산·진해만, 1996년) ...	116
그림 4.5.2. 표층퇴적물 함량에 포함된 중금속 함량 (마산·진해만, 1997년) ...	121
그림 5.1.1 수질관리모델	133
그림 5.2.1 관측된 M_2 분조 조류타원의 분포도	137
그림 5.2.2 대조기 조류분포	138
그림 5.2.3 소조기 표층 유속분포	139
그림 5.2.4 소조기 하층 유속분포	140
그림 5.3.1 수질모형 구획의 변수정의체계	157
그림 5.3.2 수질모형의 구획별 계산모식도	158
그림 5.3.3 수질관리모델을 위한 진해만의 구획분할	160

제1장 서론

진해·마산만의 효율적 이용, 개발 및 환경보전을 위해서는 적절한 환경관리 대책 및 관리모형이 수립되어야 한다. 진해·마산만 수질관리 모형개발연구는 제1단계 : 3차원 수질모형 및 관련 부모형(해수유동모형, 식물플랑크톤-동물플랑크톤 상호작용 부모형, Water-Sediment Interaction 부모형 등)의 수립 및 적용, 제2단계 : GIS 수립 및 오염부하량 예측모형(강우-유출모형, 점오염원 및 비점오염원 유출모형)의 수립, 진해·마산만 지역의 환경에 영향(악화 또는 개선)을 미치는 개발계획 및 환경시설의 건설 등에 대한 조사 및 환경영향평가, 제3단계 : 제1, 2 단계의 연구결과를 활용·분석하여 진해·마산만의 특성에 적합한 효율적인 환경관리대안의 도출 및 정책결정을 위한 유용하고 방대한 자연과학 DB 제공으로 구성되어 있다.

대상 해역의 특성에 적합한 환경관리를 수행하기 위해서는 유역 및 해역의 물리·화학·생물학적인 특성 파악을 위한 자연과학분야의 통합연구 및 3차원 수질환경변화 시스템을 구축하여야 하며, 연안지역 통합관리를 위한 자연과학분야의 수질환경 관리자료(DB) 시스템을 수립하여 정책결정을 위한 기본자료를 제공하여야 한다. 따라서, 수질관리모델링 작업을 수행하기 위한 수질변동에 영향을 미치는 제반인자의 지속적인 측정 및 분석(경남대학교), 진해·마산만의 수질변화 예측 모델개발시 필요한 생태자료 및 GIS 개발을 위한 조사해역의 생태특성 자료 획득(한국해양연구소 해양생물연구부)·DB화, 진해·마산만 해저 퇴적물 특성 및 지화학 분석에 의한 오염도 측정과 진해·마산만 수질환경관리 모델에 필요한 지질 및 지화학분야 DB수립(한국해양연구소 해양지질연구부), 3차원 해수순환 및 수질모델링 및 자연과학분야자료 DB 통합(한국해양연구소 연안·항만공학연구센터) 등을 추진하였다(그림 1.1.1 참조).

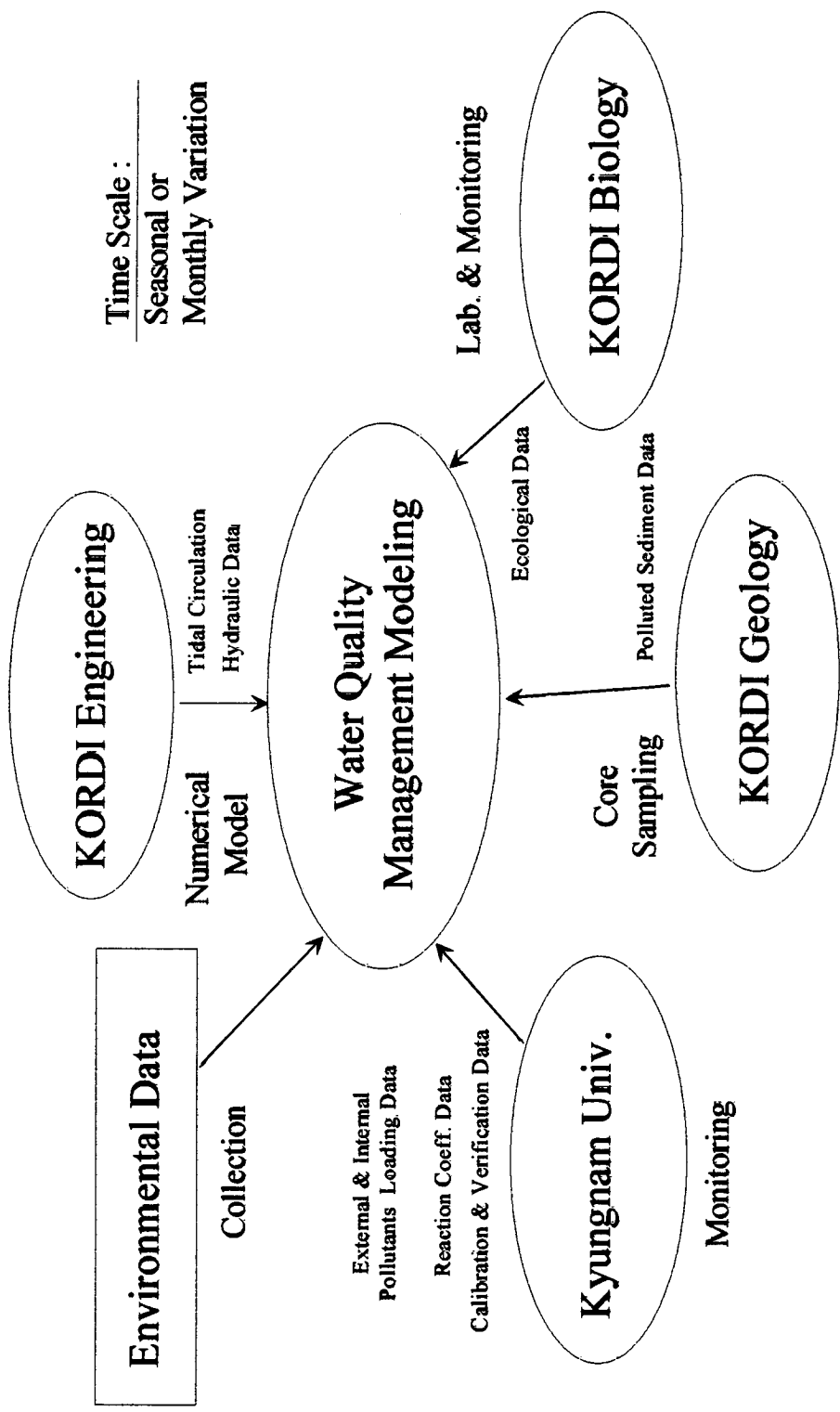


그림 1.1.1 수질관리 모델링을 위한 공동연구 수행시스템

제2장 진해만 유입 오염 부하량 및 수질모니터링

제1절 각종 육상기원 오염물질의 진해만 유입 부하량

국내에서 가장 전형적인 폐쇄성 해역인 진해만은 연안도시인 마산시와 창원시의 배수지역이다. 이중 진해만으로의 유입 부하량이 높은 4개의 하천을 중심으로 97년 8월과 9월에 조사를 하였다(그림 2.1.1). 96년 9월에서 97년 8월까지 1년간의 강우량을 살펴보면 1466.6mm로서 5월에서 8월 사이의 강우량이 전체의 강우량 중 78%를 차지했다. 조사 기간 중 4개의 하천 중에서 창원천의 유량 및 오염 부하가 높게 나타났으며(그림 2.1.2~2.1.6), 또한 각각의 오염 물질의 부하량을 살펴보면 남천의 경우에는 오염 부하가 줄어들고 있는 반면에 창원천은 여전히 높게 나타내고 있다. 이는 남천에 방류되던 공단의 방류수가 꾸준히 덕동 하수종말처리장으로 차집관로를 통해 이동하고 있기 때문으로 사료된다. 강우에 따른 유량의 변화가 공단밀집 지역인 남천에서는 심하게 나타나는 반면에 주 오염원이 생활 오수인 창원천의 경우에는 변화가 크게 나타나지 않았다. 또한 남천에서 다른 오염 물질에 비해 부유 물질의 농도가 높게 나타나는데 이는 하천 정비와 주차장 공사 등의 현장 조건에 의해 야기된 결과이다.

그리고, 진해만의 가장 큰 오염원인 마산·창원 지역을 용도별로 구분해 보면 녹지가 80.3%로 가장 많은 면적을 차지하고 있으나(표 2.1.1) 지역 특성상 공통적으로 경사가 급한 지형이기 때문에 이용이 어려우며, 인간활동에 의해 오·폐수가 발생하는 주거, 상업, 공업지역은 해안선을 따라 밀집되어 있고, 여기에서 배출되는 각종 오·폐수 등이 마산만으로 직접 투입되고 있다. 특히 우기의 Runoff시에 다량의 토사와 유기물이 하천으로 유입된다. 따라서 조사시기와 강우에 따라 그 변화가 심하다.

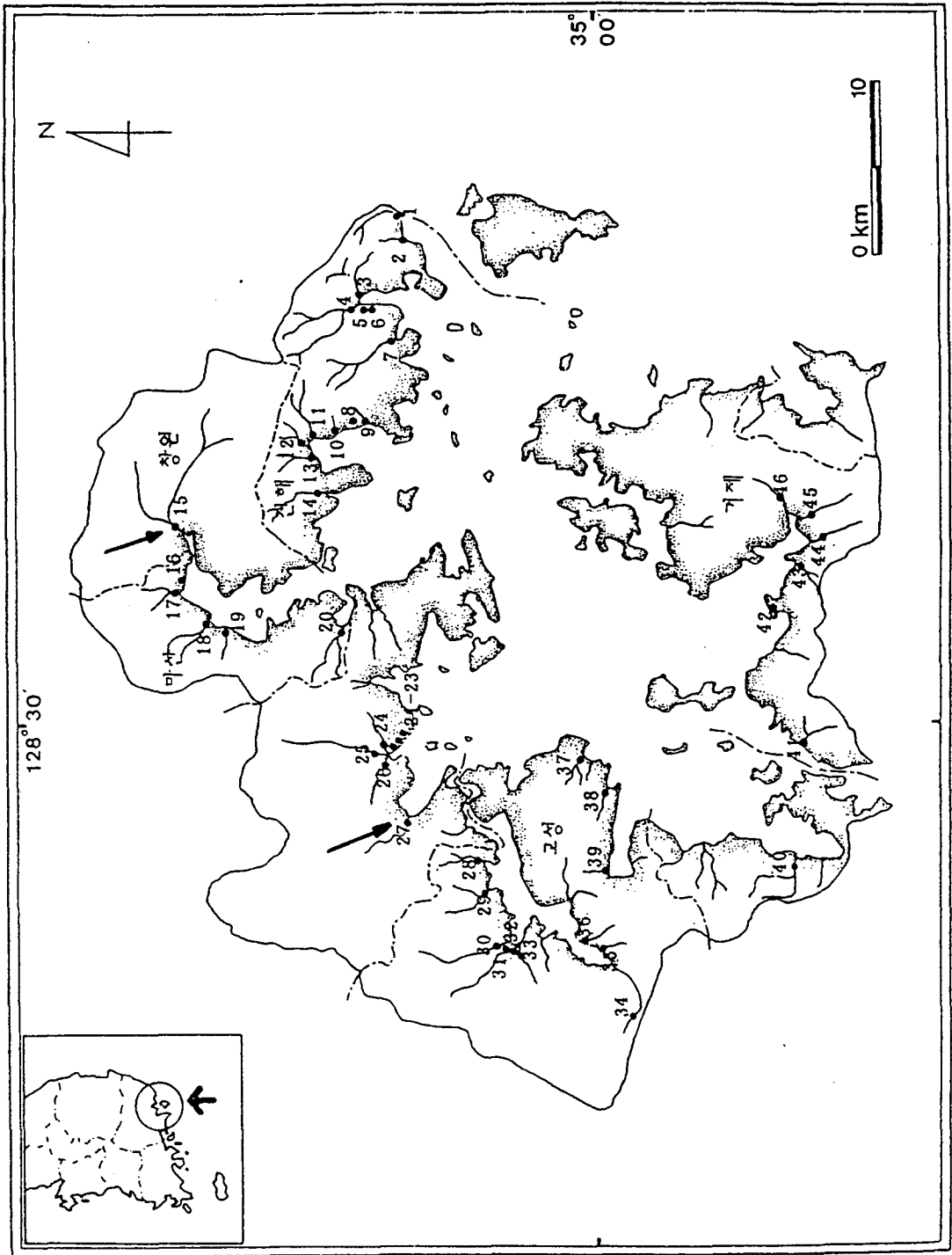


그림 2.1.1 진해만의 시료채취 지점

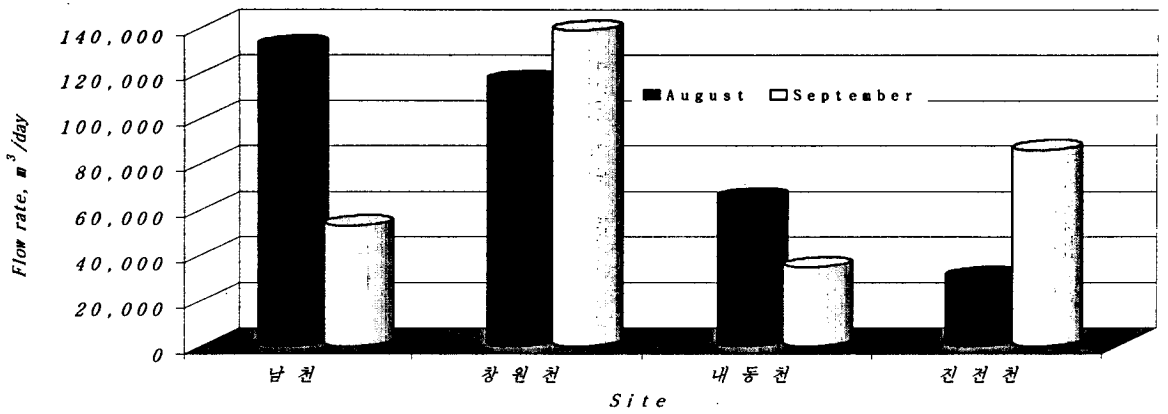


그림 2.1.2 조사 지점의 유입유량

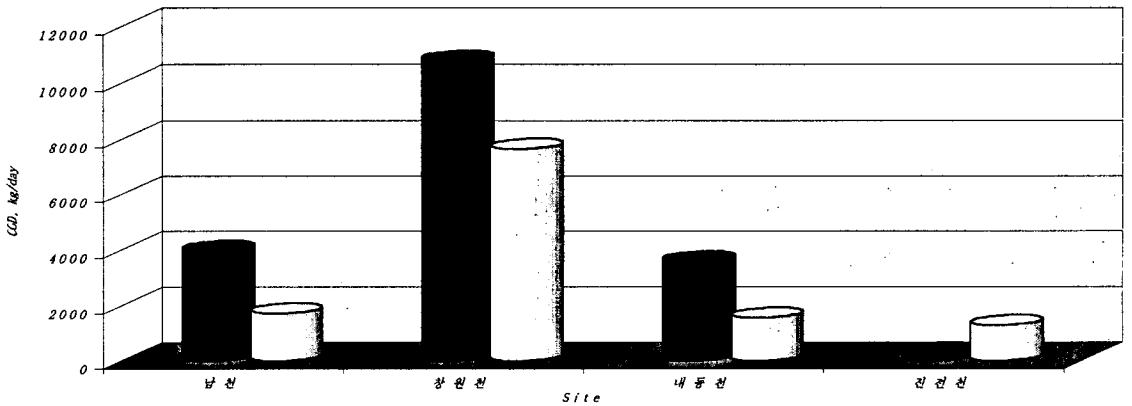


그림 2.1.3 조사 지점의 COD 부하량

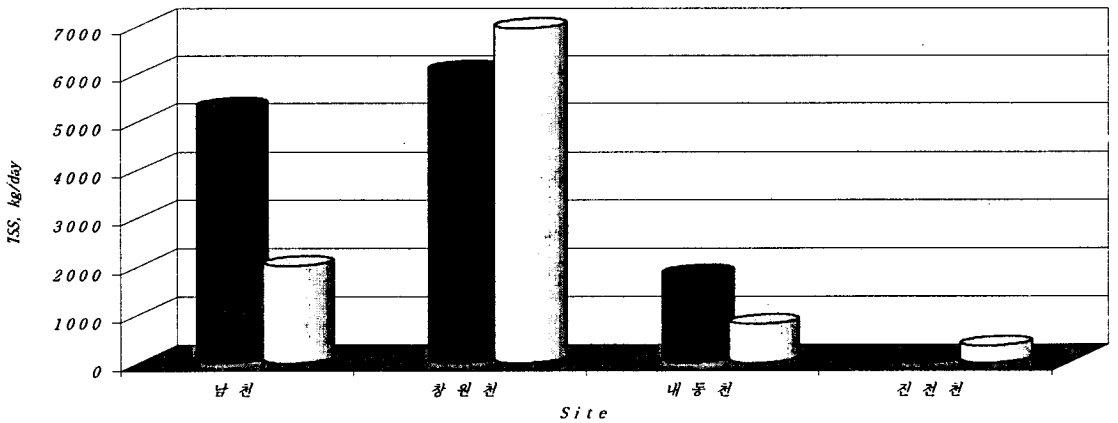


그림 2.1.4 조사 지점의 TSS 부하량



그림 2.15 조사 지점의 T-P 부하량



그림 2.16 조사 지점의 TIN 부하량

표 2.1.1 마산·창원시의 토지이용 구분

(Unit : km²(%))

구분	주거	상업	공업	녹지	미지정	계
마산	10.85	3.41	4.14	115.22	13.00	146.62
창원	15.23	2.88	19.30	180.46	3.65	221.52
계	26.08 (7.11)	6.29 (1.71)	23.44 (6.37)	295.68 (80.30)	16.65 (4.51)	368.14 (100)

(자료) 건설교통부, 부산·경남권 광역개발계획, 1995. 4

제2절 진해만의 해수 수질

마산만 해로와 진해만 해로인 A1~A9 지점과 하수종말처리장의 방류지점인 A10은 97년 2, 5, 8, 11월을 계절별로 조사하였으며, 진해만 해역인 B1~B6는 97년 5월, 8월에 조사하였다

1. 항목별

가. 수 온

조사기간 중 진해만의 수온의 경우 3월부터 상승하기 시작하여 4월이면 평균 10℃ 이상으로 상승하고, 6월부터 10월 사이에는 20℃ 이상을 유지하였다. 조사 기간 중의 진해만의 수질의 온도분포는 2월에는 평균 7℃, 8월에는 평균 20℃ 이상을 유지했다.

나. 염 분

조사 기간 중 진해만의 염분은 22.2 ~ 32‰의 범위를 나타내었다. 내만의 염분은 만 내로 유입하는 하천의 유량이나 만 입구를 통하여 유입하는

외해수의 도달 거리 및 만내 해수의 혼합 상태, 그리고 강우량에 따라 변한다. 전체적으로 외만에서 만의 안쪽으로 갈수록 낮아지는 일정한 경향을 가지고 있다.

다. 용존산소

진해만의 용존산소 분포는 여름의 하층 수질에서 최저치, 겨울에 최고치를 나타낸다. 본 조사기간중의 용존산소 농도는 8월의 경우 몇 지점의 하층과 상층에서 용존 산소가 2mg/L 이하인 빈산소 상태를 나타내었다.

라. 부유물질

부유물질의 농도는 가을부터 겨울까지 감소한 후, 봄에 다시 증가하는 경향을 가지고 있다. 실제 진해만 해역의 내만에는 우기가 시작되는 봄부터 시작하여 여름철의 장마기간에 다량의 토사 및 오염물질이 육상으로부터 유입되는 것으로 관측된다.

마. 투명도

투명도는 적조가 발생하기 시작하는 봄부터 시작하여 여름철에 악화되는데, 본 조사기간 중에도 11월에는 높게 나타났으며, 8월에 가장 낮게 나타났다. 이는 우기 강우량의 증가, 이로 인한 육상으로부터의 토사와 오염물질의 유입의 증가와 적조미생물 증식에 의한 것으로 추정된다. 또한 방류해역은 방류지점보다 내만 해역인 A₃, A₄ 지점보다도 더 낮은 수치를 나타내어 방류에 의한 영향을 잘 나타내고 있다.

바. 화학적 산소 요구량

마산만 해수 COD 농도의 계절적 변화는 COD 농도의 표준편차가 심한 계절이 여름철로서 지점별, 시기별, 층별 변화가 심하며, 수질 또한 좋지 못

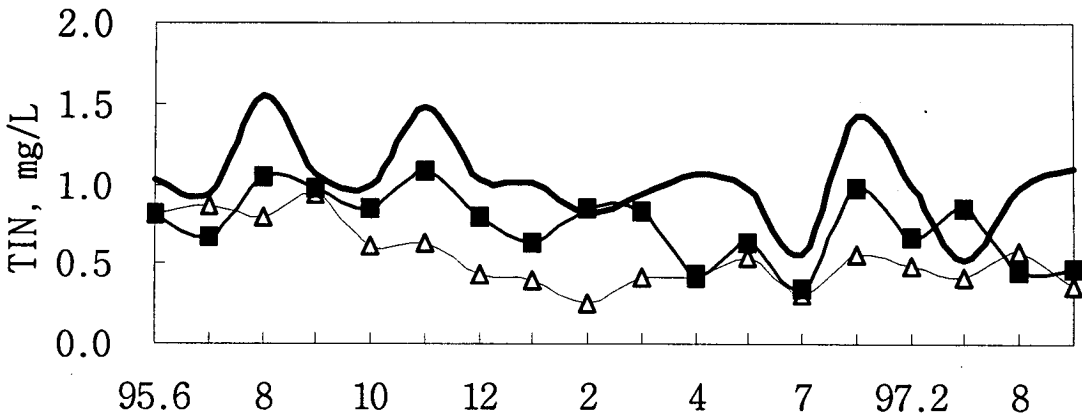
한 것으로 나타난다. 그러나 본 조사기간 중 COD의 평균값이 8월보다 5월이 높았는데, 이는 현장조사시 5월의 지점별 적조발생이 8월보다 더 많아 그 원인의 하나로 판단되며, COD 농도의 년평균 농도에도 그 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 마산만·진해만 해로의 지점별 COD의 변화는 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 일정한 경향을 가지고 있는데, 이 적조의 발생빈도 및 분포와 유관한 것으로 판단된다.

사. 영양 염류

조사기간 중 마산만의 TIN과 PO_4-P 의 농도는 외만으로 갈수록 낮아지는 일정한 경향을 갖지만, 방류지점에서의 농도가 육상의 오염의 영향을 직접 받는 해역과 비슷한 농도로 나타나 해양방류로 인한 영향을 잘 나타내고 있다. 방류해역과 인근해역과의 영양염류 농도를 95년 6월부터 본 조사기간까지의 기간을 통해 비교해보면 방류해역의 농도가 거의 동일한 인근해역이나 방류해역보다 내만쪽에 위치한 해역보다도 그 농도가 높게 나타나고 있다(그림 2.2.1, 그림 2.2.2).

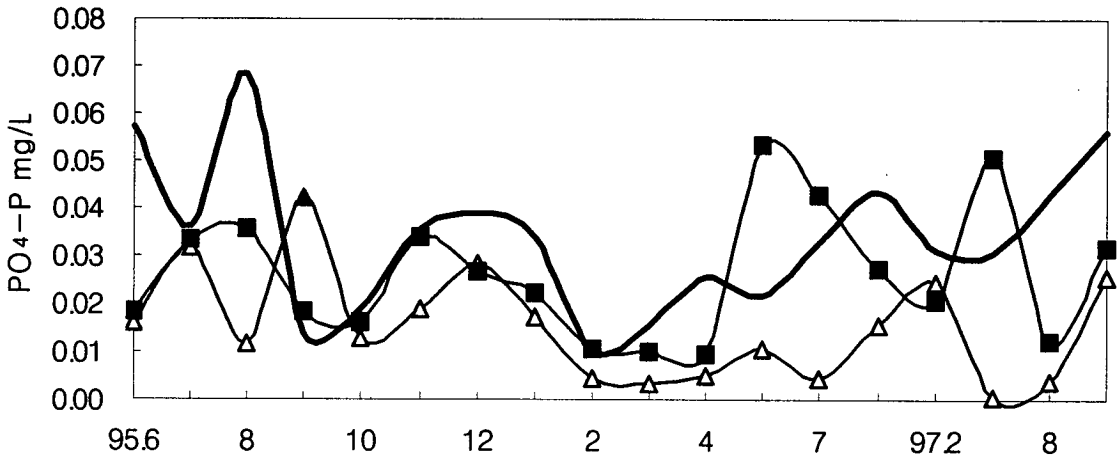
2. 지점별

조사 기간 중 각각의 오염 물질의 농도와 평균값을 그림 2.2.3, 그림 2.2.12에 나타내었다. 마산만의 해수 이동로인 A1~A9의 경우 COD, TIN, PO_4-P , TSS을 살펴보면 내만에서 외만으로 갈수록 농도가 낮아지지만, 방류해역(A10)의 영양염류 농도는 인근해역 보다 높게 나타났다. 이는 해수 수질이 육상 기원 오염 유입 부하량과 직접적인 관계가 있음을 나타내고 있다. 또한 방류 지점과 인근 해수의 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.



—△— A9 지점 — A10 지점 —■— A5 지점

그림 2.2.1 방류지점과 인근 지점과의 TIN 비교



—△— A9 지점 — A10 지점 —■— A5 지점

그림 2.2.2 방류지점과 인근지점과의 PO4-P 비교

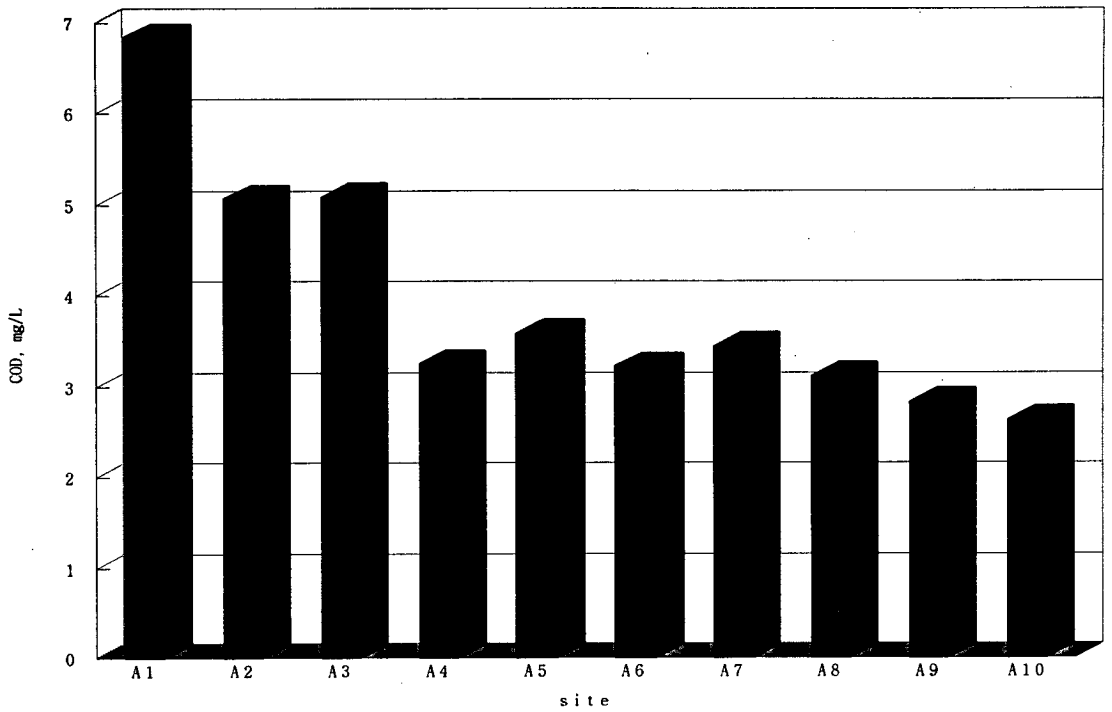


그림 2.2.3 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 COD농도

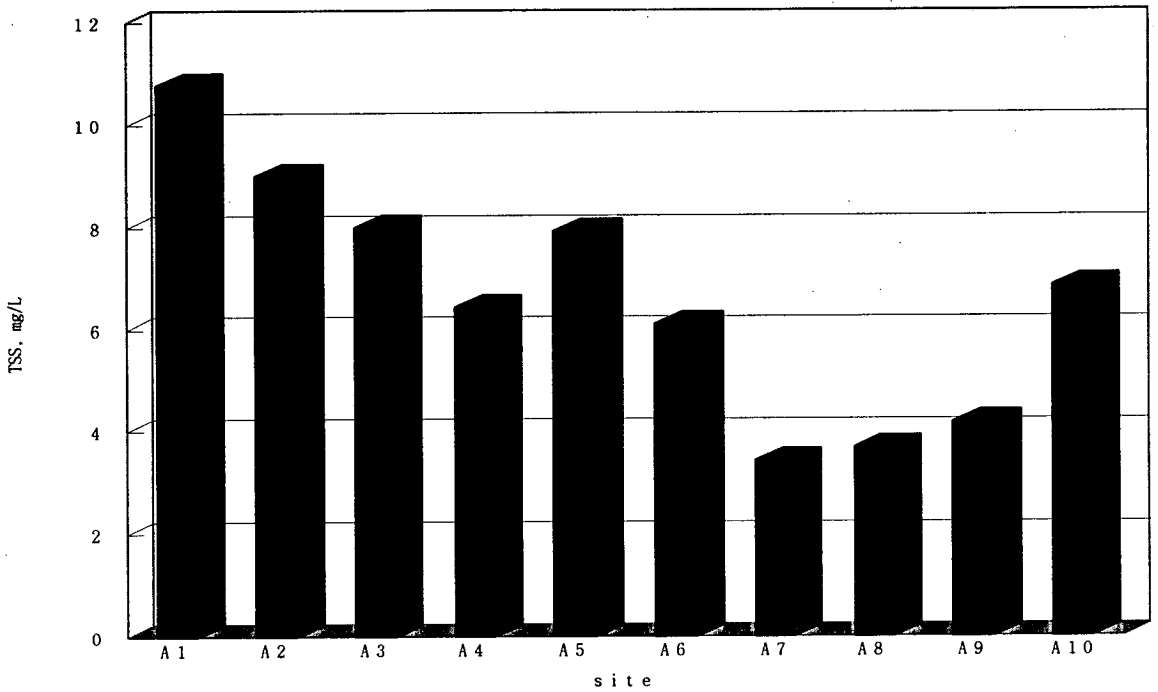


그림 2.2.4 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 TSS농도

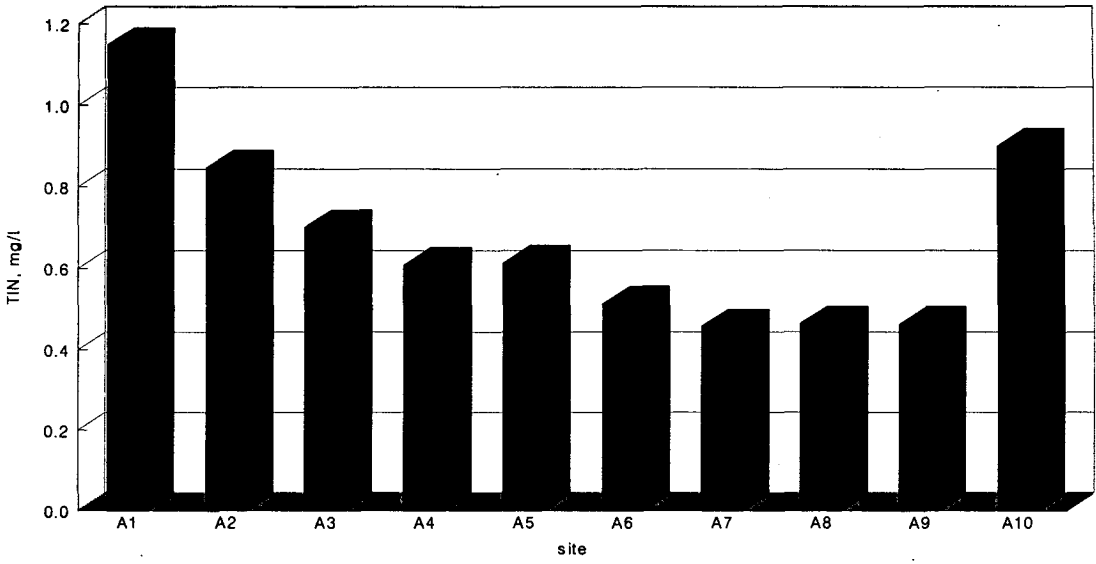


그림 2.2.5 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 TIN농도

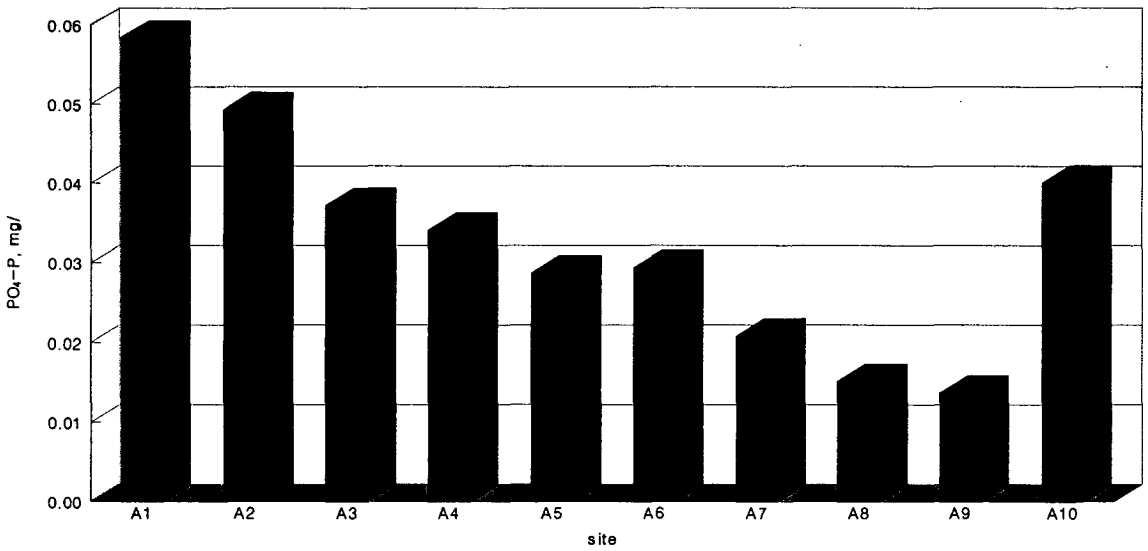


그림 2.2.6 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 PO₄-P농도

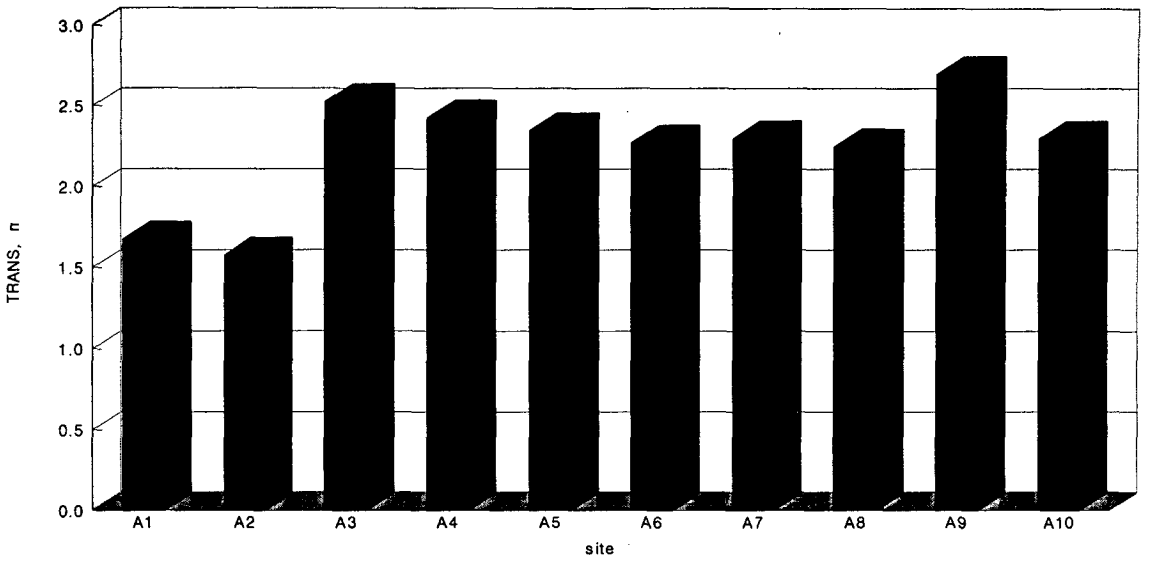


그림 2.2.7 마산만 해로에 따른 지점별(A1-A10) 연평균 Transparency 농도

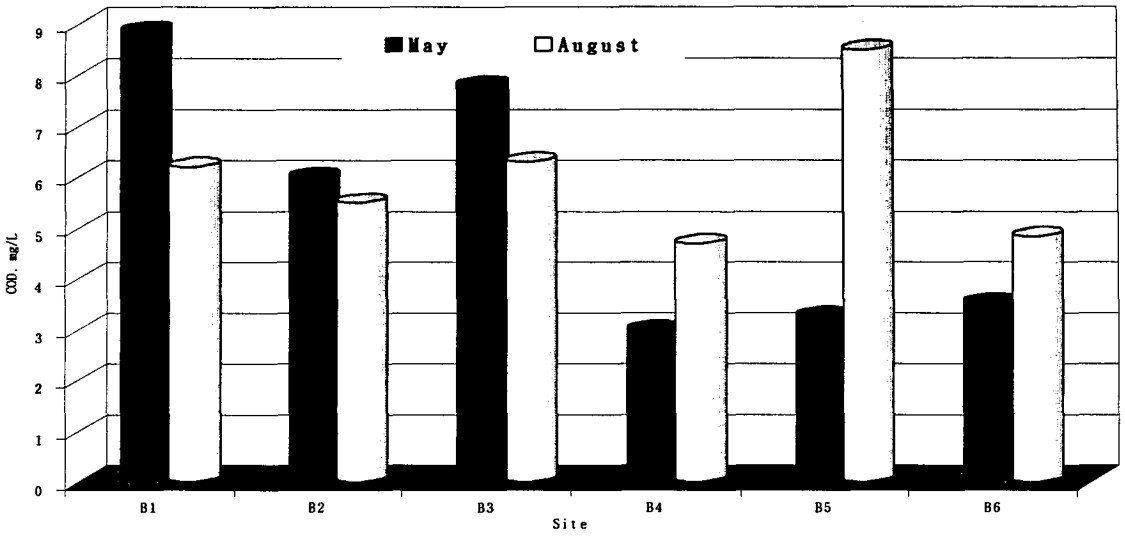


그림 2.2.8 진해만 외만의 지점별(B1-B6) COD농도

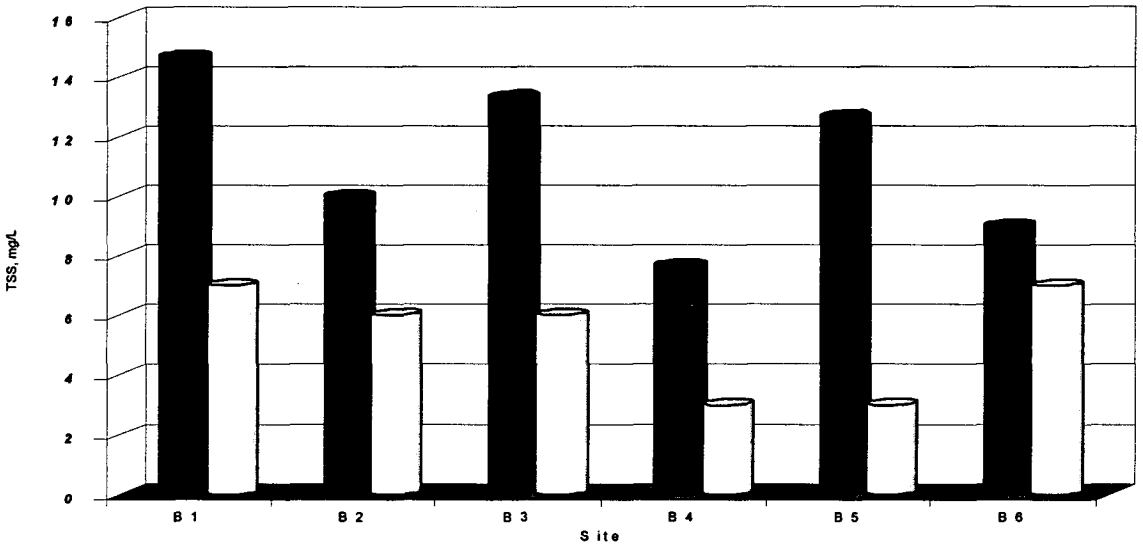


그림 2.2.9 진해만 외만의 지점별(B1-B6) TSS농도

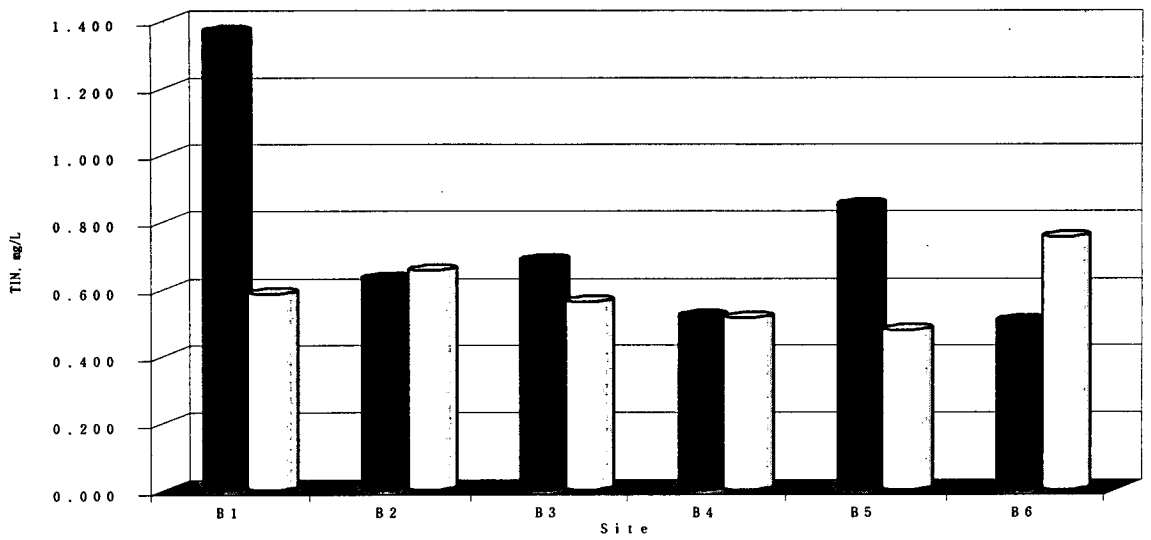


그림 2.2.10 진해만 외만의 지점별(B1-B6) TIN농도

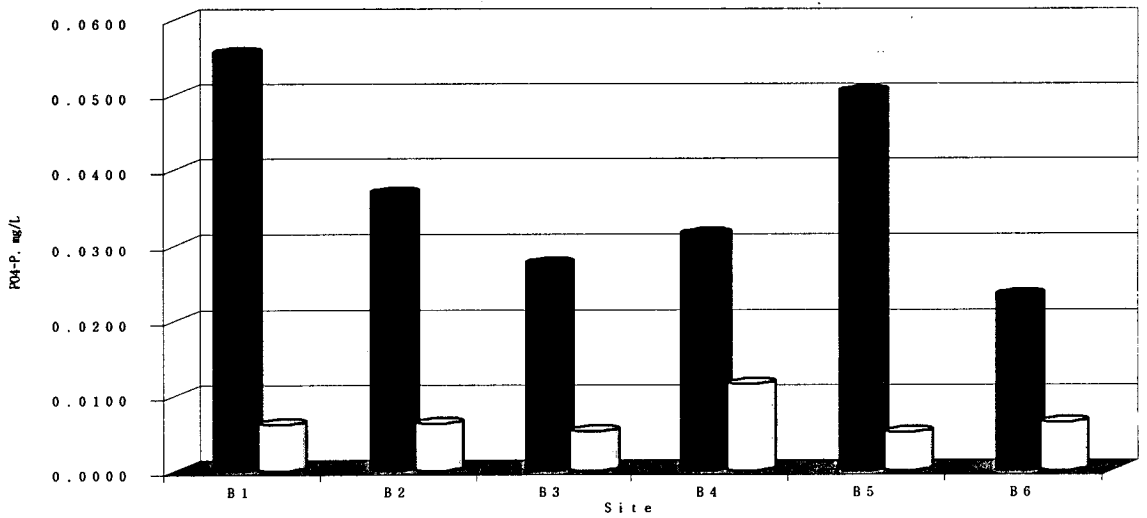


그림 2.2.11 진해만 외만의 지점별(B1-B6) PO4-P농도

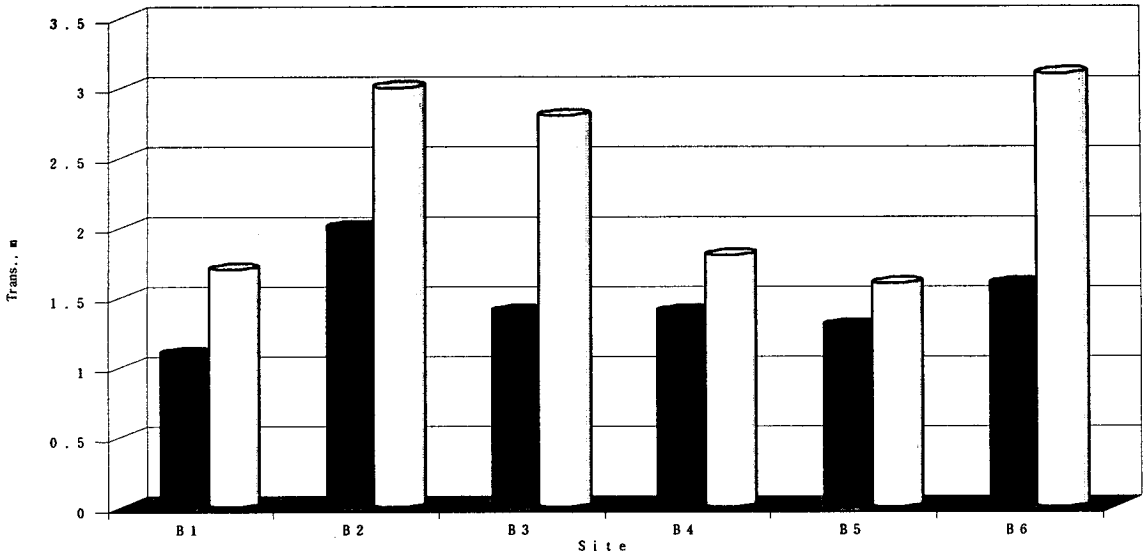


그림 2.2.12 진해만 외만의 지점별(B1-B6) Trans농도

3. 깊이별

마산만 수로의 층별에서도 외만으로 갈수록 수질이 좋은 경향을 나타내고 있으며 방류지점에 있어서는 영양 염류가 특히 하층에서 높게 측정되었다. 또한 8월에는 $PO_4\text{-P}$ 의 농도가 하층에서 높게 측정되는 경향을 보였다(그림 2.2.13~그림 2.2.16). 외만인 B1~B6에서는 별다른 경향을 발견할 수 없었다.

4. 계절별

조사 기간중 계절별 경향을 보면 A1~A10지점에서의 COD, TSS의 경향은 봄이 여름 보다 높게 측정되었으며, $PO_4\text{-P}$ 는 가을에 높게 측정되었다. Secchi disk 투명도는 여름에서 겨울로 변하면서 증가하는 경향을 보이고 다시 겨울에서 여름으로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 97년 가을의 A10지점 평균 투명도가 4.0m 이상을 나타내는 현상을 보여주었다(그림 2.2.17~그림 2.2.21). 이는 식물 플랑크톤의 증식과도 관계가 있을 것으로 생각된다. B1~B6의 계절별 경향은 부유물질 농도, 질소, 인의 농도가 1997년 5월이 8월보다 높게 나타났다(그림 2.2.17~그림 2.2.25).

5. 연도별

표 2.2.1의 마산만 해수이동 경로해역에서 8년 동안의 해수수질 변화추이에 의하면 1997년에는 COD, TSS, 질소의 년 평균 농도가 낮아졌으며, 반면에 인의 농도는 증가하였다. 그리고 Secchi disk 투명도는 2.2m로 개선되어 전반적으로 해수수질이 다소 좋아졌다.

진해만의 연도별 수질변화는 일정한 경향 없이 증감을 계속하고 있으며,

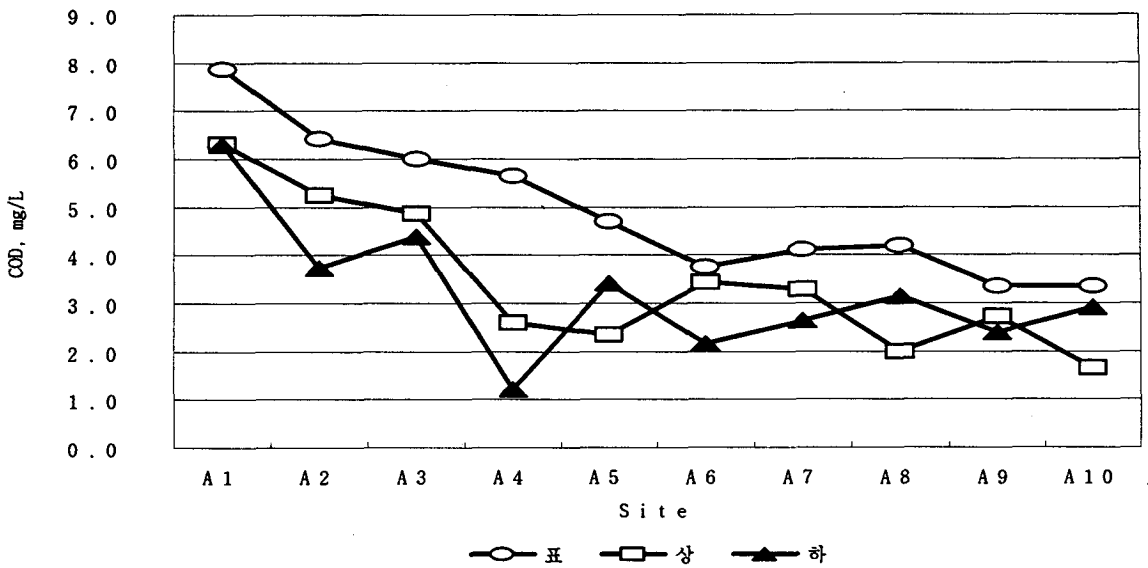


그림 2.2.13 깊이별 (A1-A10) COD농도 비교

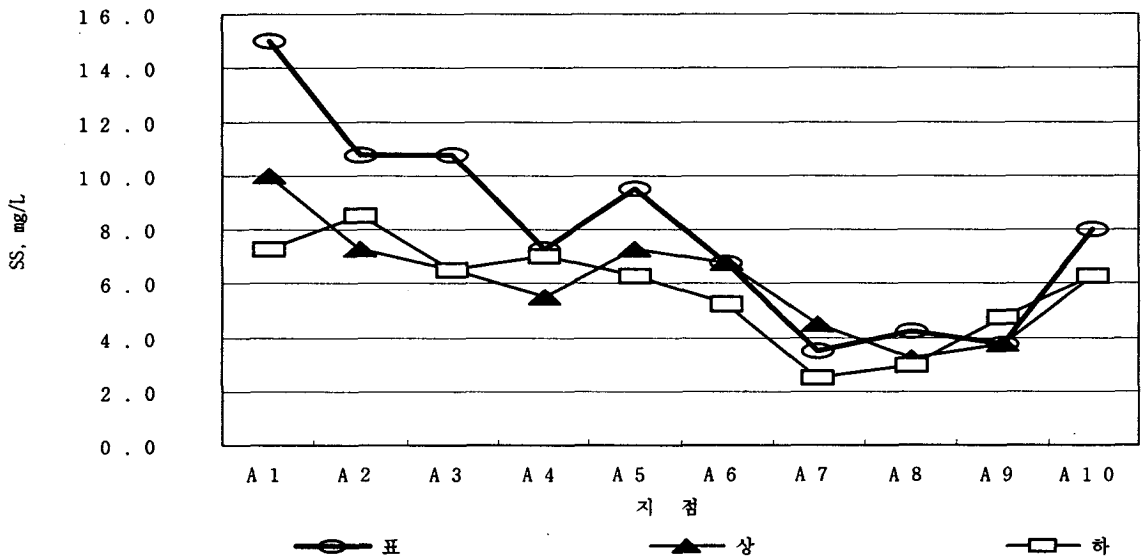


그림 2.2.14 깊이별 (A1-A10) TSS농도 비교

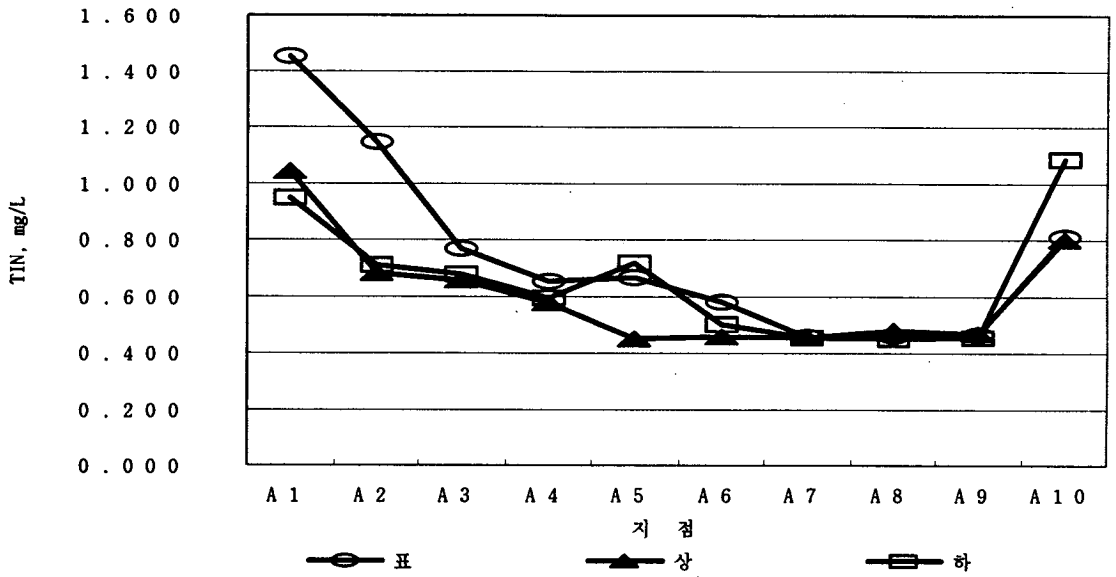


그림 2.2.15 깊이별 (A1-A10) TIN농도 비교

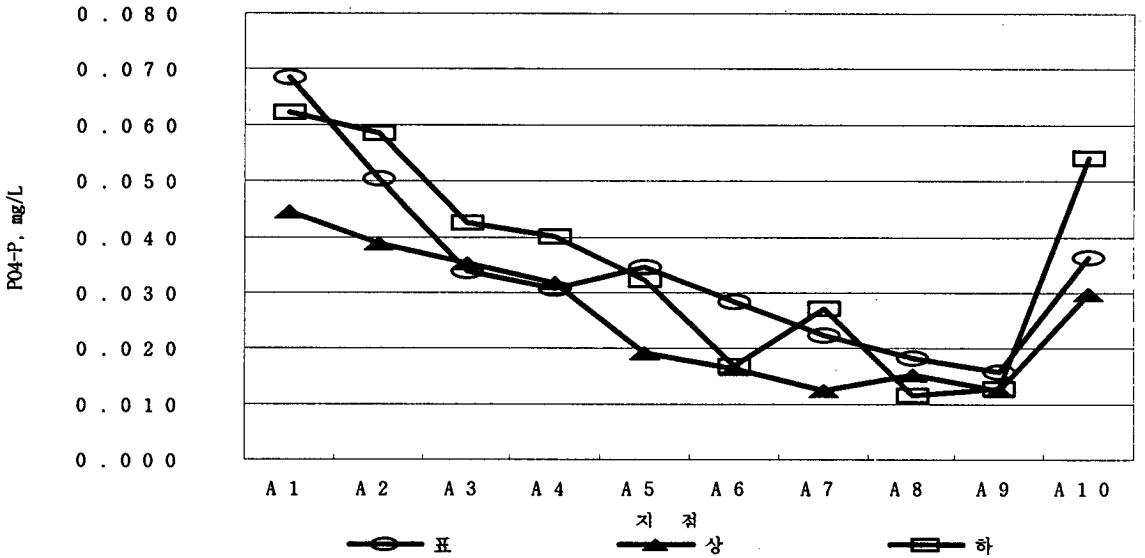


그림 2.2.16 깊이별 (A1-A10) PO4-P농도 비교

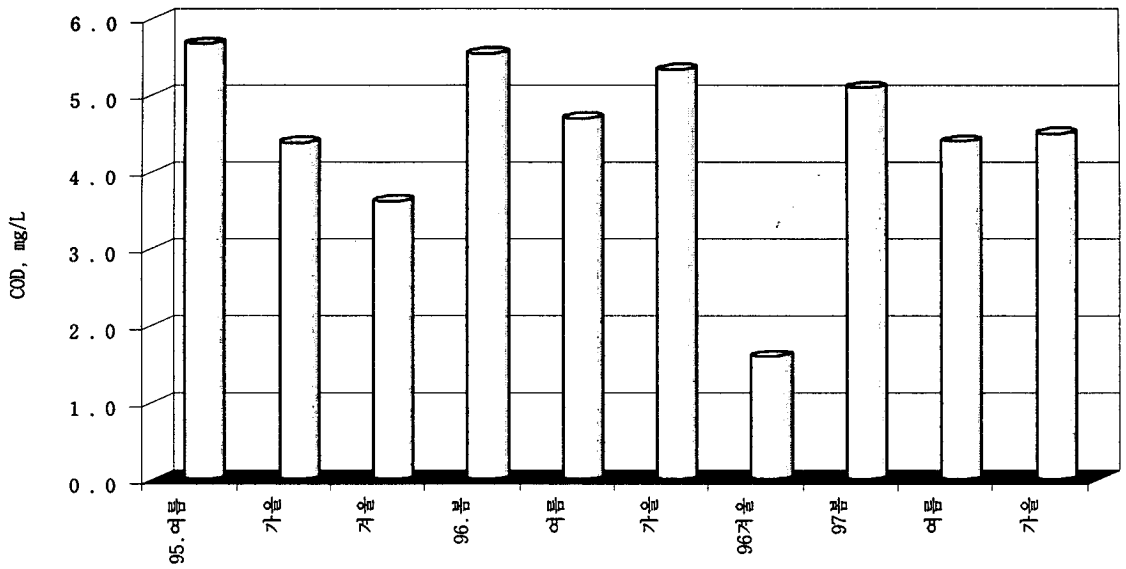


그림 2.2.17 계절별 해수(A1-A10)의 COD평균 농도

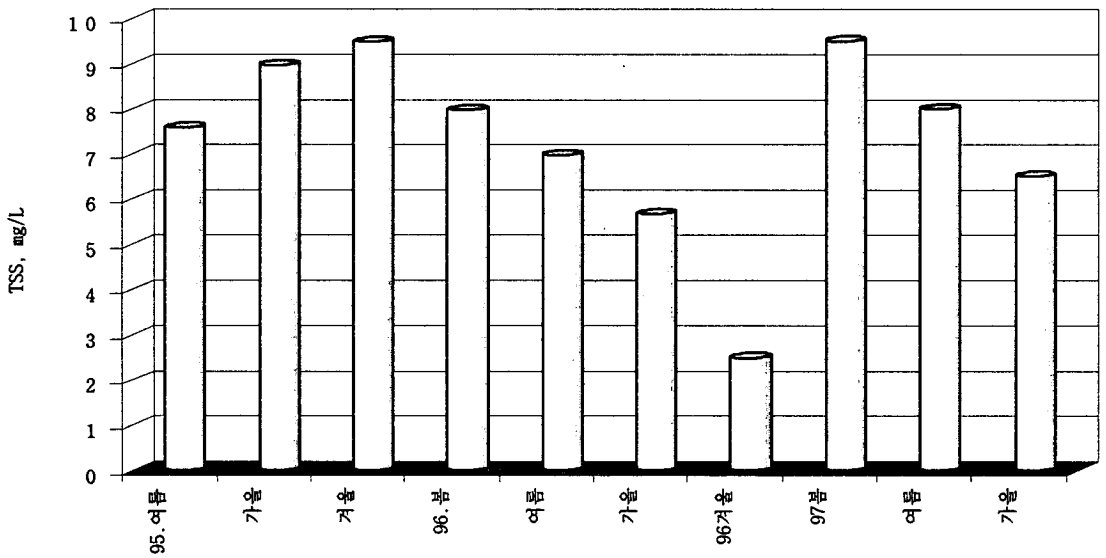


그림 2.2.18 계절별 해수(A1-A10)의 TSS평균 농도

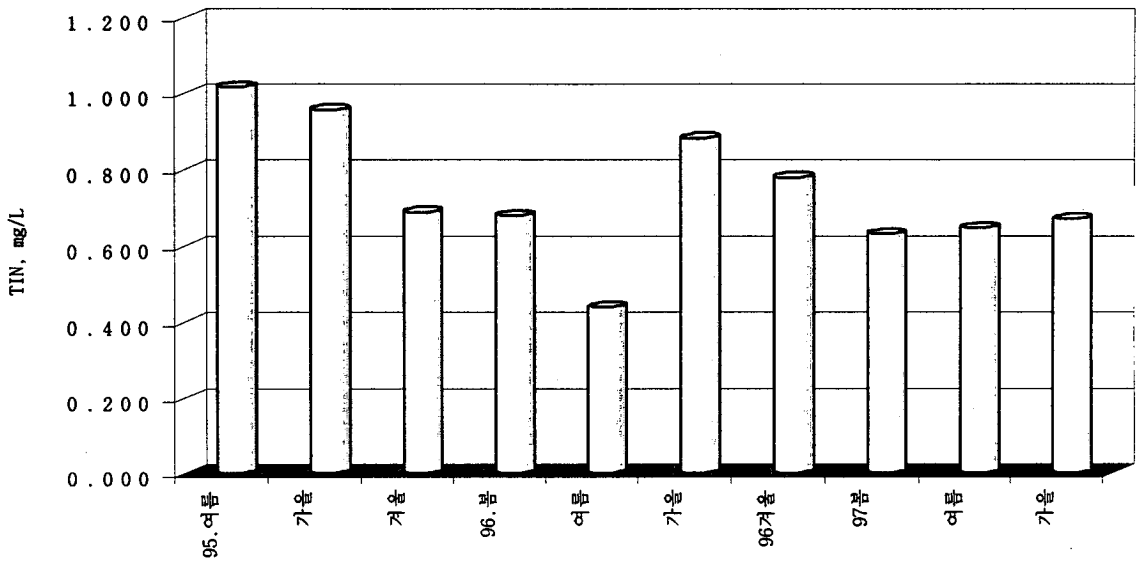


그림 2.2.19 계절별 해수(A1-A10)의 TIN평균 농도

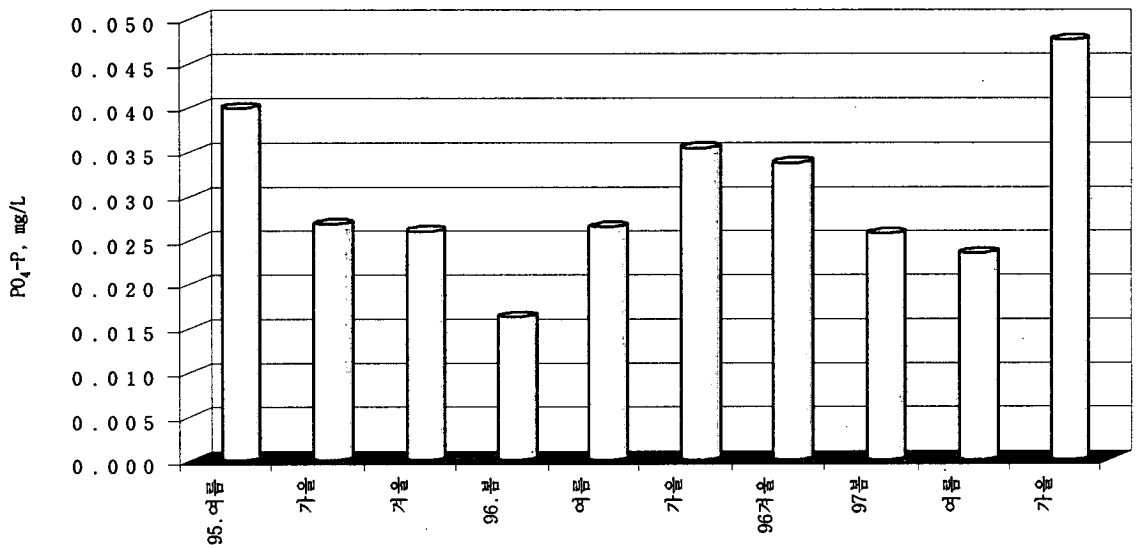


그림 2.2.20 계절별 해수(A1-A10)의 PO₄-P평균 농도

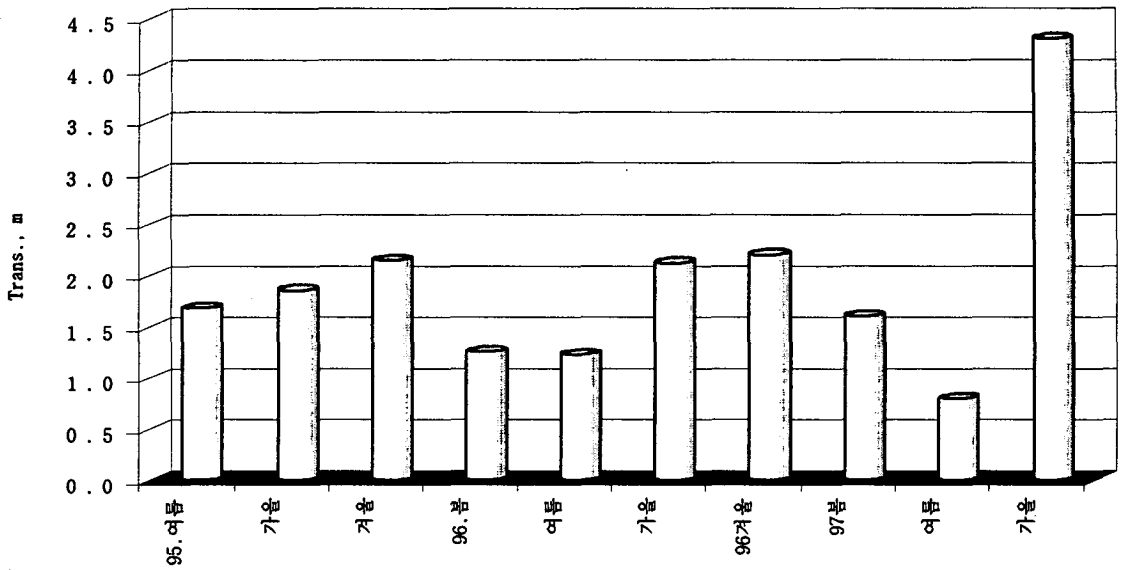


그림 2.2.21 계절별 해수(A1-A10)의 Transparency 평균 농도

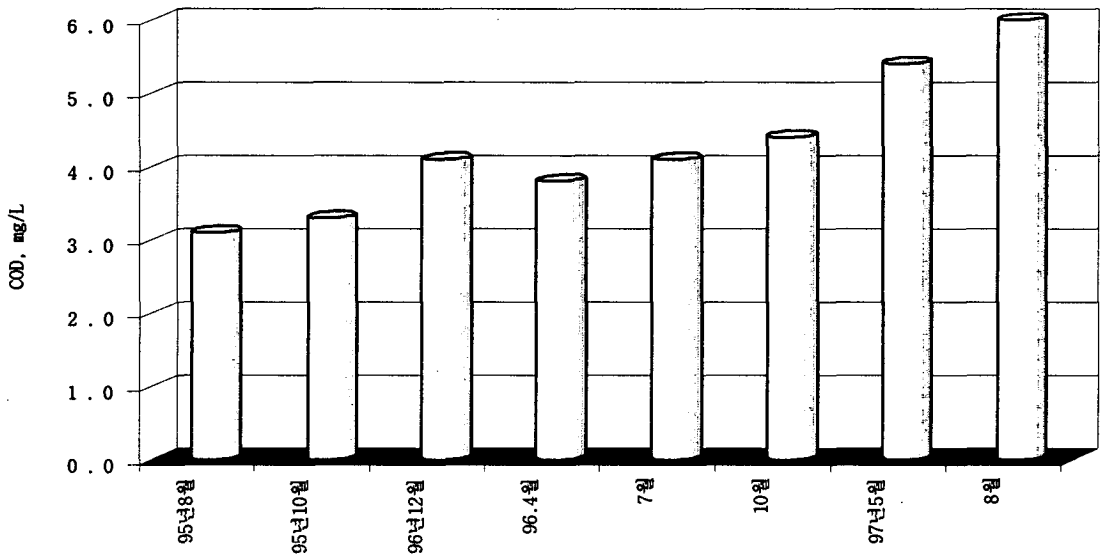


그림 2.2.22 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 COD농도

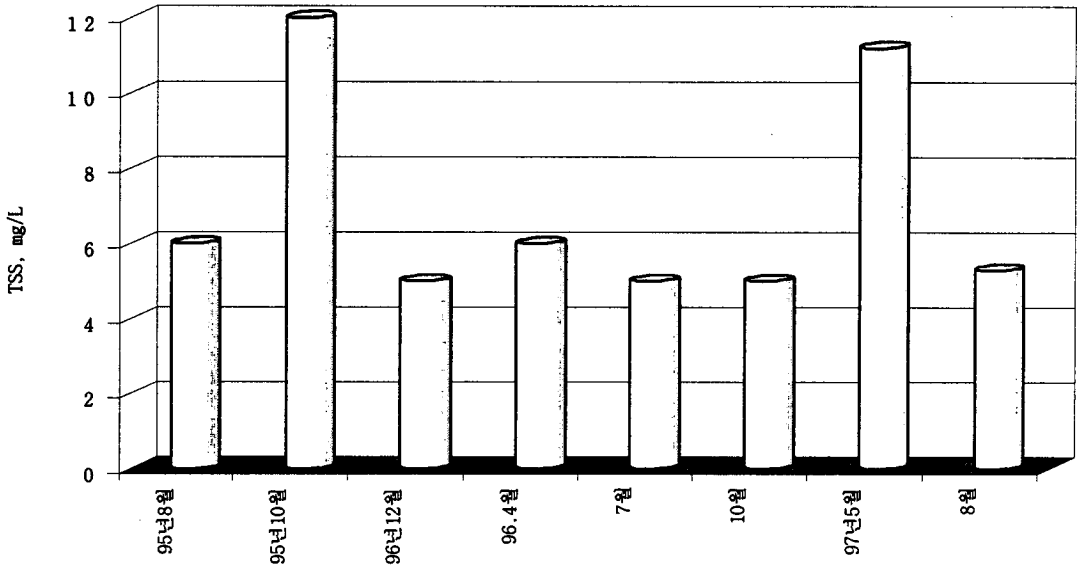


그림 2.2.23 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 TSS농도

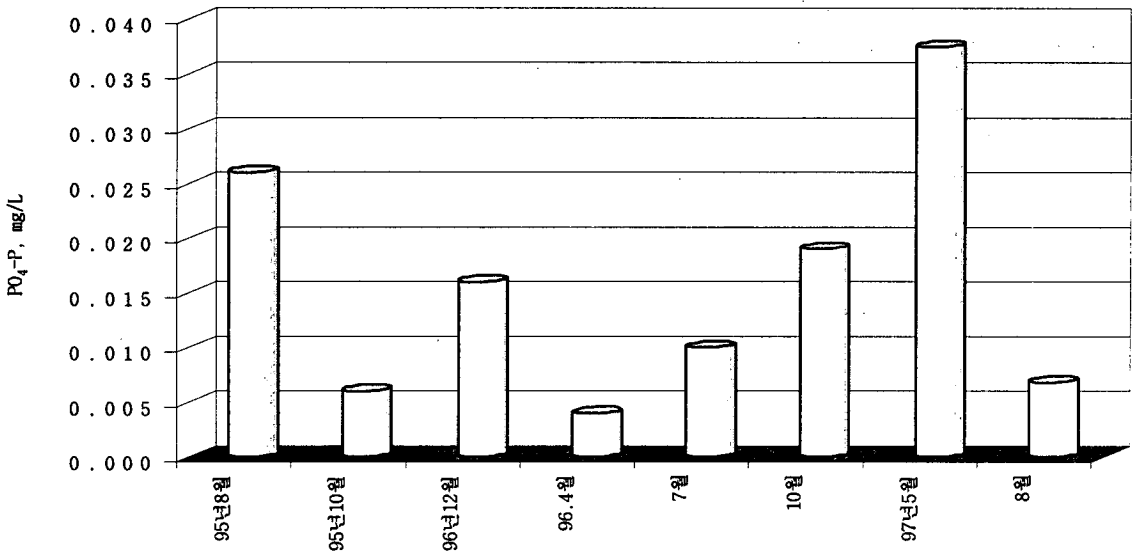


그림 2.2.24 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 PO₄-P농도

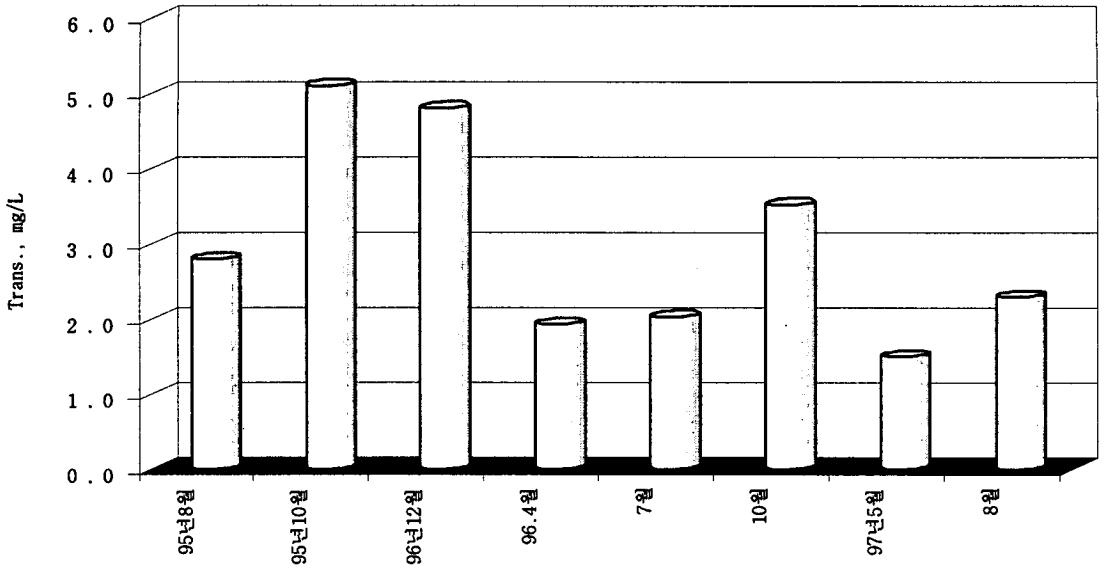


그림 2.2.25 진해만 외만지점(B1-B6) 계절별 Transparency 농도

COD의 경우 1995년 이후부터 서서히 증가하는 경향을 보여주고 있다.

표 2.2.1 마산만의 연도별 수질변화(1990~1997)

Parameter (Unit)	구 분	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
COD (mg/L)	내 만 해역	8.1	4.7	4.8	4.7	3.7	6.3	7.0	6.2
	투기인접해역	7.0	4.6	4.3	4.1	3.4	5.7	4.8	5.1
	덕 동 해역	6.7	3.2	4.4	3.7	3.5	5.9	5.6	5.1
	외 만 해역	5.7	3.5	2.7	3.2	3.4	4.3	4.0	3.4
	년 평 균	6.9	4.0	4.1	3.9	3.5	5.6	5.4	3.9
TSS (mg/L)	내 만 해역	11	9	8	8	10	12	12	10
	투기인접해역	7	7	7	6	9	11	7	9
	덕 동 해역	10	7	7	6	7	9	8	8
	외 만 해역	9	7	6	6	7	8	7	4
	년 평 균	9	8	7	7	8	10	9	7
PO ₄ -P (mg/L)	내 만 해역	0.075	0.054	0.030	0.047	0.051	0.046	0.040	0.067
	투기인접해역	0.066	0.050	0.024	0.031	0.031	0.040	0.029	0.049
	덕 동 해역	0.044	0.045	0.027	0.031	0.024	0.023	0.022	0.036
	외 만 해역	0.035	0.039	0.017	0.016	0.023	0.025	0.023	0.031
	년 평 균	0.055	0.047	0.025	0.031	0.032	0.034	0.029	0.047
TIN (mg/L)	내 만 해역	1.274	1.468	1.266	1.389	1.285	1.407	1.927	0.906
	투기인접해역	1.059	1.413	0.881	1.123	1.077	1.146	0.796	0.846
	덕 동 해역	0.843	0.942	0.817	1.074	0.743	0.900	0.575	0.699
	외 만 해역	0.692	0.826	0.641	0.817	0.715	0.824	0.658	0.609
	년 평 균	0.967	1.162	0.901	1.001	0.955	1.069	0.805	0.670
Trans- parency (m)	내 만 해역	1.0	1.2	1.1	1.4	1.2	0.9	1.0	1.8
	투기인접해역	1.3	1.8	1.3	1.8	1.5	1.3	1.2	1.6
	덕 동 해역	1.9	2.1	1.9	2.1	2.1	1.6	1.7	2.5
	외 만 해역	2.2	2.7	2.3	3.1	3.3	2.3	1.6	2.4
	년 평 균	1.6	2.0	1.7	2.1	2.1	1.5	1.4	2.2

제3절 진해·마산만의 식물플랑크톤

1. 조사 방법

시료의 채수는 각 정점에서 표층수(수 표면하 50cm)와 상층수(수 표면하 3-5m), 하층수(수표면하 5-10m)를 van Dorn 채수기를 사용하여 각각 1ℓ씩 채수하였으며, 선상에서 formalin원액(40%)으로 최종 농도 0.4%가 되

도록 고정하였다. 고정된 시료를 실험실로 운반하여 침전법에 의하여 각각 상등액을 제거하고 150-200ml로 농축하여 분석용 시료로 하였다. 정량분석용 시료를 균일하게 섞은 후 pipette으로 1ml를 취하여 Sedgewick-Rafter Chamber와 Palmer counting cell에 넣어 현미경하에서 세포수를 계수한 후, 이를 단위체적당 세포수(cell ml^{-1})로 환산하여 현존량을 표시하였다. 종의 동정은 농축된 시료를 일정량 취하여 광학현미경x400-1000배로 관찰하여 동정하였다.

2. 결과 및 고찰

가. 식물플랑크톤의 종조성

1997년 2월 부터 8월까지 3회에 걸쳐 조사한 식물플랑크톤은 4문 5강 10목 19과 43속에 포함되는 87종 1변종으로 총 88종류로 정리되었다(표 2.3.1). 출현 종의 각 문별 구성 비율을 보면 규조류는 72%를 차지하였으며, 쌍편모조류는 22 %를 차지하였고, 규질편모조류(Silicoflagellate)는 2%, 유글레나류(*Eutreptiella* 속)는 1%를 차지하여 규조류가 가장 높은 점유율을 나타내었다.

조사기간 동안 전 정점에서 빈번히 출현한 종류는 *Skeletonema costatum*, *Nitzschia pungens*, *Prorocentrum micans*, *Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum triestinum*, *Protoperidium pellucidum*, *Ceratium furca*, *Ceratium fusus*, *Eutreptiella gymnastica*, *Chatonella antiqua* 등으로 주로 적조 원인종이었다. 본 조사 결과 출현한 종 수를 보면 동계인 2월에 가장 적게 출현하였으며 춘계인 5월에 가장 다양하게 출현하였고 쌍편모조류는 주로 동계와 춘계에 빈번히 출현하였다.

표 2.3.1 조사기간 중 출현 식물플랑크톤의 분류군.

Species	Month	F	M	A
Phylum Chrysophyta				
Class Bacillariophyceae				
Order Centrales				
Family Thalassiosiraceae				
<i>Cyclotella meneghiniana</i>			+	
<i>Thalassiosira aestivalis</i>				+
<i>Thalassiosira auguste-lineata</i>			+	
<i>Thalassiosira decipiens</i>		+		
<i>Thalassiosira eccentrica</i>		+		
<i>Thalassiosira grvida</i>			+	
<i>Thalassiosira nordenskioldii</i>				+
<i>Thalassiosira pseudonana</i>				+
<i>Thalassiosira rotula</i>		+		
<i>Thalassiosira substilis</i>			+	
<i>Skeletonema costatum</i>		+	+	+
Family Melosiraceae				
<i>Stephanopyxis turris</i>				+
<i>Stephanopyxis palmeriana</i>				+
<i>Melosira nummuloides</i>				+
<i>Leptocylindrus danicus</i>				+
<i>Detonula pumila</i>			+	
<i>Guenardia flaccida</i>		+		
<i>Lauderia borealis</i>			+	
Family Coscinodisceae				
<i>Coscinodiscus concinnus</i>			+	+
<i>Coscinodiscus eccentricus</i>		+	+	
<i>Coscinodiscus granii</i>		+		+
<i>Coscinodiscus radiatus</i>			+	
<i>Actinoptychus senarius</i>		+		
Family Rhizosoleniaceae				
<i>Rhizosolenia alata</i>		+	+	+
<i>Rhizosolenia calcar-avis</i>		+		
<i>Rhizosolenia delicatula</i>		+	+	+
<i>Rhizosolenia fragilissima</i>		+		+

나. 식물플랑크톤의 현존량

1997년 2월 부터 8월까지 3회에 걸쳐 조사한 식물플랑크톤의 현존량의 분포는 표층에서 1,000-25,288,000 cell/L, 상층에서 1,000-10,570,000 cell/L, 저층에서 1,000-4,840,000 cells/L로 나타났으며 층별로 보면 동계에는 표층에 비하여 상층과 저층에 더 크게 나타나나 춘계와 하계에는 표층의 현존량이 가장 크게 나타났다. 월별로 보면 동계인 2월에 비하여 춘계와 하계에 현존량이 크게 증가하였다(표 2.3.2, 2.3.3).

식물플랑크톤의 대발생의 양상은 5월에 정점 1부터 정점 11까지 8월에 정점 1, 2, 7에서 보였으나 A7, A8, A9 와 B1-B6까지의 정점에서는 대발생이 나타나지 않았다. 특히 95년 7, 8, 11월과 96년 4월과 5월에는 전 정점의 표층에서 대발생을 보였으며 96년 1월과 2월 정점1과 2에서 표층과 상층, 저층 모두에서 대발생이 일어난 결과와 비교하여 볼 때 본 조사에서는 대발생이 전 정점에 걸쳐서 나타나지 않았으며 현존량 또한 매우 감소한 점이 특이하였다. 정점 A7, A8, A9에서는 96년 4월에 대발생을 하였으나 본 조사 기간 동안 대발생이 나타나지 않았다.

계절별, 정점별 식물플랑크톤의 현존량의 변이는 동계인 2월에는 표층에서 1,000 - 25,000 cells/L, 상층에서 1,000 - 17,000 cells/L, 저층에서 1,000 - 22,000 cells/L로 정점 1,2와 정점 7, 8, 9수역에서 현존량이 높게 나타났으며 정점 A7, A8, A9지점에서는 타정점에 비하여 현존량이 표층, 상층, 하층 모든 수층에서 현저하게 적게 나타났다.

정점 B1-B6에서는 춘계인 5월 식물플랑크톤의 현존량이 표층 146,000 - 25,288,000 cells/L, 상층에서 7,000 - 10,570 cells/L 저층에서 55,000 - 4,840,000 cells/L로 나타났다. 정점 1부터 11수역까지 현존량은 고른 분포를 보였으나 정점 A7, A8, A9지점에서는 8배이상 현존량이 적게 출현하였다. 정점별, 수층별 현존량을 비교하여 보면 뚜렷한 경향성을 찾을 수 없었으며 정점별, 수층별 현존량이 혼조된 양상을 나타냈다(표 2.3.3).

표 2.3.1 조사기간 중 출현 식물플랑크톤의 분류군(계속)

Species	Month		
	F	M	A
Family Chaetoceraceae			
<i>Chaetoceros affinis</i>	+		+
<i>Chaetoceros atlanticus</i>	+		
<i>Chaetoceros convolutus</i>		+	
<i>Chaetoceros costatus</i>		+	+
<i>Chaetoceros curvisetus</i>		+	
<i>Chaetoceros debilis</i>	+		+
<i>Chaetoceros decipiens</i>			+
<i>Chaetoceros didymus</i>	+		+
<i>Chaetoceros danicus</i>		+	
<i>Chaetoceros pendulus</i>	+		+
<i>Chaetoceros socialis</i>		+	
<i>Ditylum brightwellii</i>	+		
<i>Lithodesmium variabile</i>		+	
<i>Streptotheca thamensis</i>			
Family Biddulphiaceae			
<i>Striatella unipunctata</i>		+	+
<i>Hemiaulus membranaceus</i>			+
<i>Hemiaulus sinensis</i>	+	+	
<i>Biddulphia sinensis</i>			
Order Pennales			
Family Diatomaceae			
<i>Thalassionema nitzschioides</i>		+	+
<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>			+
<i>Asterionella japonica</i>			
Family Naviculaceae			
<i>Gyrosigma nipkowii</i>		+	
<i>Gyrosigma spencerii</i>			+
<i>Pleurosigma elongatum</i>		+	
<i>Pleurosigma normanii</i>			
Family Nitzschiaceae			
<i>Cylindrotheca closterium</i>			+
<i>Nitzschia delicatissima</i>	+	+	+
<i>Nitzschia pungens</i>			
Phylum Chrysophyta			
Class Chrysophyceae			
Order Silicoflagellatae			
Family Dictyocaceae			
<i>Dictyoca fibula</i>	+	+	+
<i>Ebria tripartita</i>	+	+	+

표 2.3.1 조사기간 중 출현 식물플랑크톤의 분류군.

Species	Month	F	M	A
Phylum Dinophyta				
Class Raphidophyceae				
Order Raphidomonadales				
Family Vacuolariaceae				
<i>Chattonella antiqua</i>		+	+	+
Class Dinophyceae				
Order Prorocentrales				
Family Prorocentraceae				
<i>Prorocentrum balticum</i>			+	+
<i>Prorocentrum dentatum</i>			+	
<i>Prorocentrum micans</i>		+	+	+
<i>Prorocentrum minimum</i>		+	+	+
<i>Prorocentrum triestinum</i>		+	+	+
Order Dinophysiales				
Family Dinophsiaceae				
<i>Dinophysis acuminata</i>		+	+	
<i>Dinophysis rotundata</i>		+	+	
Family Oxyphysiaceae				
<i>Oxyphysis oxytoxoides</i>		+	+	+
Order Gymnodiniales				
Family Gymnodiniaceae				
<i>Gymnodinium sanguineum</i>			+	
Order Noctilucales				
Family Noctilucaeae				
<i>Noctiluca scintillans</i>		+	+	+
Order Peridiniales				
Family Peridiniaceae				
<i>Protoperidinium claudicans</i>		+		
<i>Protoperidinium divergens</i>			+	
<i>Protoperidinium pellucidum</i>		+	+	+
<i>Protoperidinium pentagonum</i>				+
<i>Heterocapsa triquetra</i>		+		
Family Ceratiaceae				
<i>Ceratium furca</i>		+	+	+
<i>Ceratium fusus</i>		+	+	+
Phylum Euglenophyta				
Class Euglenophyceae				
Order Eutreptiales				
Family Eutreptiaceae				
<i>Eutreptiella gymnastica</i>		+	+	+

표 2.3.2 조사기간중 진해만의 지점별(A1~A10) 식물플랑크톤의 현존량.

Month	Station	Dorminant sp. (cells l ⁻¹)	Month	Station	Dominant sp. (cells l ⁻¹)
1997 Feb.	st. 1	<i>Protoperidium pellucidum</i> (2,000)	1997 May	st. 1	<i>Eutreptiella gymnastica</i> (25,288,000)
	st. 2	<i>Protoperidium pellucidum</i> (1,000)		st. 2	<i>Eutreptiella gymnastica</i> (3,494,000)
	st. 3	<i>Ceratium fusus</i> (1,000)		st. 3	<i>Eutreptiella gymnastica</i> (783,000)
	st. 5	<i>Protoperidium pellucidum</i> (25,000)		st. 5	<i>Eutreptiella gymnastica</i> (181,000)
	st. 6	<i>Protoperidium pellucidum</i> (1,000)		st. 6	<i>Nitzschia pungens</i> (46,000)
	st. 7	<i>Ceratium fusus</i> (6,000)		st. 7	<i>Prorocentrum triestinum</i> (564,000)
	st. 8	<i>Protoperidium pellucidum</i> (2,000)		st. 8	<i>Ceratium fusus</i> (76,000)
	st. 9	<i>Protoperidium pellucidum</i> (5,000)		st. 9	<i>Nitzschia pungens</i> (445,000)
	st. 10	<i>Ceratium fusus</i> (2,000)		st. 10	<i>Nitzschia pungens</i> (654,000)
	st. 11	<i>Ceratium fusus</i> (2,000)		st. 11	<i>Ceratium fusus</i> (738,000)
	st. A7	<i>Ceratium fusus</i> (2,000)		st. A7	<i>Ceratium fusus</i> (82,000)
	st. A8	<i>Ceratium fusus</i> (1,000)		st. A8	<i>Ceratium fusus</i> (218,000)
st. A9	<i>Ceratium fusus</i> (1,000)	st. A9	<i>Ceratium fusus</i> (135,000)		
1997 Aug.	st. 1	<i>Skeletonema costatum</i> (18,565,000)			
	st. 2	<i>Skeletonema costatum</i> (654,000)			
	st. 3	<i>Skeletonema costatum</i> (24,000)			
	st. 5	<i>Skeletonema costatum</i> (714,000)			
	st. 6	<i>Skeletonema costatum</i> (238,000)			
	st. 7	<i>Skeletonema costatum</i> (53,000)			
	st. 8	<i>Prorocentrum triestium</i> (82,000)			
	st. 9	<i>Ebria tripartita</i> (108,000)			
	st. 10	<i>Prorocentrum minimum</i> (158,000)			
	st. 11	<i>Prorocentrum minimum</i> (119,000)			
	st. A7	<i>Nitzschia pungens</i> (150,000)			
st. A8	<i>Nitzschia pungens</i> (54,000)				
st. A9	<i>Skeletonema costatum</i> (37,000)				

표 2.3.2 조사기간중 진해만의 지점별(B1~B6) 식물플랑크톤의 현존량.

Month	Station	Dorminant sp. (cells /L)
1997 May 10	st. B1	<i>Ceratium fusus</i> (180,000)
	st. B2	<i>Ceratium fusus</i> (1,000)
	st. B3	<i>Ceratium fusus</i> (18,000)
	st. B4	<i>Ceratium furca</i> (45,000)
	st. B5	<i>Ceratium fusus</i> (4,000)
	st. B6	<i>Ceratium fusus</i> (34,000)
1997 Aug. 18	st. B1	<i>Nitzschia pungens</i> (49,000)
	st. B2	<i>Nitzschia pungens</i> (97,000)
	st. B3	<i>Nitzschia pungens</i> (130,000)
	st. B4	<i>Nitzschia pungens</i> (79,000)
	st. B5	<i>Nitzschia pungens</i> (51,000)
	st. B6	<i>Nitzschia pungens</i> (81,000)

표 2.3.3 조사기간중 진해만의 지점별(B1~B6) 식물플랑크톤의 현존량.

Month	Station	Dorminant sp. (cells /L)
1997 May 10	st. B1	<i>Ceratium fusus</i> (180,000)
	st. B2	<i>Ceratium fusus</i> (1,000)
	st. B3	<i>Ceratium fusus</i> (18,000)
	st. B4	<i>Ceratium furca</i> (45,000)
	st. B5	<i>Ceratium fusus</i> (4,000)
	st. B6	<i>Ceratium fusus</i> (34,000)
1997 Aug. 18	st. B1	<i>Nitzschia pungens</i> (49,000)
	st. B2	<i>Nitzschia pungens</i> (97,000)
	st. B3	<i>Nitzschia pungens</i> (130,000)
	st. B4	<i>Nitzschia pungens</i> (79,000)
	st. B5	<i>Nitzschia pungens</i> (51,000)
	st. B6	<i>Nitzschia pungens</i> (81,000)

다. 우점종의 현존량

본 조사 기간 동안 20개 정점에서 출현한 식물플랑크톤의 우점종의 현존량을 표 2.3.4와 2.3.5에 정리하였다.

월별 우점종의 현존량을 살펴보면 97년 2월에는 *Protoperidium pellucidum*(25,000cells/l, 정점 5), 5월에는 *Eutreptiella gymnastica* (25,288,000 cells/l, 정점 1), 8월에는 *Skeletonema costatum* (18,565,000 cells/l, 정점 1)이 월별 최대치를 나타내었다. 96년의 결과와 비교하여 보면 2월에는 *Heterocapsa triquetra* 121,000 cells/L(정점 7)로 우점종의 최대치를 나타내어 본 조사의 결과와 차이를 나타내었으나 1996년 5월에는 *Eutreptiella gymnastica* 28,380,000 cells/L(정점 1), 7월에는 *Skeletonema costatum* 13,901,000 cells/L(정점 10)로 본 조사의 결과와 일치하였다.

정점 A7, A8, A9에서는 9월과 10월 *Ceratium furca*가 우점종으로 출현하여 다른 수역과 차이가 났다. *Eutreptiella gymnastica*는 춘계의 우점종으로 출현하였으며 *Skeletonema costatum*과 *Nitzschia pungens*는 하계 우점종으로 출현하였다.

정점 B1-정점 B6에서는 춘계에 *Ceratium fusus*, 하계에 *Nitzschia pungens*가 우점종으로 출현하였으며 정점 B1-정점 B6에서는 각 정점별, 계절별로 우점종이 동일하게 출현하였다(표 2.3.5).

표 2.3.4 조사기간중 진해만의 지점별(A1~A10) 우점종 현존량.

Unit : cells/L

station \ date		Feb. 28	May 10	Aug. 18
1	S	3,000	25,288,000	18,569,000
	U	17,000	10,570,000	4,325,000
	B	4,000	2,797,000	91,000
2	S	4,000	3,546,000	1,508,000
	U	11,000	9,951,000	602,000
	B	22,000	4,840,000	67,000
3	S	1,000	1,532,000	25,000
	U	1,000	7,000	35,000
	B	1,000	2,053,000	6,000
5	S	25,000	1,681,000	714,000
	U	1,000	2,169,000	38,000
	B	2,000	1,886,000	7,000
6	S	2,000	632,000	374,000
	U	8,000	321,000	41,000
	B	2,000	191,000	2,000
7	S	12,000	1,377,000	319,000
	U	11,000	480,000	667,000
	B	10,000	422,000	382,000
8	S	6,000	704,000	385,000
	U	24,000	166,000	183,000
	B	2,000	88,000	8,000
9	S	8,000	1,089,000	203,000
	U	13,000	96,000	303,000
	B	14,000	114,000	17,000
10	S	2,000	1,174,000	406,000
	U	1,000	225,000	121,000
	B	1,000	59,000	120,000
11	S	3,000	1,677,000	256,000
	U	3,000	96,000	28,000
	B	11,000	97,000	9,000
A7	S	2,000	284,000	294,000
	U	2,000	138,000	50,000
	B	3,000	130,000	6,000
A8	S	1,000	278,000	178,000
	U	7,000	11,000	50,000
	B	2,000	95,000	12,000
A9	S	2,000	146,000	163,000
	U	3,000	177,000	154,000
	B	3,000	55,000	42,000

표 2.3.5 조사기간중 진해만의 지점별(B1~B6) 우점종 현존량.

Unit : cells/L

date		May 10	Aug. 18
station			
B1	S	187,000	108,000
	U	163,000	60,000
	B	8,000	153,000
B2	S	1,000	162,000
	U	124,000	7,000
	B	6,000	32,000
B3	S	22,000	147,000
	U	94,000	40,000
	B	391,000	5,000
B4	S	103,000	147,000
	U	174,000	1,000
	B	218,000	3,000
B5	S	4,000	83,000
	U	10,000	3,000
	B	3,000	2,000
B6	S	8,000	10,000
	U	13,000	12,000
	B	23,000	2,000

제3장 부유생태계 변화 예측

제1절 서론

마산·진해만은 1960년대 이후 대규모 공업단지 및 농업단지가 조성되고 인구의 집중화 현상이 일어나면서 각종 오폐수의 유입과 연안역 개발사업 및 양식장의 밀집화 등으로 인해 오염문제가 심각하게 대두되었다. 이곳은 반폐쇄성 내만으로 혼합속도가 매우 느려 해수는 거의 정체상태에 있으며, 자정능력을 초과할 정도의 오폐수가 대량 유입되어 적조 다발 해역으로 잘 알려져 있다. 마산·진해만의 적조현상은 연안 어장 및 양식장에 막대한 경제적 피해를 입히고, 해수의 변색이나 냄새 등으로 휴양지로서의 가치를 감소시키기도 한다. 또한 몇몇 적조를 유발하는 식물플랑크톤은 독성을 가지고 있어, 먹이망을 통하여 인간에게 PSP, DSP, ASP, NSP 등과 같은 각종 패독현상을 유발시킬 수 있다. 1970년대 이후 적조가 빈발하기 시작하여 최근들어 매년 적조의 발생빈도가 증가되고 그 피해는 날로 증가하고 있다. 따라서 수질관리를 효율적으로 할 수 있는 수질관리 모형의 개발이 다른 어느 해역보다 시급한 해역이 되었다.

본 연구의 두가지 목표 중 첫째는 수질관리에 필요한 마산·진해만 부유생태계의 기존 환경자료 수집 및 새로운 자료의 획득을 통해 조사해역 자료를 DB화 하며 GIS를 개발하는데 필요한 자료를 제공하는 것이다. 이러한 자료는 우점종 식물플랑크톤 세포수의 시·공간분포, 동물플랑크톤 개체수의 시·공간분포와 환경자료(수온, 염분, 영양염, D.O., COD, pH 등)이다. 둘째는 수질관리 모형 개발에 필요한 식물플랑크톤의 생물량 자료와 이를 조절하는 동물플랑크톤의 섭식률에 대한 자료를 얻는 것이다. 식물플랑크톤의 생물량이 광량, 수온, 염분, 영양염 농도와 같은 환경요인에 의해 영향을 받는다는 사실은 잘 알려져있다. 그러나 식물플랑크톤의 생물량은 동

물플랑크톤의 섭식과 같은 생물학적 요인에 의해서도 영향을 받는다. 수질 관리를 위한 모델에서도 동물플랑크톤에 의한 섭식이 중요한 변수로 작용을 하나, 우리나라 연안역에서의 동물플랑크톤 섭식률에 대한 연구는 극히 미약하다. 전년도에는 식물플랑크톤을 소비하는 동물플랑크톤 중 가장 우점하는 요각류를 대상으로 하여, 조사해역 내에서 동·식물플랑크톤의 영양역학적 관계를 조사하고 2차원 수질모형에 필요한 생물학적 항목인 동·식물플랑크톤의 생물량, 동물플랑크톤의 섭식률, 동물플랑크톤의 사망률을 측정하였다. 이번 2단계 1차 조사년도에는 전년도 조사방법보다 개선된 실험방법으로 측정한 동물플랑크톤의 섭식률을 비교하였다. 또한 과제의 궁극적 목표가 3차원 수질관리 모델개발이므로 표층과 저층에서 각각 동물플랑크톤의 섭식률을 측정하여 수층에 따른 섭식률의 차이를 평가하였다.

제2절 재료 및 방법

섭식률 실험은 조사해역내 덕동앞 등대섬 1개 정점에서 1997년 2월에 2번, 3월, 5월, 8월, 10월에 각각 1번씩 총 6회에 걸쳐 실시되었다. 95년 7월부터 96년 7월까지 실시된 연안역 과제 3차년도의 섭식률 실험에서는 대조용기와 실험용기를 자연광 상태에서 24시간 배양하여 섭식률을 측정하였으나, 이번 과제에서는 식물플랑크톤의 성장률(k)이 $k=0$ 가 되도록 암조건에서 배양하여 섭식률을 측정하였다. 또한 수질 관리를 위한 3차원 모델을 만들기 위하여 표층과 저층에서 각각 동물플랑크톤의 섭식률을 측정하였다. 실험에 사용된 초식성 동물플랑크톤은 망목 $333\mu\text{m}$ 인 플랑크톤 네트를 사용하여 채집한 시료 가운데 건강한 우점종 요각류를 선별하여 사용하였다. 요각류를 해부현미경 하에서 멸균 피펫을 사용하여 골라내어 $0.22\mu\text{m}$ 여과지에 여과한 해수에 넣은 후 선별과정에서 유입된 다른 동물플랑크톤이나 식물플랑크톤을

제거하는 과정을 거쳤다.

동물플랑크톤의 섭식률은 microcosm을 사용하여 배양한 후 대조법을 이용하여 측정하였다. 2l polyethylen 실험용기(C)에는 자연상태의 해수를 넣어 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 밀도에 변함이 없는 대조병으로 사용하였다. 표층과 저층에서 채수한 해수로 각각의 실험용기를 채우고, 5~15마리의 건강한 요각류를 앞서 설명한 방법대로 선별하여, 각각의 실험용기에 첨가하였다. 이 실험용기를 24시간동안 현장과 같은 수온의 암조건하에 배양하였다. 섭식률은 24시간의 배양기간동안(t_1-t_0) 변화한 식물플랑크톤의 생물량으로 결정하였고, 식물플랑크톤의 생물량은 acetone으로 추출한 엽록소를 fluorometer로 측정하여 (Parsons *et al.*, 1984), 엽록소 a의 양으로 나타내었다. 엽록소 a는 배양 전과 배양 후 각각의 실험병에서 300ml의 시료를 취해 막여과지에 여과한 후 측정하였다. 또한 배양 전후 각 실험병 속의 동물플랑크톤을 현미경을 사용하여 동정 및 계수하였다.

배양 전과 후의 엽록소 a의 변화를 기준으로 한 동물플랑크톤의 식물플랑크톤에 대한 섭식률을 다음과 같은 방법으로 계산하였다. C_0 는 실험초기($t=t_0$) 조류 세포의 엽록소 양이고 C_t 와 C_f 는 t 시간 후의 각각 대조용기와 실험용기에서의 농도이다. 대조용기에서 엽록소 양(혹은 세포수)의 변화는 성장에 의해 일어나, 암조건하에서 배양하였으므로 다음 식에서 $k = 0$ 가 되고 따라서 $C_t = C_0$ 이다.

$$C_t = C_0 e^{kt} \quad (k, \text{성장계수})$$

따라서 초식성 동물플랑크톤을 인위적으로 첨가한 실험용기 속의 엽록소 a 양과 대조용기 속의 엽록소 a 양과의 차이를 구하여 배양시간과 실험용기 속에 든 초식성 동물플랑크톤의 숫자로 나누어 마리당 하루에 소비한 엽록소의 양을 계산하였고, 현장의 초식성 동물플랑크톤의 개체수를 곱하여 전체 요각류 군집의 섭식률을 계산하였다.

제3절 부유생태계의 특징

1. 환경 요인

1997년 조사기간 중 수온은 온대해역의 전형적인 계절변화를 보이고 있다(그림 3.3.1). 수온이 높은 시기에는 표층과 저층 사이에 온도 차이가 1~2℃있었으며, 수온이 낮은 시기에는 표층과 저층 사이에 수온차이가 거의 없어 전체 수층이 잘 혼합되는 것으로 판단된다. 조사해역의 춘계(5월)와 추계(10월)에 표층수온 분포양상은 내만에서 외해역으로 나가면서 낮아지는 경향을 보인다(장, 1996).

염분은 비교적 연변화가 없으나 조사시기에 따라 1~2 ‰의 차이가 있었으며, 표층과 저층을 비교하면 저층이 항상 1 ‰내로 높은 염분을 보였다. 춘계(5월)와 추계(10월) 마산·진해만의 염분 분포는 내만에서 외해쪽으로 나가면서 다소 염분이 증가하는 양상을 보인다(장, 1996). 조사해역의 염분은 폐쇄적인 지형 특성으로 외양수와 혼합과 해수 유동이 잘 안되어 조사시기의 기상 조건에 따라 변화 폭이 클 수도 있다(박, 1982)

1996년 1월부터 11월까지 마산항내에서 월별로 표층에서 조사된 수온, 염분, 용존산소(D.O.)의 변화는 그림 3.3.2에 표시하였다. 각 환경요인의 월별 연변화를 보면 수온은 2월에 최저값을 보이며 7, 8월에 최고값을 나타내다가 다시 감소하는 전형적인 변화양상을 보인다. 염분은 년중 큰 변화는 없으나 장마후에 급격한 감소를 보인다. 이는 조사해역이 마산항내로 강우량과 담수유입량에 의해 영향을 많이 받는 곳이기 때문에 나온 결과이다. 용존산소는 수온이 높은 계절에 낮게 나타났고 수온이 낮은 동계에 높게 나타났으며, 이는 임과 홍(1994) 등의 결과와 동일하였다. 분포 범위는 인근해역에서 5.1~12.8 mg/l라고 보고한 장(1996)의 수치와 거의 일치하였다.

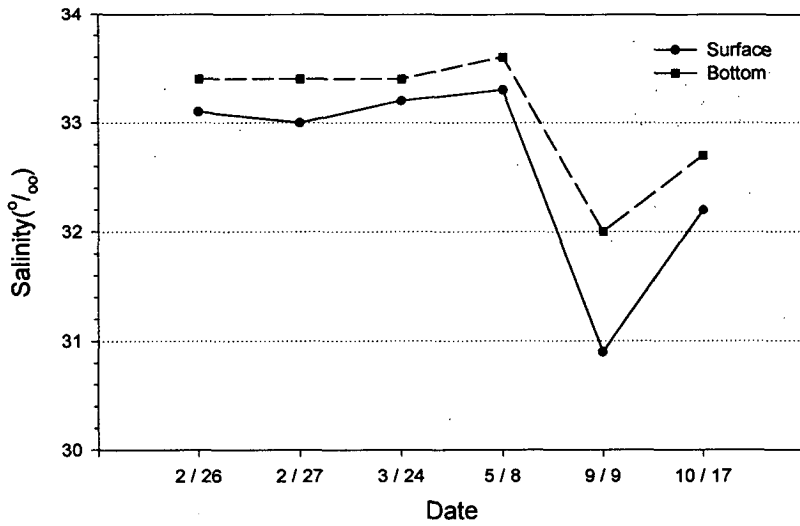
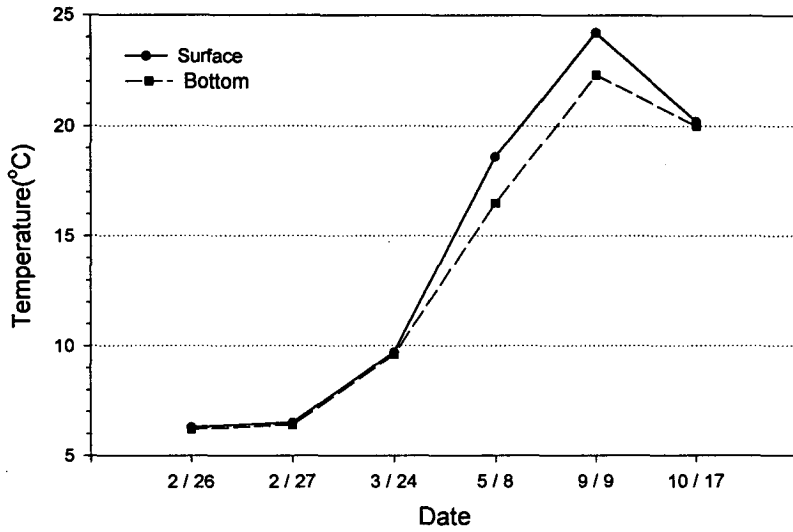


그림 3.3.1. 조사 시기의 표층과 저층의 수온과 염분

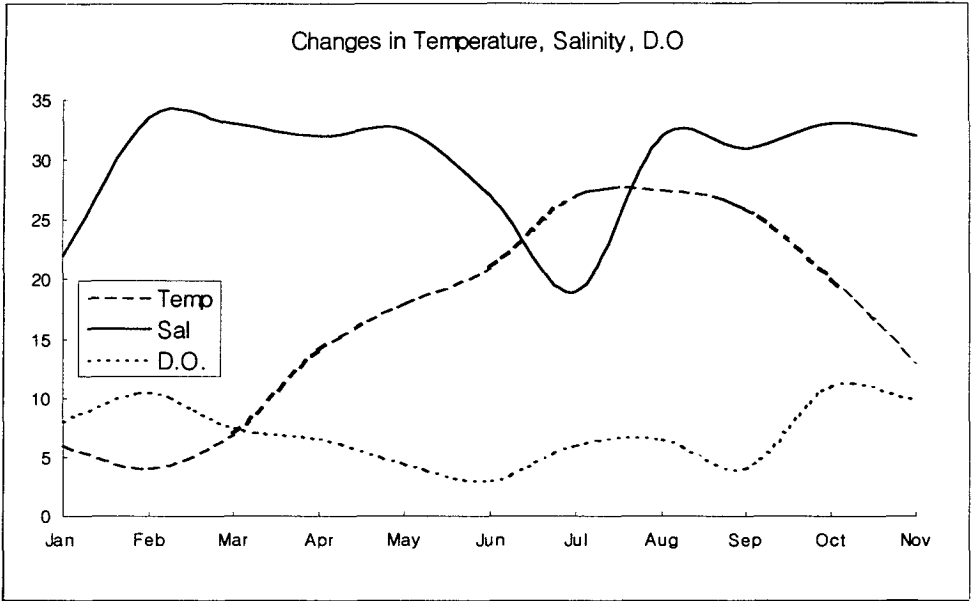


그림 3.3.2. 수온(°C), 염분(‰), D.O.(mg/l)의 월별 변화

2. 식물플랑크톤

진해·마산만은 각종 도시하수와 공장폐수에 의해 인근해역의 부영양화가 심각해지면서 적조 다발지역으로 알려져왔다. 이런 부영양화는 식물플랑크톤을 대량 발생시켜 저산소층을 형성하며 양식장에 피해를 주고 생태계의 균형을 깨뜨리게 된다. 박(1975)은 클로로필 분포와 농도를 측정하였는데 마산만 안에서 클로로필 a 농도가 가장 높게 나타났으며, 외해역으로 갈수록 농도가 낮아지는 결과가 나타났다. 각 정점별로 종조사 결과가 없어서 어떤 종이 대량 발생하였는지 알 수 없지만 도시하수와 각종 공장폐수

의 부영양화에 의한 대량발생임을 추정할 수 있었다.

유와 이(1976)는 조사해역에서 총 25속 62종 1품종의 식물플랑크톤을 출현하였다고 보고하였다. 월별 출현종 중에서 우점종을 보면 *Skeletonema costatum*(9~12월, 6월), *Eucampia zoodiacus*(1월), *Ditylum brightwellii*(2월), *Chaetoceros debilis*(2~3월), *Coscinosira polychorda*(3~4월), *Leptocylindrus danicus*(4~5월)의 순으로 나타났다 (표 3.3.1). 이 표를 보면 비록 하계 (7, 8월)의 자료는 없지만 조사 당시에는 거의 연중 규조류가 우점하고 있었던 것을 알 수 있다. 현존량 연변화는 9월부터 11월까지 감소하나 12월에는 증가하다가 1~2월 사이엔 불규칙한 증감을 보이다가 5월에 다시 증가하여 최대치를 이루며 6월부터는 다시 감소하는 경향을 보여 계절적 변화가 컸다.

표 3.3.1. 마산만에서 1974년 9월부터 75년 6월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종 (유와 이, 1976)

Date(y/m)	Dominant Species
7409	<i>Skeletonema costatum</i>
7410	<i>Skeletonema costatum</i>
7411	<i>Skeletonema costatum</i>
7412	<i>Skeletonema costatum</i>
7501	<i>Eucampia zoodiacus</i>
7502	<i>Ditylum brightwellii</i> , <i>Chaetoceros debilis</i>
7503	<i>Chaetoceros debilis</i> , <i>Coscinosira polychorda</i>
7504	<i>Coscinosira polychorda</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i>
7505	<i>Leptocylindrus danicus</i>
7506	<i>Skeletonema costatum</i>

표 3.3.2. 진해만에서 1976년 7월부터 78년 5월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종 (유와 이, 1979)

Date (y/m)	Dominant Species	
	Surface	Bottom
7607	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7609	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7611	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7701	<i>Thalassiosira hyalina</i>	<i>Thalassiosira hyalina</i>
7703	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Chaetoceros costatus</i>
7705	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>
7707	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7709	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7711	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7801	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7803	<i>Thalassiosira hyalina</i>	<i>Thalassiosira hyalina</i>
7805	<i>Nitzschia pungens</i>	<i>Nitzschia seriata</i>

유와 이(1979)는 1976년 7월부터 1978년 5월까지 2년 동안 매 기수월에 진해만의 6개 정점에서 식물플랑크톤 군집의 연변화를 조사하였다. 식물플랑크톤의 출현종 수는 30속 79종 2품종 3변종이며, 우점종은 *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira hyalina*, *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros costatus*, *Nitzschia pungens*, *Nitzschia seriata*, *Leptocylindrus danicus*였다(표 3.3.2). 현존량의 계절적변화는 808~12,461,000 cell/ℓ 로 큰 변화폭이 나타났으며 1976년 7월, 11월, 1977년 5월, 9월, 78년 5월에 대발생이 있었다. 대발생때 다양성지수는 1976년 7월에 *Skeletonema costatum*이 대발생하여 낮은 값을 나타냈으며 11월에는 18~33종의 다양한 출현종에 의해 높은 값을 나타내었다.

표 3.3.3. 진해만에서 1974년 9월부터 80년 1월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종 (유와 이, 1980)

Date(y/m)	Dominant Species	
	Surface	Bottom
7409	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7410	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7411	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7412	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7501	<i>Eucampia zoodiacus</i>	<i>Eucampia zoodiacus</i>
7502	<i>Chaetoceros compressus</i>	<i>Chaetoceros debilis</i>
7503	<i>Nitzschia pungens</i>	<i>Nitzschia pungens</i>
7504	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>
7505	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>
7607	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7609	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7611	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7701	<i>Thalassiosira hyalina</i>	<i>Thalassiosira hyalina</i>
7703	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	<i>Chaetoceros costatus</i>
7705	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>
7707	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7709	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7711	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7801	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7803	<i>Thalassiosira hyalina</i>	<i>Thalassiosira hyalina</i>
7805	<i>Nitzschia pungens</i>	<i>Nitzschia seriata</i>
7807	<i>Chaetoceros socialis</i>	<i>Chaetoceros socialis</i>
7809	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7811	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7901	<i>Chaetoceros debilis</i>	<i>Chaetoceros decilis</i>
7903	<i>Chaetoceros compressus</i>	<i>Chaetoceros compressus</i>
7905	<i>Chaetoceros didymus</i>	<i>Leptocylindrus danicus</i>
7907	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7909	<i>Chaetoceros didymus</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
7911	<i>Biddulphia mobiliensis</i>	<i>Biddulphia mobiliensis</i>
8001	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Skeletonema costatum</i>

유와 이(1980)는 1974년 9월부터 1980년 1월까지 6년간 진해만의 식물플랑크톤 개체군의 생태적 천이에 관해 조사하였는데, *Skeletonema costatum*, *Eucampia zodiacus*, *Thalassiosira hyalina*, *Chaetoceros debilis*, *Nitzschia pungens*, *N. seriata*, *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, *Biddulphia mobiliensis*로 나타났다(표 3.3.3). 1982년에 진해만의 생물학적 특성에 대해 조사한 결과를 보면 진동만이 가장 낮은 현존량을 나타냈으며, 행암만과 마산내만이 가장 높은 값을 나타내었다.

표 3.3.4. 진해만에서 1979년 8월부터 80년 9월까지 출현한 식물플랑크톤 우점종 (유와 이, 1980)

Date(y/m)	Dominant Species
7908	<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Gonyaulax</i> sp.
7909	<i>Cylindrotheca closterium</i> , <i>Gonyaulax</i> sp. <i>Gymnodinium</i> spp.
7910	<i>Gonyaulax</i> sp.
8002	<i>Skeletonema costatum</i>
8004	<i>Eutreptiella</i> sp.
8005	<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Heterosigma</i> sp. <i>Prorocentrum</i> spp.
8007	<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Gymnodinium</i> spp. <i>Prorocentrum</i> spp.
8008	<i>Prorocentrum</i> spp.
8009	<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i>

이 등 (1981)은 1979년 8월부터 1980년 9월까지 마산·진해만을 포함한 인근해역 표층에서 규조류 12과 30속 81종 3변종 1품종, 와편모조류 10과 10속 18종, 유글레나 1종을 보고하였다. 규조류 중에는 *Skeletonema*

*costatum*은 2월부터 9월까지 주종을 이루었고, *Chaetoceros curvisetus*와 *Cylindrotheca closterium*은 9월에 우세하였다. 유과 이(1979, 1980)에 의하면 *Skeletonema costatum*이 거의 연중 우점종인 것으로 보고하였다. 쌍편모조류는 *Gonyaulax* sp., *Heterosigma* sp., *Prorocentrum* sp. 및 *Gymnodinium* sp.가 5월부터 10월까지 우점하였다. 월별변화를 보면 *Skeletonema costatum*은 연중, *Eutreptiella* sp.는 4월, *Heterosigma* sp.가 5월, *Prorocentrum* spp.가 5~8월, *Gymnodinium* spp.는 7~9월, *Gonyaulax* sp.가 8~10월에 우세하게 출현하였다.

이(1984)에 의한 진해만의 1970년대와 1980년대 초까지의 결과는 규조류 136분류군으로 2목 5아목 14아과 3아과 42속 132종 3변종 1품종으로 구성되었으며, 출현종의 출현빈도에 따르면 *Skeletonema costatum*이 가장 빈도가 높게 나타났으며, 다음으로 *Nitzschia pungens*, *Ditylum brightwellii*, *Leptocylindrus danicus*, *Eucampia zodiacus* 등으로 총 27종이 이 해역의 대표종이었다. 1980년 중반에는 4문 6강 61속 176종으로, 규조류는 126종 편모조류는 50종으로 보고되었다(이, 1987).

1990년 초에 11개 정점에서 출현한 종은 4문 6강 11목 21과 48속에 포함되는 84종 2변종 1품종 3미동정종으로 총 100종류가 출현하였다. 월별 출현종 수를 보면 봄·가을에 풍부하며 겨울은 봄·가을에 비해 빈약하고 특히 12월과 1월에 가장 적게 출현하였다. 외편모조류는 주로 봄과 가을에 빈번히 나타나며 겨울에는 규조류가 주종을 이루었다. 정점별로 보면 내만 쪽이 외양에 비하여 종의 다양성이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 마산만 준설 이후 출현 종의 수가 현저하게 줄어 들었음을 알 수 있었다.

1990년대 초반의 진해·마산만과 다소 떨어진 외곽쪽인 장목의 계절별 출현양상을 보면 1993년 6월에는 규조류 25종, 외편모조류 18종, 기타 8종류가 출현하였으며, 우점종은 *Chaetoceros affinis*, *Leptocylindrus danicus*, *Nitzschia delicatissima*, *N. pungens*, *Prorocentrum triestinum*, *Rhizosolenia setigera*, *Scrippsiella trochoidea*가 최대 우점종으로 밝혀졌다. 현존량 분포는 계절별로 많은 변화를 보이고 있으며, 종다양성지수는 내만에서 1.43을 보여 가장 불안한 상태임을 나타내고 있다.

장 등 (1995)은 마산·진해만에서 1974년부터 1994년까지 보고된 식물플랑크톤은 총 253종이었고, 그 중 규조류는 45속 151종 7변종 3품종, 와편모조류는 26속 89종 2미분류종이라고 보고하였다. 1995년 1월부터 96년 10월까지 진해만 일대를 조사하여 43속 91종 1변종 1품종이 관찰되었다. 계절별로 보면 봄·가을에 풍부하며, 겨울철엔 봄·가을에 비해 빈약하며 특히 12월과 1월에 가장 적게 출현하였다. 와편모조류는 주로 봄·가을에 빈번히 나타나며 여름과 겨울철에는 규조류가 주종을 이루었다. 봄·여름에는 *Skeletonema costatum*과 *Nitzschia pungens*, 여름에는 *Eutreptiella gymnastica*, 겨울에는 *Heterocapsa triquetra*가 우점종으로 출현하였다.

지난 20여년간 조사된 결과를 종합해보면, 총 출현한 식물플랑크톤은 규조류 2목 5아목 16아과 45속 151종 7변종 3품종으로 와편모조류는 7목 16과 26속 89종 2미동정종 그리고 1종의 유글레나식물 등 총 253 종류로 구성되었다(과학기술처, 1995). 그중 빈번하게 출현한 종은 *Ceratium furca*, *Ceratium fusus*, *Chatonella antiqua*, *Chaetoceros affinis*, *Chaetoceros compressus*, *Chaetoceros costatus*, *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros decipiens*, *Chaetoceros didymus*, *Chaetoceros socialis*, *Chroomonas lateralis*, *Coscinodiscus granii*, *Coscinosira polychorda*, *Cyclotella meneghiniana*, *Cylindrotheca closterium*, *Ditylum brightwellii*, *Eucampia zodiacus*, *Eutreptiella gymnastica*, *Gonyaulax sp.*, *Gymnodinium sanguineum*, *Heterocapsa triquetra*, *Lauderia borealis*, *Leptocylindrus danicus*, *Nitzschia delicatissima*, *Nitzschia pungens*, *Nitzschia seriata*, *Noctiluca scintillans*, *Oxyphysis oxytoxoides*, *Prorocentrum balticum*, *Prorocentrum dentatum*, *Prorocentrum micans*, *Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum triestinum*, *Rhizosolenia setigera*, *Scrippsiella trochoidea*, *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira decipiens*, *Thalassiosira hyalina*, *Thalassiosira rotula*였다.

1995년 6월부터 96년 10월까지 마산·진해만 일대 15개 정점에서 조사한 자료(과학기술처, 1996)에 의하면, 식물플랑크톤은 총 43속 91종 1변종 1품종이 출현하였으며, 우점종은 표 3.3.5에 있다. 그중 규조류가 77%, 와편

모조류가 20%, 규질편모조류가 2%, 유글레나류가 1%를 차지하여 규조류가 가장 높게 나타났다. 계절별로 보면 춘계와 추계에 풍부하며, 동계에는 춘계나 추계에 비해 빈약하며 특히 12월과 1월에 가장 적게 출현하였다. 출현

표 3.3.5. 마산만(덕동)에서의 식물플랑크톤 우점종 (과학기술처, 1996)

Date(y/m)	Dominant Species
9506	<i>Prorocentrum micans</i>
9507	<i>Skeletonema costatum</i> <i>Asterionella glacialis</i>
9508	<i>Skeletonema costatum</i>
9509	<i>Skeletonema costatum</i>
9510	<i>Skeletonema costatum</i>
9511	<i>Skeletonema costatum</i>
9512	<i>Skeletonema costatum</i> <i>Thalassiosira rotula</i> <i>Heterocapsa triquetra</i> <i>Gymnodinium sanguineum</i>
9601	<i>Heterocapsa triquetra</i>
9602	<i>Heterocapsa triquetra</i>
9603	<i>Nitzschia pungens</i>
9604	<i>Nitzschia pungens</i>
9605	<i>Eutreptiella gymnastica</i>
9607	<i>Skeletonema costatum</i> <i>Nitzschia pungens</i> <i>Prorocentrum minimum</i>
9610	<i>Chaetoceros curvisetus</i> <i>Rhizosolenia alata</i>

종 중에서 규조류의 비율이 가장 높았으며, 그 다음 쌍편모조류가 높게 차지하였다. 또한 여름과 겨울에는 규조류가 주종을 이루었고 봄·가을에는 주로 쌍편모조류가 빈번히 나타나는 양상을 보여왔다. 현존량의 연변화는 계절적으로 변화가 크게 나타났는데 이는 수온과 관계가 있으며, 이에 따라 우점종의 천이현상도 나타나게 된 것 같다. 다양성지수가 계절에 따라 변화폭이 크게 나타났으므로 진해·마산만에 있어서 다양성지수는 식물플랑크톤 대발생의 parameter로써 좋은 결과를 나타낼 수 있다.

이렇게 해역별·계절별로 우점종이 다르게 나타나며, 정확한 결론을 도출하기 위해서는 장기적인 계획을 세워야 하며 매일 변화양상이 달라지므로 일정한 정점을 정하고 하루하루의 변화를 알아보는 것이 정확할 것이다.

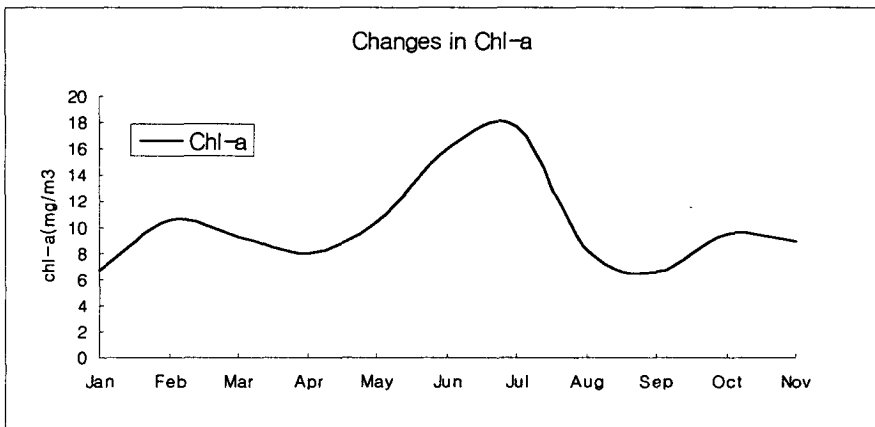


그림 3.3.3. 엽록소량의 연간 변화

마산항 내에서 1996년 조사된 식물플랑크톤 엽록소량의 평균값의 연간 변화는 그림 3.3.3에서 보듯이 6, 7월에 가장 높은 값을 보였다. 이는 장마 후 영양염류의 유입이 많아져 식물플랑크톤의 생물량이 증가한 것으로 판단되어, 항내에서는 영양염류의 유입에 식물플랑크톤 군집이 큰 영향을 받는 것으로 보인다.

3. 동물플랑크톤

(1). 종조성 및 분포특성

마산·진해만은 적조 다발해역으로 적조 원인생물이 되는 식물플랑크톤에 대한 연구는 비교적 활발하게 진행되었으나 동물플랑크톤에 관한 연구는 상대적으로 미약하였다. 마산·진해만을 포함하여 인접 외부해역에서 수행된 초창기 동물플랑크톤 연구에서는 가장 우점하는 요각류가 총 35속 80종 보고되었다(이, 1972). 이후 70년대 말에 수행된 연구에서는 이 해역에서 요각류(copepods)와 섬모충류(ciliates)가 각각 4종과 5종으로 우점하는 분류군이었고, 이외에 모악류(chaetognaths), 유형류(appendicularians), 지각류(cladocerans) 등의 분류군이 출현하였다고 보고하였다(박, 1979). 1982년 2월부터 11월까지 마산·진해만 인근해역에 대한 조사연구 결과를 보면 원생동물인 *Noctiluca scintillans*와 요각류인 *Acartia clausi* (*Acartia omorii*), *Paracalanus parvus* (*P. indicus*), 그리고 *Oithona nana* (*O. davisae*)의 세 종이 가장 우점하는 종들로 보고되었다 (한국과학기술원 해양연구소, 1982). 마산만에서 1986년 4월부터 1987년 9월까지 유와 이(미발표 자료, 김 등 1994에서 재인용)가 조사한 결과에 따르면 출현한 요각류의 종수는 모두 17속 30종이었고, 그 중 *Oithona davisae*, *O. similis*, *Paracalanus indicus*, *Acartia omorii*, *A. hudsonica*, *Corycaeus affinis* 등 6종이 마산만에서의 우점종이었다. Kim *et al.*(1993)이 남해에서 동물플랑크톤을 연구한 논문 및 보고서 16편을 참고로 하여 출현하는 요각류를 정리한 표 중에서 마산·진해만에서 보고된 종을 간추리면 표 3.3.6과 같다. 증명 뒤에 표시한 *는 조사해역에서 우점하는 요각류를 나타내며, 각 종이 출현하는 계절을 함께 표시하였다. 이 표에서 우점종은 년중 조사해역에 출현함을 알 수 있다.

표 3.3.6. 마산·진해만에서 보고된 요각류 (*는 우점종)

출 현 요 각 류 종 명	출 현 계 절
<i>Acartia bifilosa</i>	Sp, W
<i>A. danae</i>	Su, F, W
<i>A. erythraea</i>	Su, F, W
<i>A. hudsonica</i> *	Sp, Su, F, W
<i>A. omorii (A. clausi)</i> *	Sp, Su, F, W
<i>A. pacifica</i>	Su, F
<i>A. sinjiensis</i>	Su
<i>A. spinicauda</i>	Su, F, W
<i>A. steueri</i>	Sp, F, W
<i>Calanus sinicus</i>	Sp, Su, F, W
<i>Centropages abdominalis</i>	Sp, Su, F, W
<i>Eurytemora pacifica</i>	Sp, Su, W
<i>Labidocera bipinnata</i>	Su, F
<i>Paracalanus parvus(P. indicus)</i> *	Sp, Su, F, W
<i>Pseudodiaptomus marinus</i>	Sp, Su, F, W
<i>Scolecithrix nicobarica</i>	Sp, Su, W
<i>Temora turbinata</i>	Su, F, W
<i>Tortanus forcipatus</i>	Su, F, W
<i>Corycaeus affinis</i> *	Sp, Su, F, W
<i>C. andrewsi</i>	Su, F
<i>C. speciosus</i>	Su, F
<i>Oithona atlantica</i>	Sp, Su, F

표 3.3.6. 계속

<i>Oithona attenuata</i>	Su, F
<i>O. brevicornis</i>	Sp, Su, F
<i>O. davisae</i> (<i>O. nana</i>)*	Sp, Su, F, W
<i>O. similis</i> *	Sp, Su, F, W
<i>O. venusta</i>	Sp, Su, F, W
<i>Euterpina acutifrons</i>	Sp, Su, F, W
<i>Microsetella rosea</i>	Sp, Su, F

Sp(춘계), Su(하계), F(추계), W(동계)

기존 조사를 통해 마산·진해만에서 보고된 동물플랑크톤은 유종섬모충류 28종, 모악류 3종, 지각류 5종, 요각류 33종, 원생동물 1종, 유행동물 1종, 유형류 2종 등 총 66종의 동정된 분류군과 동정되지 않은 부유성 다모류 유생, 따개비 유생, 어류의 난 및 치자어, 십각목의 유생등이 보고되었다(김 등, 1994). 조사해역에서 보고된 요각류 33종은 Kim *et al.*, (1993)이 마산·진해만을 포함하여 남해에서 조사된 요각류의 종수가 모두 179종이라고 보고한 것에 비해 적은 숫자이다. 연구결과가 많지 않아 정확히 판단하기는 어려우나, 이는 마산·진해만의 폐쇄적 지형 특성으로 인해서 다양한 외양성 종들이 만내로 유입되기 힘들고, 심한 환경오염으로 인하여 서식종이 극히 제한되어 있기 때문인 것으로 예측되었다(김 등, 1994).

(2) 개체수의 시간변화

1982년 한국해양연구소에 의해 조사된 자료에 근거하여, 주요 초식성 동물플랑크톤인 요각류와 지각류의 월별 개체수(개체수·m⁻³) 변화를 살펴보면 그림 3.3.4과 같다. 요각류의 개체수는 월별로 큰 차이를 보였으며, 일반

적으로 요각류는 2월부터 4월까지 증가하다가 5~7월에 다시 감소하였으며, 8월에 최대치를 보였고 10월에 다시 증가하였으나 동계로 가면서 감소하였다. 지각류의 경우 요각류의 월별 변화와 비슷한 양상을 보였다.

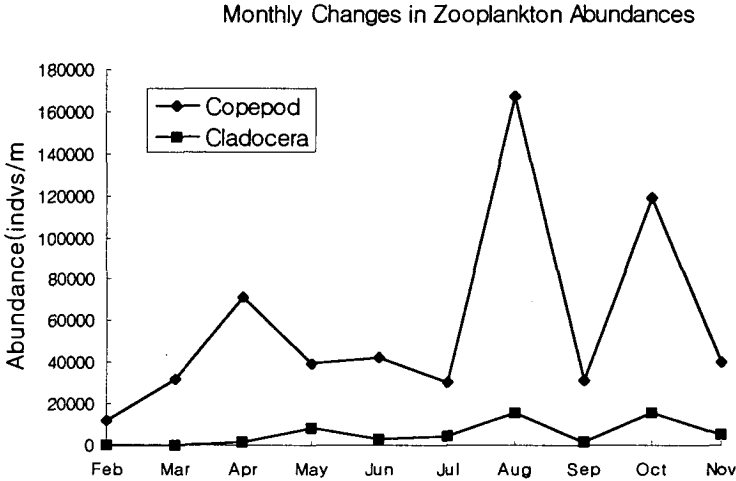


그림 3.3.4. 마산·진해만의 요각류(copepod)와 지각류(cladocera) 개체수의 계절변화

1990년 춘계와 하계에 걸쳐 일주일 간격으로 채집한 동물플랑크톤의 개체수 변화는 그림 3.3.5에 있다(개체수 자료는 과학기술처, 1995에서 인용). 그림 3.3.4와 비교하여 개체수의 시간적 분포에 다소 차이는 있으나 4월 말에서 5월 초에 걸쳐 요각류의 개체수가 높게 나타나고 6~7월에 개체수가 급격히 감소하는 양상은 일치하였다. 또한 8월에 개체수가 다시 증가하는 경향도 일치하였으나, 82년 조사 때는 개체수가 8월에 최대치를 보였으나 90년 조사 때는 개체수가 4~5월이 8월보다 훨씬 높게 나타났다. 한편 마산만의 조사정점 A, B, C와 진해만의 조사정점에서 요각류의 출현량은 큰 차이가 없었으나, 가장 외해 쪽에 위치한 진해만에서 비교적 개체수가 적었

다. 1995년 7월에서 1996년 3월까지 계절별로 조사한 자료(과학기술처, 1995)에 따르면 유생시기를 포함한 요각류의 개체수는 3월에 $45\text{개체} \cdot \ell^{-1}$ 로 가장 높고 11월에 $17\text{개체} \cdot \ell^{-1}$, 1월에 $8\text{개체} \cdot \ell^{-1}$ 였고, 7월에 $7\text{개체} \cdot \ell^{-1}$ 로 가장 낮았다. 이러한 일련의 조사를 바탕으로 요각류는 조사해역에서 봄에 개체수가 늘어나고 늦여름에서 가을에 걸쳐 다시 개체수가 증가하는 계절적인 변화를 나타냄을 알 수 있다.

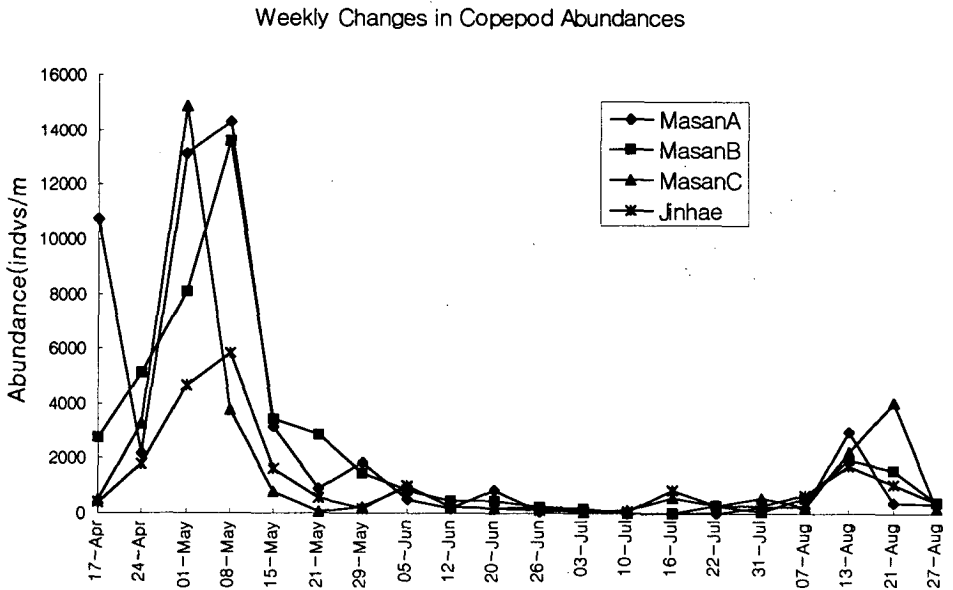


그림 3.3.5. 마산·진해만에 출현하는 요각류의 주간별 개체수 변화

Changes in Copepod Abundances

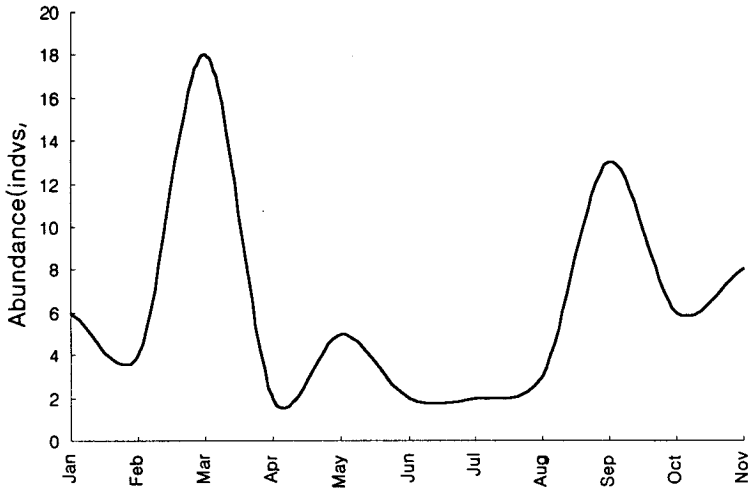


그림 3.3.6. 마산내만에서의 채집된 성체 요각류 개체수의 월별 변화

1996년 채집된 동물플랑크톤의 월별변화(그림 3.3.6)와 기존의 조사에서 보듯이 개체수는 뚜렷한 계절변화를 보인다. 춘계와 추계에 동물플랑크톤의 개체수의 최대치가 나타나나 연도에 따라 추계의 최대값이 더 높은 해(그림3.3.4)도 있고 춘계의 최대값이 더 높은 해도 있다. 한편 마산만 내 일정한 정점(마산항내)에서 6월말에 일별로 채집한 요각류의 자료를 보면 계절별 변화와 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(그림 3.3.7). 그러나 동일한 채집시료 중에 원생동물에 속하는 야광충(*Noctiluca scintillans*)의 개체수는 일간 변화폭이 큰 편이었다. 이러한 결과는 동물플랑크톤 생물량의 시간에 따른 변화를 연구하기 위해서는 번식률이 빠른 원생동물의 경우와 생활사가 비교적 긴 요각류사이에 채집의 시간간격을 달리해야 할 필요성을 시사한다. 즉 시간에 따른 원생동물의 개체수 변화를 조사하기 위해서는 1주일보다 짧은 간격으로 조사를 하고, 요각류의 경우는 1개월보다 짧은 간격으로 조사를 하는 것이 필요할 것이다. 요각류의 경우라도 만의 오부에 위치한 정점에서는 1주일 간격이라도 상당한 개체수의 변화폭을 보이기도 한다 (Kim, 1993).

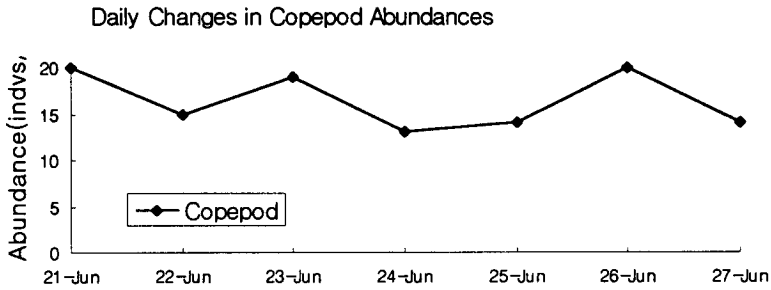


그림 3.3.7. 마산만에서 출현한 요각류 개체수의 일일변화

제4절 동물플랑크톤의 섭식률

1. 엽록소량

덕동앞 등대섬 인근에서 주간에 측정한 엽록소의 양은 표층과 저층(수심 12m)사이에 차이를 보였다. 표층은 평균 $1.45 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ 에서 $51.95 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ 범위였고, 저층은 $0.60 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ 에서 $4.29 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$ 범위였다. 일반적으로 표층이 저층보다 높은 엽록소의 양을 나타내며, 특히 추계에 표층 엽록소의 양이 높을 때는 저층의 엽록소량이 현저하게 적었다(그림 3.4.1). 이러한 것은 표층에 높은 밀도를 보이는 식물플랑크톤에 의해 저층의 광도가 급격히 줄어든 것에도 원인이 있을 것이고, 이때 우점하는 와편모조류들은 운동성이 있어 광조건이 좋은 표층에 밀집해 있었을 수도 있다. 엽록소량의 계절적 변화를 보면 2월에서 5월로 가며 줄어들고 9월에 최대값을 보였으며 10월에는 다시 줄어드는 경향을 보였다.

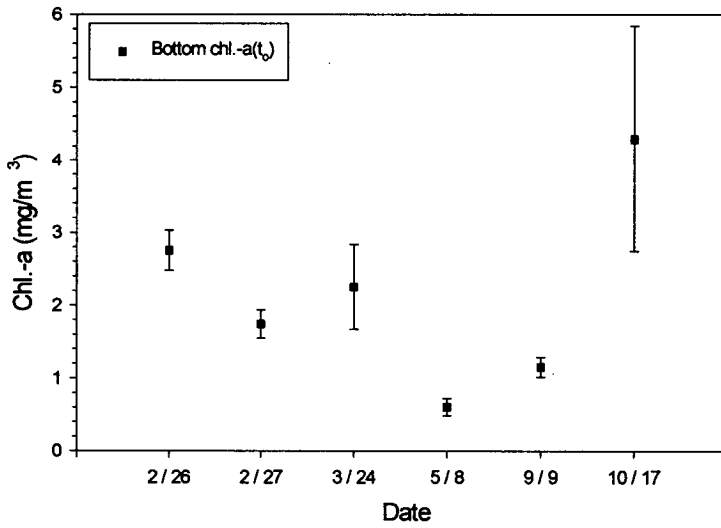
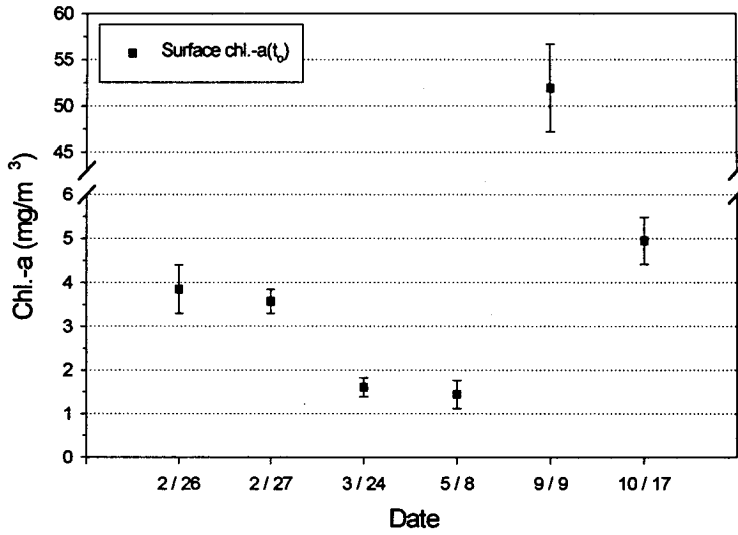


그림 3.4.1. 조사정점에서 측정한 표층과 저층의 엽록소량

2. 동물플랑크톤 개체수

동물플랑크톤 군집의 섭식압력 정도는 시간에 따른 군집의 천이 형태에 따라 달라지게 된다. 따라서 섭식률을 평가하기 위해서는 우점하는 초식성 동물플랑크톤의 개체수 변화를 파악해야한다.

섭식률 실험기간동안 채집한 동물플랑크톤의 개체수는 그림 3.4.2와 같다. 출현한 동물플랑크톤의 종조성은 95~96년에 채집한 동물플랑크톤의 종조성과 큰 차이가 없어 윤충류, 유충섬모충류, 야광충 등이 요각류와 함께 우점하였으며, 유형류와 다양한 저서생물의 부유성 유생등도 소수 출현하였다. 요각류는 2월, 3월, 5월, 10월에는 l^{-1} 당 1개체 미만 출현하였고, 추계(9월)에 가장 많이 출현하여 표층에는 평균 390개체 $\cdot l^{-1}$, 저층에는 평균 111개체 $\cdot l^{-1}$ 였다. 5월과 9월에는 저층보다는 표층에서 많이 출현하였고, 표층과 저층간의 엽록소량이 차이가 없었던 10월에는 저층에서 많이 출현하였다.

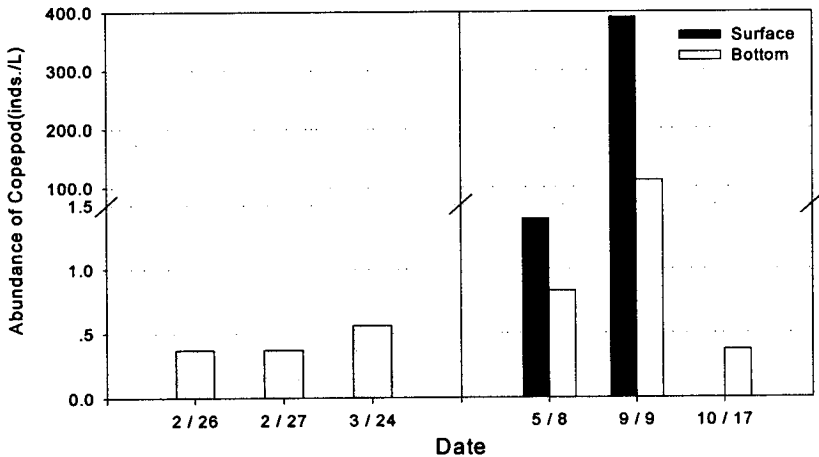


그림 3.4.2. 조사정점에서의 요각류 개체수

3. 섭식률

동물플랑크톤의 섭식압력은 식물플랑크톤의 생물량을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 특히 섭식률이 식물플랑크톤의 성장률과 큰 차이가 없을 때는 중요한 요인으로 작용을 한다. 섭식압력은 계절에 따라 변할 수 있으며, 이러한 계절적 변화는 식물플랑크톤의 생물량이나 군집구조의 계절적 천이를 유발시킬 수 있다(Sterner, 1989).

동물플랑크톤의 섭식률은 다양한 용어로 표시된다 (Omori & Ikeda, 1984). 여과율(filtering rate 또는 filtration rate)과 제거율(clearance rate)은 동물 한마리가 단위 시간동안 여과한 물의 양을 말한다. 두 용어에는 차이가 있는데, 전자는 일정한 시간동안 동물에 의해 여과된 물의 총량을 말하며, 후자는 먹이 입자가 그 시간동안 완전히 제거된 물의 용적을 말한다. 만약 초식자가 물속에 있는 모든 먹이 입자를 걸렀다면 여과율과 제거율은 같게 된다. 즉 동물플랑크톤의 여과효율이 100%일 때는 여과율과 제거율이 같아지게 된다. 초식률(grazing rate)은 단위 시간동안 한 마리 동물이 먹은 조류 세포의 수나 chl-a의 양을 말하며 이 단위는 초식성 동물플랑크톤에 한정해 사용되며, 여과율 또는 제거율과 동의어로 사용된다. 포식률(predation rate)은 단위 시간동안 한 마리가 먹은 먹이 동물의 수를 말하나, 흔히 육식성 동물플랑크톤에 한정되어 사용되거나 조류를 먹는 초식성 동물플랑크톤에게도 종종 사용된다. 섭식률(ingestion rate)은 단위 시간동안 한 마리가 먹은 먹이의 중량이나 열량을 말한다. 먹이 생물의 중량이나 열량을 알면 초식률이나 포식률로부터 섭식률을 계산할 수 있다. 실험기간동안 물속에 있는 먹이 입자의 평균 농도를 계산하면 여과율이나 제거율로부터 계산할 수도 있다. 이 실험에서는 동물플랑크톤의 개체당 초식률(individual grazing rate)은 chl-a의 양($\mu\text{g chl-a} \cdot \text{animal}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)으로, 개체당 섭식률(individual ingestion rate)은 탄소량($\mu\text{g C} \cdot \text{animal}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)로 표시하였으며, 군집 섭식률(community grazing rate)은 실험 당시 현장의 요각류 개체수를 곱하여 표시하였다.

동물플랑크톤의 섭식압력을 직접 측정할 수 있는 대조법, 방사성 동위원소 추적자 방법, 표지방법 등에 관한 이론적인 배경은 이미 언급하였으며, 대조법을 이용하여 동물플랑크톤의 섭식률을 측정한 바 있다(과학기술처, 1996). 이번에는 대조법을 개선하여 동물플랑크톤의 섭식률을 측정하였다.

섭식률을 측정한 결과 요각류 한 마리가 한 시간에 먹은 양(초식률;

grazing rate)은 음수값이 나온 것을 제외하고는 0.0004~0.0119 $\mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 범위였다. 이는 일일 초식률로는 0.0096~0.2856 $\mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 이며, 연안역에서 측정된 탄소대 엽록소(c:chl-a)의 비를 45라고 할 때(Tantichodok, 1990), 요각류의 섭식률(ingestion rate; $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)은 전 실험기간동안 0.432~12.852 $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 범위였다(표 3.4.1).

표 3.4.1. 요각류의 초식률($\mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 과 $\mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)과 섭식률 ($\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

Date	grazing rate (h)		grazing rate (d)		ingestion rate (d)	
	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
26 Feb	0.0006	0.0119	0.0144	0.2856	0.648	12.852
27 Feb	0.0027	0.0106	0.0648	0.2544	2.916	11.448
24 Mar	0.0033	0.0007	0.0792	0.0326	3.564	1.466
08 May	0.0064	0.0015	0.1536	0.0360	6.912	1.620
09 Sep	0.0004	-0.0001	0.0096	-0.0002	0.432	-0.097
17 Oct	0.0028	0.0016	0.0672	0.0384	3.024	1.728

이와 같은 수치는 기존 연구에서 방사성 동위원소 추적자법으로 실험하여 얻은 요각류의 섭식률 결과와 크게 다르지 않았다. 예를 들어 Kiorboe *et al.* (1982)이 측정된 *Centropages hamatus*의 여과율을 탄소대 엽록소의 비값 45를 적용해 섭식률을 계산하면 0.90~2.45 $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 이다. Robertson(1983)은 *Acartia tonsa*의 섭식률 경우 0~14.3 $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 라고 보고하였고, Gifford & Dag(1991)는 *Acartia tonsa*의 섭식률이 0.1~4.7 $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 라고 보고하였다. Kim(1993)은 성체 요각류와 커페포다이트 유생의 섭식률이 0.07~21.31 $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 범위였으며 평균 5.76 $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 라고 보고하였다.

표층과 저층에서 요각류 개체당 초식률의 시간에 따른 변화는 그림 3.4.3에 도시하였다. 표층에서의 초식률은 5월에 가장 높아 0.1536 $\mu\text{g chl-}$

$\mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 였고, 저층에서의 초식률은 2월에 가장 높아 $0.2544 \sim 0.2856 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 였다. 일반적으로 동계에는 저층에서의 초식률이 표층에서의 초식률보다 높았으나 춘계(3, 5월)와 추계(9, 10월)에는 표층에서의 초식률이 저층에서의 값보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 비교적 해수의 혼합이 활발한 동계에는 초식성 플랑크톤들이 저층에서 주로 섭식하고, 표층수온이 올라가 수온약층이 형성되는 때에는 표층에서 초식성 플랑크톤들의 섭식활동이 활발함을 보여준다.

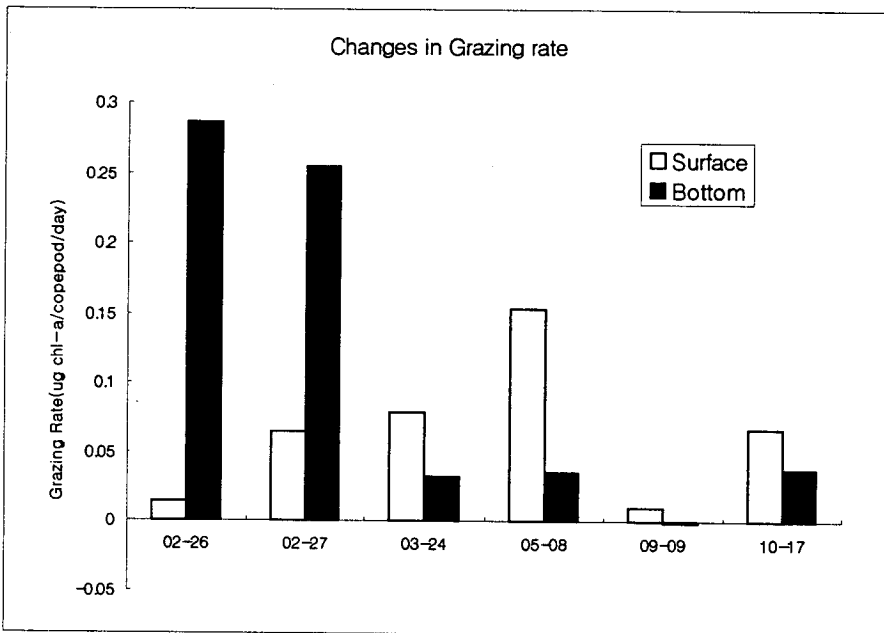


그림 3.4.3. 표층과 저층에서의 동물플랑크톤 개체당 초식률

이번에 조사한 개체당 섭식률은 작년에 조사한 개체당 섭식률 범위 $0.001 \sim 0.064 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 보다는 높은 $0.009 \sim 0.285 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 범위를 보였다. 이는 암상태에서 배양한 실험방법의 차이가 요각류의 섭식률을 증가시켰을 가능성도 있어 향후 세부적인 비교

조사가 필요한 부분이다. 2년간의 결과를 종합하여 보면 월별 평균 개체당 섭식률의 값은 그림 3.4.4에서 보듯이 하계나 추계보다는 동계나 춘계에 높은 값을 보였다. 이와 같은 현상은 하계나 추계에 요각류들의 먹이로 선택성이 떨어지는 와편모조류들이 (Kim *et al.*, 1992) 조사해역에 다량 출현하기 때문에 개체당 섭식률이 떨어진 것으로 사료된다. 요각류들의 섭식기관 구조나 먹이 입자의 크기나 모양에 따른 먹이선택성에 대해서는 이미 2·3차년도 보고서(과학기술처, 1996)에 기술하였다. 요각류의 먹이 선택성은 먹이입자의 크기나 모양뿐 아니라 식물플랑크톤이 가지고 있는 독성에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 예를 들어 요각류 *Acartia hudsonica*와 *Pseudocalanus* spp. 에게 독성 와편모조류로 잘 알려진 *Gonyaulax tamarensis*를 먹이로 주었을 때 이 조류의 독성이 강할수록 섭식률이 떨어지는 것이 보고되었다 (Ives, 1985). 한편 요각류들은 와편모조류에 의한 대발생이 일어난 해역을 회피하는 것이 현장에서 관찰되었으며 (Fiedler, 1982), 와편모조류의 patch안에 있을 때는 섭식을 하지 않고 (Huntley, 1982), 먹더라도 아주 낮은 섭식률을 보인다 (Turner and Anderson, 1983). 또한 요각류는 독성이 있는 조류를 먹었을 때 삼장박동이 빨라지고, 먹은 독성 조류를 토해내거나 마비증세를 보이기도 한다(Huntley *et al.*, 1986).

그러나 요각류와는 달리 와편모조류의 독성에 영향을 받지 않고 이들을 소비하는 초식성 동물플랑크톤도 있다. 예를 들어 유충섬모충류나 다모류의 부유성 유생 등은 독성 와편모조류의 효과적인 초식자로 알려져 있다 (Watras *et al.*, 1985). 또한 저서 현탁물식자들도 수층의 와편모조류를 소비하며, 저서 퇴적물식자의 경우 독성 와편모조류의 포자를 소비한다. 유충섬모충류와 다모류의 유생은 Cape Cod 내만에서 적조원인생물을 조절할 수 있는 것으로 조사되었다(Watras *et al.*, 1985). 이 과제의 조사해역인 마산·진해만에도 시기에 따라 유충섬모충류와 다모류의 부유성 유생이 우점하고 있어 이들이 식물플랑크톤의 대발생에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

동물플랑크톤의 섭식률은 이미 논의한 대로 여러 가지 요인에 의해 변화가 많기 때문에 되도록 많은 자료를 이용하여 월별 변화 형태를 파악하는 것이 필요하다. 그림 3.3.4의 월별변화에 자료가 없는 때(4, 6, 8, 11, 12월)는 향후 년도에 자료를 보완하면 섭식률의 년변화 형태를 파악할 수 있을 것이다.

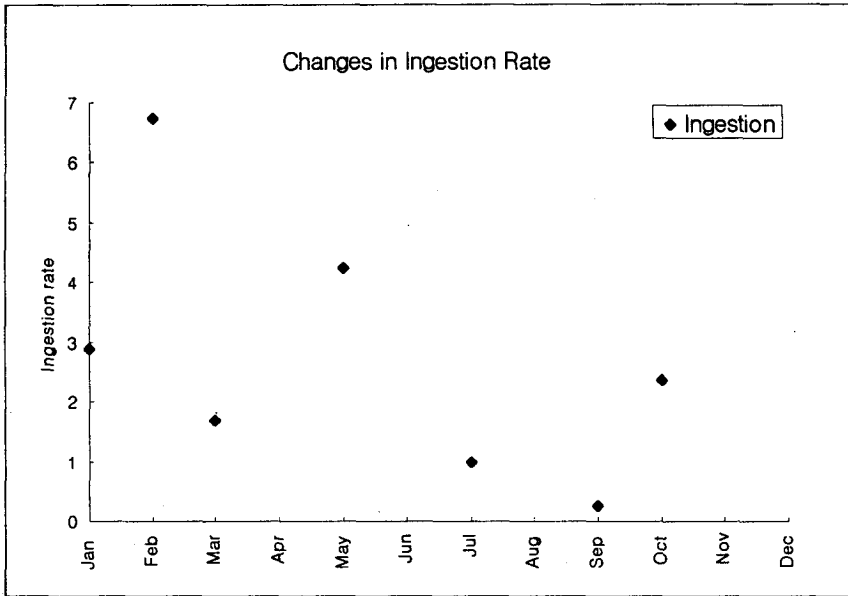


그림 3.4.4. 조사해역 요각류의 평균 개체당 섭식률(ingestion rate; $\mu\text{gC} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)의 계절변화

개체당 섭식률과는 달리 군집 섭식률은 그 시기에 얼마나 많은 초식자가 있는가에 의해 결정된다. 식물플랑크톤의 생물량을 조절하는 요인으로 초식자의 먹이 선택성, 개체당 섭식률도 중요하지만, 군집면에서 보면 초식자의 개체수가 중요한 역할을 한다. 앞서 계산한 개체당 섭식률에다 현장의 초식성 요각류의 개체수를 곱하여 계산한 군집 섭식률은 그림 3.4.5에 있다. 군집 섭식률의 범위는 표층에서는 $0 \sim 3.750 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{community}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 저층에서는 $0.014 \sim 0.094 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{community}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 전 수층에서의 평균 군집 섭식률은 $0.007 \sim 1.850 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{community}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 였다. 일반적으로 표층보다는 저층에서 요각류 군집에 의한 섭식률 변화폭이 적었다.

9월에는 개체당 섭식률이 표층에서 $0.0096 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 5월의 섭식률 $0.1536 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{copepod}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 보다 낮았으나 다른 실험기간에 비해 요각류의 개체수가 현저히 증가하여 전체 군집을 고려하면 1 l 해수중의 요각류들이 소비한 엽록소의 양은 $3.75 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{community}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 로 5월의 $0.21 \mu\text{g chl-a} \cdot \text{community}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 보다 더 높았다. 그러나 9월에 현장 표층 해역에서 엽록소의 양이 $51.95 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 5월의 $1.45 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 보다 아주 높았으므로 요각류들의 섭식으로 인해 소비된 상대적인 엽록소의 양은 전체 엽록소양의 6.6%로 오히려 5월의 11.9%보다 낮았다 (그림 3.4.6).

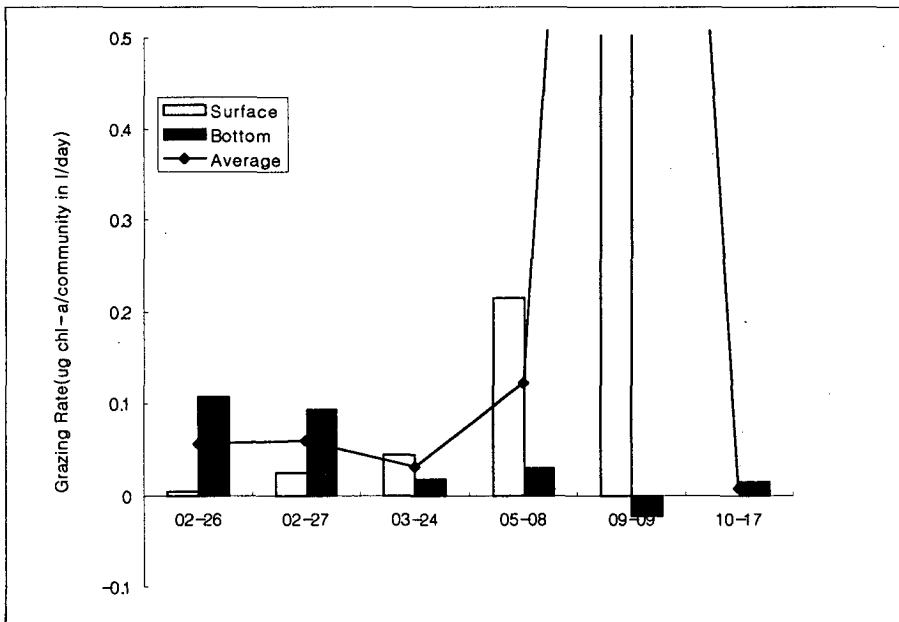


그림 3.4.5. 조사해역 표층과 저층에서의 요각류 군집 섭식률과 수층내 평균 군집 섭식률

요각류의 섭식률은 9월 9일 저층 실험에서 음수값이 나왔다. 전년도 실험에서는 자연의 광조건 상태 하에서 대조법을 이용하여 실험을 하였기 때문에 배양기간 중 식물플랑크톤의 성장에 의해 증가한 개체수가 초식자에 의해 소비된 개체수보다 많으면 섭식률이 음수값으로 나올 수가 있었다. 그러나 암조건에서 배양을 한 이번 실험에서는 이론적으로 음수값이 나올 수 없으므로, 실험오차일 가능성을 배제할 수 없다. 향후 조사에서 이에 대한 검증작업이 필요하다고 판단된다.

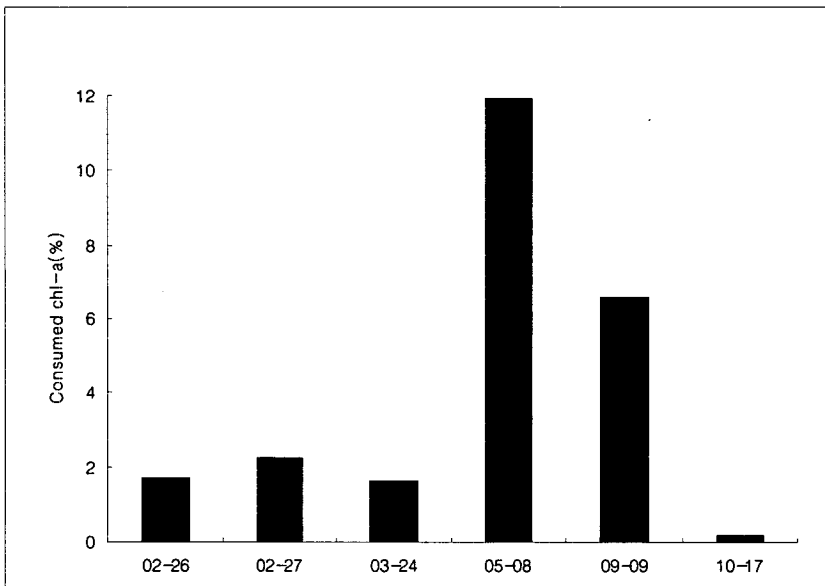


그림 3.4.6. 요각류 군집이 소비한 식물플랑크톤의 양 (전체량에 대한 %)

일반적으로 연안역에서는 평균 10% 미만의 식물플랑크톤 생산량이 동물플랑크톤에 의해 소비되는 것으로 알려져 있다 (Lara-Lara *et al.*, 1990). 예

를 들어 연안역(뉴욕 Reeves Bay)에서 유글레나가 대발생을 하였을 때 동물플랑크톤 군집은 식물플랑크톤에 의한 하루 1차생산의 평균 3.2%를 소비하는 것으로 보고 되었다 (Kim and Chang, 1992).

조사해역에서 요각류 군집은 5월에 식물플랑크톤 생물량의 최대 11.9%까지 섭식하였으며, 10월에 가장 낮아 0.2%를 소비하였다. 그러나 실험 대상이 가장 우점하는 요각류를 대상으로 하였고, 일시적으로 우점하는 동물플랑크톤을 포함시키지 않았기 때문에 실제로 현장에서 전체 동물플랑크톤 군집에 대한 섭식률은 실험값보다 높으리라 예상된다. 한편 이 해역에 자생하거나 양식을 하는 홍합같은 저서 현탁물식자들의 섭식에 의해 소비되는 식물플랑크톤의 양도 추후 조사되어야 할 것이다.

제5절 결론 및 향후 연구방향

부영양화(eutrophication)나 초식자의 섭식압력 감소에 의한 식물플랑크톤의 대발생은 해수의 색깔을 변화시키고, 대량발생 후 사망하면 용존산소를 감소시키거나 독성을 분비하여 수산업 및 양식업에 막대한 피해를 입히고, 또한 패독증상으로 인명사고를 유발하기까지 한다. 수질 조절을 위한 과학적인 예측모델이 여러 가지 개발되었으며, 주로 식물플랑크톤의 생물량이나 용존산소가 그 기준이 되고 있다. 식물플랑크톤 대발생에 의한 피해를 줄이기 위해서는 식물플랑크톤의 대발생을 예측하고 조절하는 것이 가장 바람직 할 것이다. 식물플랑크톤의 생물량은 부유생태계내에서 영양염류에 의해 조절되기도 하고 초식자의 섭식률에 의해 조절되기도 하며, 상대적인 중요성은 해역에 따라 다르다. 일반적으로 조사해역처럼 부영양화된 곳에서는 식물플랑크톤 군집의 변화가 하위영양단계에 의해 상향조절이 되기보다는 상위영양단계에 의해 하향조절이 되는 것이 상대적으로 더 중요하다고 알려져 있다(McQueen *et al.*, 1986). 그러므로 마산·진해만처럼 부영양화가 심한 곳에서는 수질을 예측, 관리하는 수질모형 개발에 초식성 동물플랑크톤의 섭식역할을 평가하는 것이 필수적이다. 한편 환경요인의 변동이 심하고, 동·식물플랑크톤의 군집변화가 단기간에 걸쳐 크게 변화하는 곳에서

는 장기적인 조사를 통해 생물량과 섭식률 자료를 축적하여야 보다 정확한 모델 개발이 가능할 것이다.

조사해역(마산항내와 덕동 인근)에서 엽록소 a로 측정된 식물플랑크톤 생물량은 은대역에서 전형적으로 보이는 춘계와 추계의 높은 생물량의 계절별 변화를 보이지는 않았다. 춘계와 추계에 식물플랑크톤의 생물량이 증가하는 하나 대신 하계에 식물플랑크톤 생물량이 최대값을 보였다. 이는 장마 후에 증가한 영양염류와 하계에 동물플랑크톤의 개체수가 크게 감소하는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

표층과 저층간 엽록소량의 차이를 보면 표층이 저층보다 엽록소량이 높았으며 특히 와편모조류가 우점하는 9월에는 표층의 엽록소량이 저층에 비해 아주 높았다. 이러한 결과는 이들의 이동성에 기인하는 것으로 판단된다.

동물플랑크톤의 섭식률은 규조류가 우점하는 때 요각류의 섭식효과가 큰 반면 적조를 유발하는 유독성 와편모조류가 우점할 때 상대적으로 요각류의 섭식효과가 낮았던 전년도의 결과와 크게 다르지 않았다. 많은 연구결과에 의하면 와편모조류의 독성에 의해 요각류의 섭식률이 줄어들어 섭식에 의한 효과가 크지 않았던 것으로 사료된다 (Huntly *et al.*, 1986). 이번 조사에서도 개체당 섭식률은 적조원인생물이 우점하는 9월에 가장 낮게 나타나고, 규조류가 우점하는 동계에 가장 높게 나타나, 요각류의 섭식행동이 상당히 복잡하다는 것을 보여주었다. 요각류의 개체당 섭식률은 동계에는 저층에서 높았으며, 춘계와 추계에는 표층에서 높았다. 요각류 군집이 소비한 엽록소의 양은 개체수가 많았던 9월이 가장 높았으나, 전체 식물플랑크톤 생물량에 비해 가장 많은 양을 소비한 것은 5월의 11.9% 였다.

이상의 결과에서 초식자의 개체수 변동이 식물플랑크톤의 생물량을 조절하는 중요한 인자중의 하나이므로, 동물플랑크톤의 개체수를 조절하는 포식자에 대한 연구가 향후 이루어져야 할 것이다. 실제로 자연상태하에서 초식성 요각류를 소비하는 해파리류의 개체수 증가 후에 식물플랑크톤의 대발생이 일어나는 것이 보고된 것이 있다(Kim *et al.*, 1992).

보다 정확한 수질예측을 위해서는 각각 우점종 식물플랑크톤에 대한

요각류의 선호도 및 섭식률 측정이 필요할 것이다. 한편 적조를 유발하는 식물플랑크톤에 대한 요각류의 섭식효과가 낮으므로, 이들을 소비할 수 있는 대체 천적생물을 찾아내 수질개선에 이용하는 것도 과제로 개발해 볼 가치가 있을 것이다. 적조원인생물의 효과적인 섭식자로 알려진 유종섬모충류나 (Kim and Chang, 1992), 윤충류, 다모류 유생처럼 조사해역에서 일시적으로 우점하는 동물플랑크톤의 섭식효과도 적조의 발생기작에 중요한 역할을 할 수 있으므로 이들의 섭식효과도 향후 조사하는 것이 바람직하겠다.

참 고 문 헌

- 과학기술처, 1995. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(I). BSPN 00260-807-6.
- 과학기술처, 1996. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(II·III). BSPN 00322-968-7.
- 김동엽, 최승민, 김세화, 이원철, 유광일. 1994. 동물플랑크톤에 관한 연구. 진해만의 환경과 적조(유광일 교수 회갑기념 학술 심포지움 요약집). pp.14-16.
- 박주석, 1982. 진해만의 적조현상에 관한 연구. 수진원 연구보고 1:63-79.
- 박주석. 1979. 마산만의 환경오염 평가를 위한 야외생물 오염시험연구. 한국해양학회지, 14:15-25.
- 박청길. 1975. 진해만 해수의 부영양화와 클로로필 분포. Bull. Korean Fish. Soc., 8(3)121-126
- 유광일·이종화. 1976. 마산만의 환경학적 연구 - 식물플랑크톤의 연변화. J. Oceanol. Soc. Kor., 11(1)34-38
- 유광일·이진환. 1979. 진해만의 환경학적 연구 - 식물플랑크톤 군집의 연변화(1976-1978). J. Oceanol. Soc. Kor., 14(1)26-31
- 이삼석. 1972. 진해만 및 그 인접해역의 부유성요각류의 분포. 수진연구보고, 9:7-27.
- 이진환·한명수·허형택. 1981. 진해만의 적조원인 생물에 관한 연구. Bull. KORDI. 3, 97-105
- 임현식, 홍재상, 1994. 진해만의 저서동물의 군집생태. 1. 저서환경. 한국수산학회지 27(2):200-214.
- 장민철, 1996. 부산 및 진해 연근해에 출현하는 동물플랑크톤 오염지표종 개발에 대한 연구. 한국해양대학교 공학석사 학위논문. 112pp.
- 한국과학기술원 해양연구소. 1982. 진해만의 적조 및 오염모니터링 시스템 개발을 위한 연구. BSPE 00044-66-7.
- Chang, M., W.-S. Kim, and J. H. Lee, 1995. Phytoplankton blooms

- in the coastal waters of Korea - Red tides in Masan and Chinhae Bays. *Ocean Res.*, 17(2): 137-156.
- Fiedler, P. C. 1982. Zooplankton avoidance and reduced grazing responses to *Gymnodinium splendens* (Dinophyceae). *Limnol. Oceanogr.* 22(1):99-107.
- Gifford, D. J. and M. J. Dagg. 1991. The microzooplankton -mesozooplankton link: consumption of planktonic protozoa by the calanoid copepods *Acartia tonsa* Dana and *Neocalanus plumchrus* Murukawa. *Mar. Micro. Food Webs.* 5:161-177.
- Huntley, M. E. 1982. Yellow water in La Jolla Bay, California, July 1980. II. Suppression of zooplankton grazing. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 63:81-91.
- Huntley, M., P. Sykes, S. Rohan and V. Marin, 1986. Chemically-mediated rejection of dinoflagellate prey by the copepods *Calanus pacificus* and *Paracalanus parvus*: mechanism, occurrence and significance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 28:105-120.
- Ives, J. D. 1985. The relationship between *Gonyaulax tamarensis* cell toxin levels and copepod ingestion rates. In: *Toxic Dinoflagellates*. Anderson, D., A. W. White and D. G. Baden (eds). Elsevier, New York. pp.413-418.
- Kim, W.-S. and M. Chang, 1992. Zooplankton grazing during an euglenoid bloom in reeves Bay, New York, U.S.A. *Ocean Res.*, 14(1):25-34.
- Kim, W.-S. and M. Chang. 1992. Zooplankton grazing on toxic dinoflagellates: focused on *Gonyaulax tamarensis*(*Protogonyaulax tamarensis*). *Kor. J. Environ. Biol.* 10(1):66-76.
- Kim, W.-S., M. Chang and S. H. Shim, 1992. Multitrophic interactions as a trigger of the *Gyrodinium aureolum* bloom in reeves Bay, New York. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 27(4):286-276.

- Kim, W.-S., 1993. Zooplankton community effects on the phytoplankton community in Long Island bays. Ph.D. Dissertation, SUNY at Stony Brook. 242pp.
- Kim, W.-S., J.-M. Yoo and C.-S. Myung. 1993. A review on the copepods in the South Sea of Korea. Bull. Korean Fish. Soc. 26(3): 266-278.
- Kiorboe, T., F. Mohlenberg and M. Nicolajsen. 1982. Ingestion rate and gut clearance in the planktonic copepod *Centropages hamatus* (Lilljeborg) in relation to food concentration and temperature. *Ophelia* 21:181-194.
- Lara-Lara, J. R., B. E. Frey and L. F. Small, 1990. Primary production in the Columbia River estuary. II. Grazing losses, transport, and a phytoplankton carbon budget. *Pacific Sci.*, 44:38-50.
- McQueen, D. J., M. R. S. Johannes and J. R. Post, 1989. Bottom-up and top-down impacts on freshwater pelagic community structure. *Ecol. Monogr.* 59(3):289-309.
- Omori, M. and T. Ikeda, 1984. *Methods in Marine Zooplankton Ecology*. John Wiley & Sons, New York, 332pp.
- Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli, 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173pp.
- Robertson, J. R. 1983. Predation by estuarine zooplankton on tintinnid ciliates. *Est. Coast. Shelf Sci.* 16:27-36.
- Stener, R. W. 1989. The role of grazers in phytoplankton succession. In: *Plankton Ecology. Succession in Plankton Communities*. Sommer, U(ed). Springer-Verlag. pp.107-170.
- Tantichodok, P. 1990. Relative importance of phytoplankton and organic detritus as food sources for the suspension-feeding bivalve *Mytilus*

edulus L., in Long Island Sound. Ph.D. dissertation. SUNY at Stony Brook.

Turner, J. T. and D. M. Anderson. 1983. Zooplankton grazing during dinoflagellates blooms in a Cape Cod Embayment, with observations of predation upon tintinnids by copepods. PSZNI Mar. Ecol. 4(4):359-374.

제4장 퇴적환경 및 오염퇴적물 변화분석

제1절 서론

진해·마산만에 분포하는 해저퇴적물의 퇴적학적 특성 및 중금속 오염 정도를 밝히기 위하여 1996년도에는 총 13점의 표층 퇴적물과 10점의 시추 퇴적물을 채취하였고 1997년도에는 총 16점의 표층 퇴적물을 채취하였다. 표층퇴적물의 퇴적학적 특성 및 중금속 함량을 연간 수평적 변화를 밝힘으로써 마산, 진해만에서의 퇴적물의 공급, 이동, 집적의 양상을 이해하는데 목적이 있다. 또한 퇴적물의 퇴적작용에 의한 퇴적물내에 포함된 중금속의 함량과 집적양상을 규명할 것이다.

제2절 연구방법

1. 입도(grain size)

채취된 시료에 과산화수소와 염산을 차례로 넣어 유기물과 탄산염을 제거, 건조시켜 무게를 측정한 후 습식체질(wet sieving)을 하였다. 4 ϕ 이하 조립질 시료는 sieve shaker로 20분간 체질하여 1 ϕ 또는 0.5 ϕ 간격으로 무게 백분율을 구하였다. 4 ϕ 이상 세립질 시료는 전체를 대표하는 2 g을 취해 300 ml의 0.1% Calgon 용액에 넣고 초음파진동기와 자기진동기로 균일하게 분산시킨 후 자동입도분석기(Sedigraph 5000D)로 분석하였다. 입도 분석 결과는 컴퓨터를 이용하여 통계분석처리 하였으며, 퇴적상의 구분은 Folk(1968) 방법을 따랐다.

2. 중금속 분석(heavy metals)

표층퇴적물을 비닐봉지에 잘 밀봉한 후 Freeze dryer 내에서 냉동건조하여 agate mortar로 곱게 빻아 분말화한 후 퇴적물 화학분석을 실시하였다. 화학성분의 정량을 위한 시료 역시 유기탄소량이나 탄산염 함량을 정량할 때와 마찬가지로 분말화하여 준비했다. 분말화된 시료 약 0.2 g을 Teflon reaction vessel(semi-closed system)에 넣고 여기에 혼합산($\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4 = 4:4:1$) 5 ml를 넣어 180°C의 가열판에서 하룻밤 동안 반응시킨 다음, 산을 날려보내고 다시 혼합산 2 ml을 넣어 180°C의 가열판에서 하룻밤 동안 반응시켰다. 반응이 끝난 시료에 다시 과염소산 원액 1 ml을 넣어 180°C의 가열판상에서 건조시킨 후 남은 반응물을 1% HNO_3 로 녹여서 분석용 용액을 준비하였다. 이 용액에 용출된 각 원소는 기초과학지원연구소에 의뢰하여 유도결합 플라즈마 방출분광기(ICP-AES)를 이용하여 측정하였다.

분석방법에 따른 측정값의 객관적 검증을 위해 캐나다 NRC의 표준시료 BCSS-1 시료를 함께 분석함으로써 분석결과의 정확도를 평가하는 기준으로 삼았다.

제3절 진해·마산만의 표층퇴적물 특성

조사 정점은 마산항에서부터 마산만 입구, 그리고 진해만의 주 수로로 연결된다(그림 4.3.1, 4.3.2, 표 4.3.1, 4.3.2).

1. 표층퇴적물 분포

1996년도 표층퇴적물은 주로 silt와 clay 퇴적물로 구성되어 있고 사질

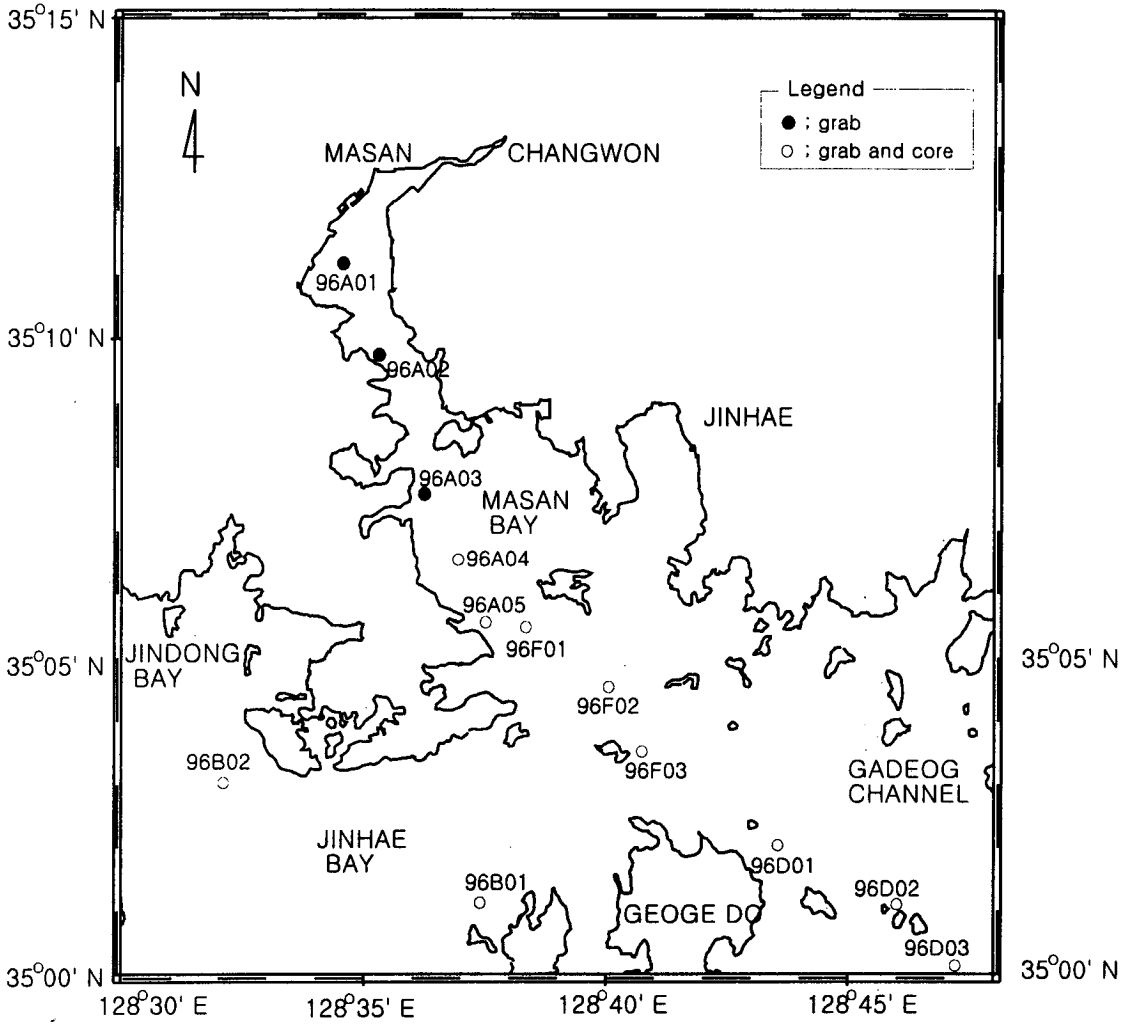


그림 4.3.1. 마산·진해만 해역에서 채취한 표층퇴적물 및 시추퇴적물의 정점도 (1996년)

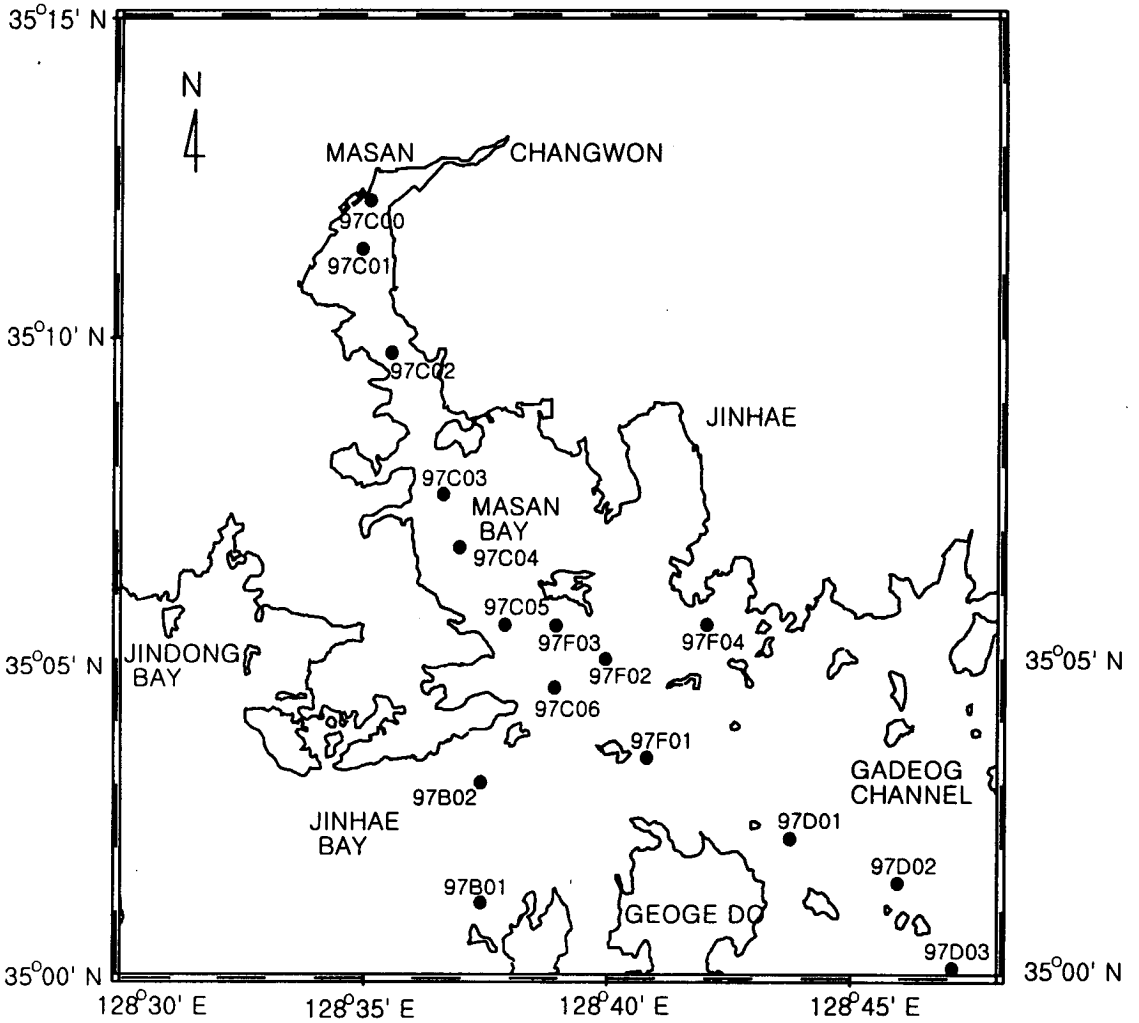


그림 4.3.2. 마산·진해만 해역에서 채취한 표층퇴적물의 정점도 (1997년)

표 4.3.1. 마산·진해만 해역에서 채취한 표층 및 시추퇴적물의 조사 정점(1996년)

Station	Latitude	Longitude	Instrument	Date
96A04	35 ° 06.692'	128 ° 36.905'	Core	96/8/6
96A05	35 ° 05.592'	128 ° 37.695'	Core	96/8/6
96B01	35 ° 02.132'	128 ° 37.382'	Core	96/8/7
96B02	35 ° 03.023'	128 ° 31.170'	Core	96/8/7
96D01	35 ° 02.287'	128 ° 43.640'	Core	96/8/8
96D02	35 ° 01.524'	128 ° 45.978'	Core	96/8/8
96D03	35 ° 00.217'	128 ° 47.146'	Core	96/8/8
96F01	35 ° 05.518'	128 ° 38.287'	Core	96/8/6
96F02	35 ° 04.564'	128 ° 40.060'	Core	96/8/6
96F03	35 ° 03.510'	128 ° 40.729'	Core	96/8/6
96A01	35 ° 11.266'	128 ° 34.666'	Grab	96/8/6
96A02	35 ° 09.743'	128 ° 35.270'	Grab	96/8/6
96A03	35 ° 07.640'	128 ° 36.316'	Grab	96/8/6
96A04	35 ° 06.684'	128 ° 36.872'	Grab	96/8/6
96A05	35 ° 05.569'	128 ° 37.618'	Grab	96/8/6
96B01	35 ° 02.100'	128 ° 37.321'	Grab	96/8/7
96B02	35 ° 03.063'	128 ° 31.133'	Grab	96/8/7
96D01	35 ° 02.287'	128 ° 43.645'	Grab	96/8/8
96D02	35 ° 01.520'	128 ° 45.995'	Grab	96/8/8
96D03	35 ° 00.211'	128 ° 47.116'	Grab	96/8/8
96F01	35 ° 05.559'	128 ° 38.310'	Grab	96/8/6
96F02	35 ° 04.603'	128 ° 40.054'	Grab	96/8/6
96F03	35 ° 03.510'	128 ° 40.691'	Grab	96/8/6

표 4.3.2. 마산·진해만 해역에서 채취한 표층퇴적물의 조사 정점 (1997년)

Station	Lat.	Long.	Instrument	Date
97B01	35 ° 02.129'	128 ° 37.320'	Grab	97/9/25
97B02	35 ° 02.998'	128 ° 37.400'	Grab	97/9/25
97C00	35 ° 12.228'	128 ° 35.093'	Grab	97/9/25
97C01	35 ° 11.394'	128 ° 34.981'	Grab	97/9/25
97C02	35 ° 09.736'	128 ° 35.547'	Grab	97/9/25
97C03	35 ° 07.627'	128 ° 36.652'	Grab	97/9/25
97C04	35 ° 04.507'	128 ° 36.906'	Grab	97/9/25
97C05	35 ° 02.998'	128 ° 37.938'	Grab	97/9/25
97C06	35 ° 04.507'	128 ° 38.787'	Grab	97/9/25
97D01	35 ° 02.241'	128 ° 43.722'	Grab	97/9/25
97D02	35 ° 01.456'	128 ° 45.982'	Grab	97/9/25
97D03	35 ° 00.164'	128 ° 47.130'	Grab	97/9/25
97F01	35 ° 03.421'	128 ° 40.784'	Grab	97/9/25
97F02	35 ° 04.493'	128 ° 39.973'	Grab	97/9/25
97F03	35 ° 05.484'	128 ° 38.243'	Grab	97/9/25
97F04	35 ° 05.543'	128 ° 42.132'	Grab	97/9/25

퇴적물은 대체적으로 10% 미만이다(그림 4.3.3, 표 4.3.3). 평균입도는 7.9 ϕ 에서 10 ϕ 까지 분포하고 퇴적물 종류는 빨질 퇴적물로 이루어져 있다. 본 연구지역의 분급은 불량하고(1.62-2.98 ϕ), 상대적으로 마산만 내 퇴적물이 가덕수로에 분포하는 퇴적물보다 분급이 양호한 편이다. 왜도는 -0.01 ϕ 에서 -0.51 ϕ 범위이고 첨도는 1.84 ϕ 에서 2.99 ϕ 범위이다.

1997년도 표층퇴적물은 역시 silt와 clay 퇴적물로 구성되어 있고 사질 퇴적물은 대체적으로 10% 미만이다(그림 4.3.4, 표 4.3.4). 평균입도는 6.7 ϕ 에서 9.87 ϕ 까지 분포하고 퇴적물 종류는 빨질 퇴적물로 이루어져 있다. 본 연구지역의 분급은 불량하고(1.41-2.68 ϕ), 상대적으로 마산만 내 퇴적물이 가덕수로에 분포하는 퇴적물보다 분급이 양호한 편이다. 왜도는 -0.26 ϕ 에서 2.57 ϕ 범위이고 첨도는 1.77 ϕ 에서 9.99 ϕ 까지 분포하고 있다.

2. 표층퇴적물 연변화

1996년과 1997년 마산만 내 표층퇴적물의 변화를 살펴보면(그림 4.3.5, 표 4.3.5), 만내 마산항(정점 M1)에서는 silt 함량은 1996년도에는 33.47%, 1997년도에는 87.94%로 급격히 증가하고 clay 함량은 상당히 감소하여서 평균입도가 8.73 ϕ 에서 6.73 ϕ 로 조립해졌다. 정점 M1을 제외하고는 마산만 내에서는 거의 변화가 없다. 가덕수로 내 표층퇴적물의 연변화를 살펴보면(표 4.3.5), 평균입도 및 구성비에서 거의 변화가 없다.

제4절 수직층서 연구

1. 시추퇴적물의 퇴적학적 특성

A04 시추퇴적물은 마산만 입구에서 획득하였으며, 획득된 시추퇴적물

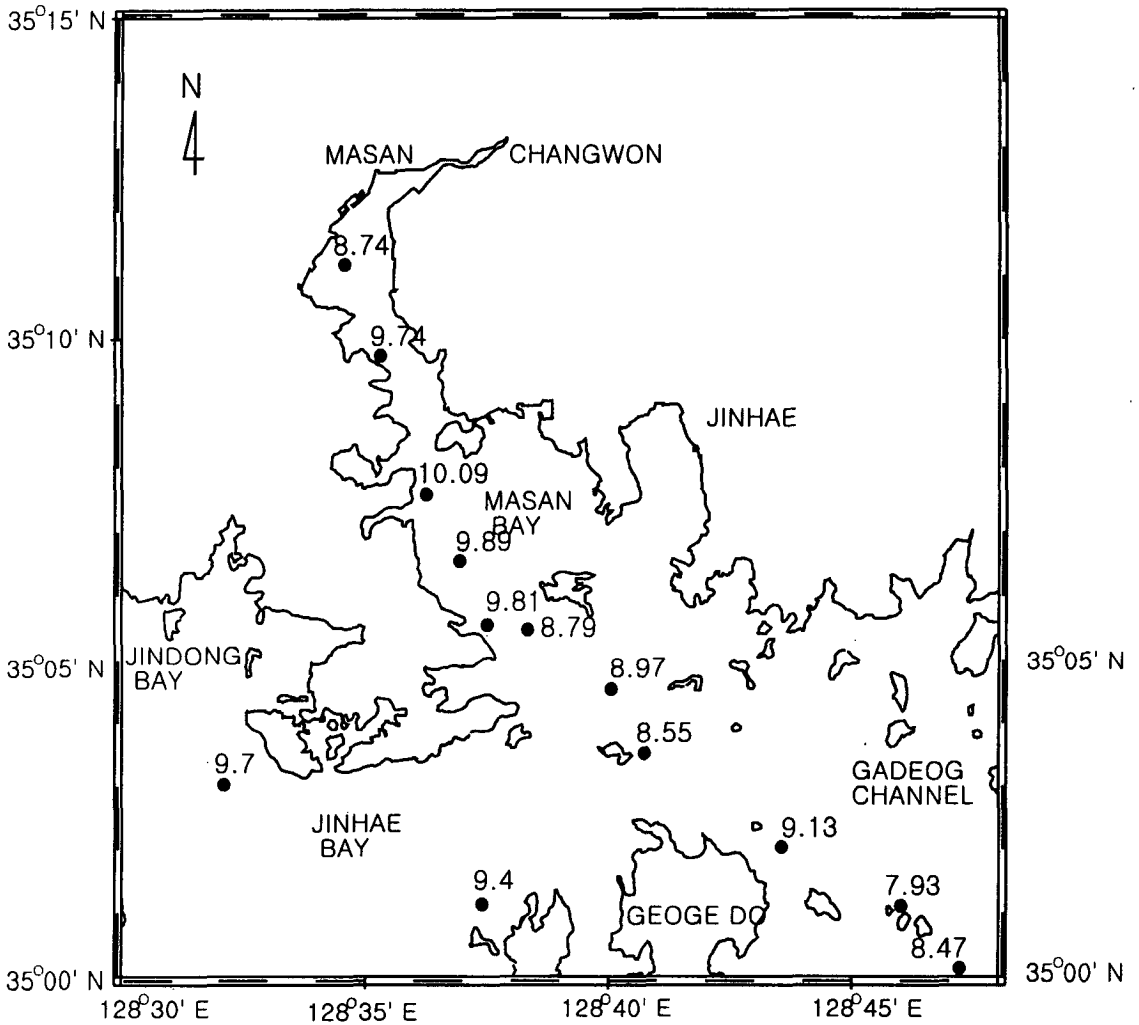


그림 4.3.3. 마산·진해만 해역의 표층퇴적물의 평균입도 (1996년)

표 4.3.3. 마산·진해만 해역에서의 표층퇴적물과 시추퇴적물의 특성 (1996년)

Sample No.	Composition				Sediment type	Statistical Parameters			
	Gravel	Sand	Silt	Clay		MZ(Phi)	St.De.	Skew.	Kurt.
A-1	0	0.74	33.47	65.79	M	8.74	1.62	-0.19	2.58
A-2	0	1.99	18.64	79.37	C	9.74	2.07	-0.51	2.72
A-3	0	0.23	14.04	85.73	C	10.09	1.79	-0.33	2.14
A-4	0	0	18.21	81.79	C	9.89	1.84	-0.18	1.89
A-5	0	0.49	24.8	74.71	C	9.81	2.08	-0.23	1.84
B-1	0	0.69	32.04	67.27	C	9.4	2.27	-0.15	1.81
B-2	0	0.2	23.65	76.15	C	9.7	2	-0.13	1.86
D-1	0	4.21	33.46	62.32	M	9.13	2.65	-0.32	2
D-2	0	17.31	29.66	53.03	sM	7.93	2.98	-0.39	2.15
D-3	0	10.7	32.47	56.83	sM	8.47	2.75	-0.3	2.17
F-1	0	0.7	37.21	62.09	M	8.79	1.92	0.13	2.32
F-2	0	1.11	34.55	64.35	M	8.97	2.1	-0.01	2.16
F-3	0	2.57	30.25	67.19	C	8.65	1.88	-0.38	2.99
A-4(0)	0	0	16.28	83.72	C	9.41	1.33	0.11	2.46
-10	0	0	16.56	83.44	C	9.52	1.5	0.22	2.31
-20	0	0	24.56	75.44	C	9.16	1.51	0.21	2.31
-40	0	0	22.06	77.94	C	9.29	1.47	0.13	2.16
-60	0	0	18.39	81.61	C	9.49	1.52	0.23	2.21
-80	0	0	22	78	C	9.53	1.71	0.15	1.93
A-5(0)	0	0	28.63	71.37	C	9.45	1.88	0.03	1.75
-10	0	0	24.02	75.98	C	9.57	1.76	-0.11	1.86
-20	0	0	22.53	77.47	C	9.67	1.8	-0.06	1.78
-40	0	0	34.08	65.92	M	8.94	1.67	0.34	2.2
-60	0	0	21.08	78.92	C	9.86	1.94	-0.15	1.71
-80	0	0	25	75	C	9.69	1.94	-0.05	1.68
B-1(0)	0	0	25.68	74.32	C	9.57	1.96	-0.15	1.91
-20	0	0	27.86	72.14	C	9.48	2.05	-0.04	1.82
-50	0	0	30	70	C	9.44	2.1	-0.05	1.77
-89	0	0	27.44	72.56	C	9.61	2.1	-0.13	1.76
B-2(0)	0	0	25.04	74.96	C	9.54	1.89	0.05	1.84
-20	0	0	17.92	82.08	C	10.11	1.94	-0.28	1.7
-40	0	0	16.45	83.55	C	10.2	1.88	-0.29	1.68
-50	0	0	21.13	78.87	C	9.96	2.01	-0.21	1.69
-60	0	0	16.12	83.88	C	10.16	1.88	-0.25	1.68
-80	0	0	17.86	82.14	C	10.06	1.94	-0.3	1.85
-88	0	0	19.45	80.55	C	10.02	2.01	-0.35	1.92
D-1(0)	0	0.78	25.31	73.92	C	9.68	2.13	-0.26	1.99
-20	0	0	23.8	76.2	C	9.77	2.06	-0.18	1.77
-40	0	0.33	22.91	76.76	C	9.7	2.02	-0.21	2
-60	0	0.5	25.93	73.56	C	9.58	2.14	-0.27	2.08
-80	0	0.4	25.12	74.48	C	9.72	2.2	-0.35	2.01
-90	0	0	24.89	75.11	C	9.81	2.14	-0.24	1.7

표 4.3.3. 계속

Sample No.	Composition				Sediment type	Statistical Parameters			
	Gravel	Sand	Silt	Clay		MZ(Phi)	St.De.	Skew.	Kurt.
D-2(0)	0	1	28.6	70.4	C	9.54	2.3	-0.26	1.9
-10	0	1.39	30.6	68.01	C	9.37	2.3	-0.24	1.95
-20	0	1.48	23.49	75.04	C	9.79	2.21	-0.43	2.18
-40	0	1.58	26.6	71.82	C	9.57	2.24	-0.36	2.14
-60	0	2.1	26.48	71.43	C	9.47	2.27	-0.37	2.33
-80	0	2.24	40.21	57.55	M	8.78	2.54	-0.04	1.81
F-1(0)	0	0	30.99	69.01	C	9.53	2.15	-0.05	1.6
-20	0	0	23.72	76.28	C	9.83	2.03	-0.17	1.69
-47	0	0	28.9	71.1	C	9.54	2.03	-0.04	1.72
-70	0	0	29.97	70.03	C	9.54	2.21	-0.12	1.68
-84	0	0	29.5	70.5	C	9.61	2.18	-0.16	1.67
F-2(0)	0	1.39	34.67	63.94	M	9.09	2.24	-0.09	2.04
-10	0	1.05	29.67	69.28	C	9.32	2.17	-0.14	2.06
-20	0	0.5	27.35	72.15	C	9.6	2.17	-0.2	1.87
-40	0	1.45	27.62	70.93	C	9.53	2.3	-0.3	2.02
-60	0	1.18	28.74	70.08	C	9.42	2.26	-0.26	2.07
-80	0	2.08	24.79	73.13	C	9.74	2.28	-0.45	2.28
F-3(0)	0	0.85	27.97	71.19	C	9.57	2.17	-0.19	1.9
-20	0	0.56	27.92	71.52	C	9.62	2.24	-0.25	1.88
-40	0	0.45	24.92	74.64	C	9.72	2.07	-0.19	1.87
-60	0	0.6	26.37	73.03	C	9.64	2.15	-0.2	1.87
-80	0	0	24.54	75.46	C	9.71	1.97	-0.04	1.68
-89	0	0	22.05	77.95	C	9.98	2.02	-0.22	1.61

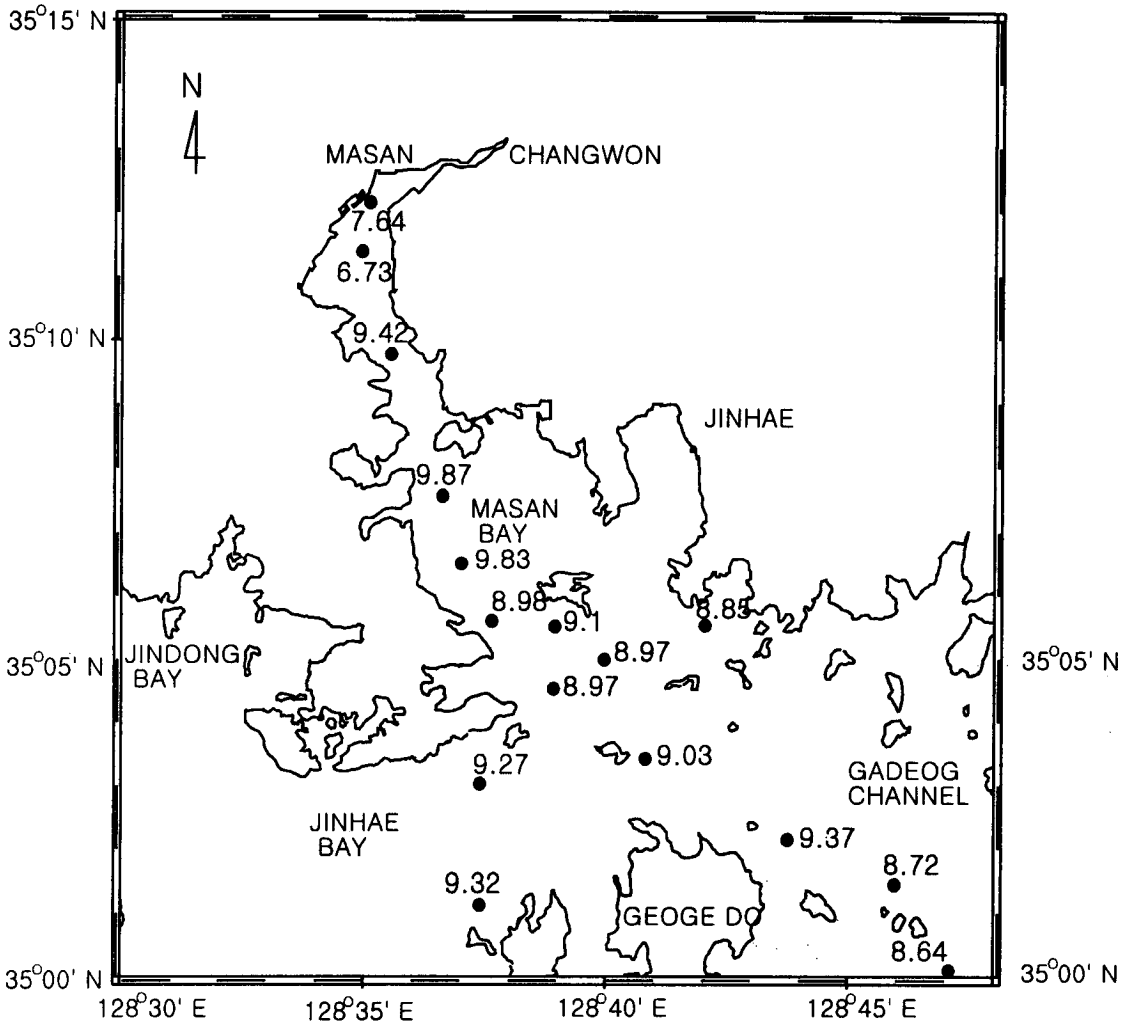


그림 4.3.4. 마산·진해만 해역의 표층퇴적물의 평균입도 (1997년)

표 4.3.4. 마산·진해만 해역에서의 표층퇴적물의 특성 (1997년)

Sample No.	Composition(%)				Sediment type	Statistical Parameters			
	Gravel	Sand	silt	Clay		Mz(phi)	St. De.	Skew.	Kurt.
97B01	0	1.4	29.67	68.93	M	9.32	2.24	-0.2	2.2
97B02	0	0.3	31.97	67.73	M	9.27	2.17	-0.03	1.99
97C00	0	12.11	45.46	42.42	sM	7.64	2.55	0.12	2.24
97C01	0	0.39	87.94	11.67	M	6.73	1.41	2.57	9.99
97C02	0	1.85	21.72	76.43	M	9.42	2.07	-0.61	4.4
97C03	0	0	17.56	82.44	M	9.87	1.86	-0.25	2.14
97C04	0	0	18.56	81.42	M	9.83	1.79	-0.01	1.77
97C05	0	0	34.9	65.1	M	9.23	2.17	0.01	1.78
97C06	0	1.08	36.62	62.3	M	8.98	2.29	-0.06	2.06
97D01	0	0	30.63	69.37	M	9.37	2.13	-0.12	1.91
97D02	0	8.39	31.85	59.76	M	8.72	2.68	-0.26	2.11
97D03	0	8.57	33.29	58.14	M	8.64	2.83	-0.22	1.96
97F01	0	1.58	36.2	62.23	M	9.03	2.41	-0.19	2.31
97F02	0	1.35	35.34	63.3	M	8.97	2.28	-0.17	2.41
97F03	0	2.13	32.27	65.6	M	9.1	2.36	-0.22	2.3
97F04	1.08	5.14	30.77	62.02	(g)M	8.85	2.91	-0.83	4.03

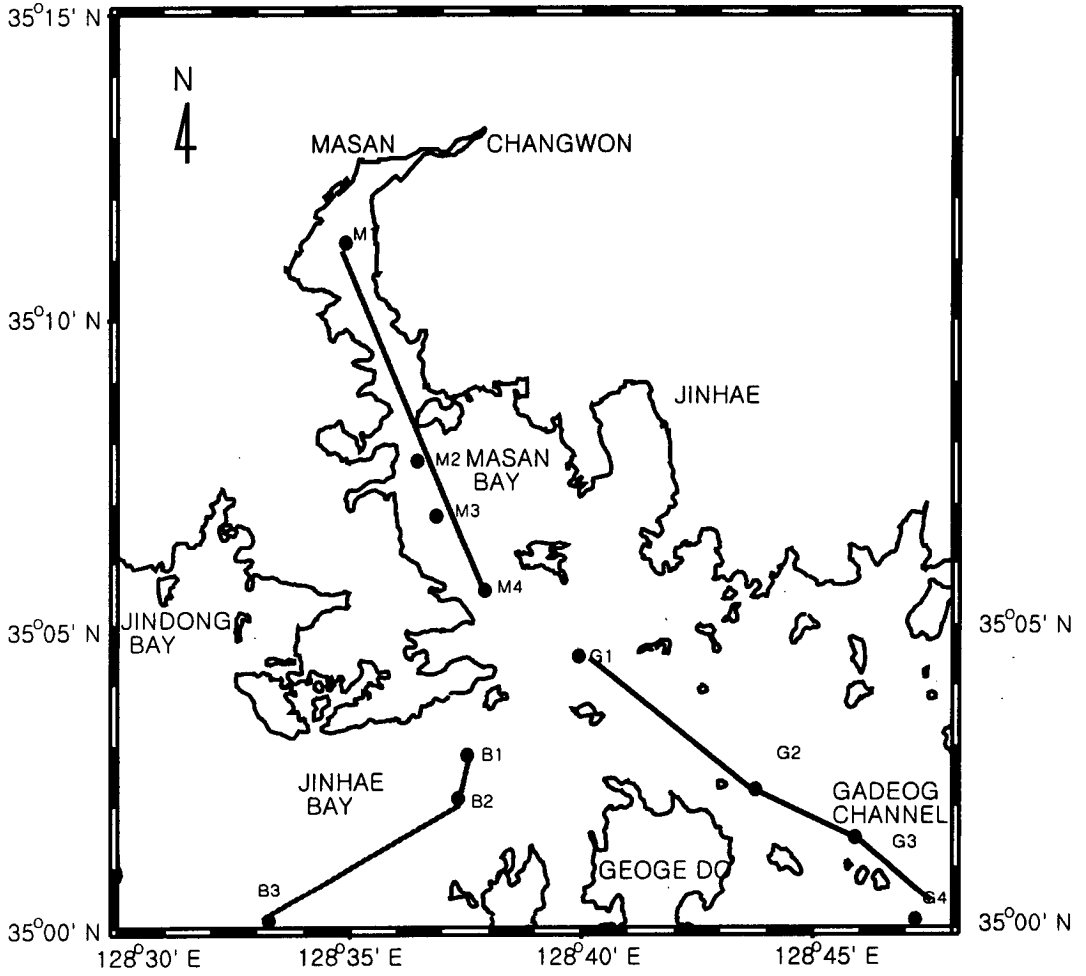


그림 4.3.5. 1996년, 1997년 표층퇴적물 및 중금속 비교 정점도

표 4.3.5. 1996년, 1997년 표층퇴적물의 변화

Station	Gravel	Sand	Silt	Clay	Mz
96M1	0	0.74	33.47	65.79	8.74
97M1	0	0.39	87.94	11.67	6.73
96M2	0	0.23	14.04	85.73	10.09
97M2	0	0	17.56	82.44	9.87
96M3	0	0	18.21	81.79	9.89
97M3	0	0	18.56	81.42	9.83
96M4	0	0.49	24.8	74.71	9.81
97M4	0	2.13	32.27	65.6	9.1
96G1	0	1.11	34.55	64.35	8.97
97G1	0	1.35	35.34	63.3	8.97
96G2	0	4.21	33.46	62.32	9.13
97G2	0	0	30.63	69.37	9.37
96G3	0	17.31	29.66	53.03	7.93
97G3	0	8.39	31.85	59.76	8.72
96G4	0	10.7	32.47	56.83	8.47
97G4	0	8.57	33.29	58.14	8.64

의 길이는 80 cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 니질 퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 실트 16.28 %, 점토 83.72 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 9.16 ϕ 에서 9.53 ϕ 로 표층에서 20cm까지 조립해지다가, 20cm에서부터 하부로 갈수록 세립해진다. A05 시추퇴적물은 마산만 입구에서 획득하였으며, 시추퇴적물의 길이는 80cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 뿔퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 실트 28.63 %, 점토 71.37 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 8.9 ϕ 에서 9.9 ϕ 로 표층에서 30 cm까지 갈수록 세립해지고 40 cm에서 조립해진다. 40 cm 하부에서는 뚜렷한 경향은 갖지 않는다. B01 시추퇴적물은 진해만에서 획득하였으며, 획득된 시추퇴적물의 길이는 89 cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 뿔퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 실트 25.68 %, 점토 74.32 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 9.4 ϕ 에서 9.6 ϕ 로 전체적으로 세립하다. B02 시추퇴적물은 진해만에서 획득하였으며, 시추퇴적물의 길이는 88 cm이다(그림 4.3.1 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 뿔퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 실트 25.04 %, 점토 74.69 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 9.5 ϕ 에서 10.2 ϕ 로 아주 세립하다. D02 시추퇴적물은 가덕수로내에서 획득하였으며, 획득된 시추퇴적물의 길이는 90 cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 뿔퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 모래 0.78 %, 실트 25.31 %, 점토 73.92 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 9.6 ϕ 에서 9.81 ϕ 로 전체적으로 세립하다. D02 시추퇴적물은 가덕수로 내에서 획득하였으며, 획득된 시추퇴적물의 길이는 80 cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 뿔퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 모래 1 %, 실트 28.6 %, 점토 70.4 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 8.78 ϕ 에서 9.79 ϕ 로 표층에서 20 cm 구간

에서는 별 경향이 없고 20 cm에서 하부로 갈수록 조립해진다. F01 시추퇴적물은 마산만 입구에 위치하는 둔덕부근에서 획득하였으며, 획득된 시추퇴적물의 길이는 84 cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 빨퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 실트 30.99 %, 점토 69.01 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 9.53 ϕ 에서 9.83 ϕ 로 별 경향없이 세립하다. F02 시추퇴적물은 마산만 입구에 위치하는 둔덕부근에서 획득하였으며, 획득된 시추퇴적물의 길이는 80 cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 빨퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 실트 30.99 %, 점토 69.01 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 9.09 ϕ 에서 9.74 ϕ 로 표층에서 20 cm 구간까지는 세립해지고 20 cm에서 60 cm 구간까지는 조립해진다. 다시 80 cm 구간까지 세립해진다. F03 시추퇴적물은 가덕수로 내에서 획득하였으며, 획득된 시추퇴적물의 길이는 89 cm이다(그림 4.3.1, 표 4.3.1). 시추퇴적물은 전체적으로 빨퇴적물(mud)로 구성되어 있으며, 표층에서는 모래 0.85 %, 실트 27.97 %, 점토 71.19 %로 구성되어 있다(표 4.3.3). 시추퇴적물의 평균입도는 9.57 ϕ 에서 9.98 ϕ 로 하부로 갈수록 세립해진다.

제5절 퇴적물의 중금속 오염

1. 오염퇴적물의 특성과 분포

마산만과 진해만의 퇴적물내에 포함된 중금속에 대한 연구는 1970년대 부터 꾸준히 진행되어 왔다(Hong, et al., 1983; Kim, et al., 1993; KORDI, 1989; KORDI, 1993; Lee and Lee, 1983). 이러한 연구 결과는 지화학적으로 마산만이 중금속 오염의 공급지임이 밝혀졌지만, 퇴적학적으로 왜 이러한 결과를 초래했는지, 또는 수평적으로 어느 정도 오염이 되었는지에 대한

연구는 미비한 상태이다. 본 연구에서는 수평적인 오염의 정도를 밝히고, 중금속오염에 대한 기작에 대해서 밝히고자 한다.

표층퇴적물에 포함된 중금속의 수평적인 분포양상을 밝히기 위해서 퇴적물 시료들을 기초과학연구소의 동위원소그룹에서 의뢰하여 분석하였다. 분석된 중금속들은 Al, As, V, Ni, Co, Mn, Cr, Zn, Pb, Cu, 그리고 Fe 들이다.

1996년 8월에 연구지역에 분포하는 중금속 함량은 그림 4.5.1과 표 4.5.1에 나타내었다. Al 함량은 마산만 입구에서 9.04 %에서 9.51%로 상대적으로 높은 함량을 보이고 있고 마산만내에서 최저함량 2.75 %이다. 가덕수로 내에서는 5.67 %에서 9.3 % 함량이 분포한다. As 함량은 정점 A05를 제외하고는 마산항에서 가덕수로 까지 18.1 ppm에서 10.1 ppm까지 감소하고, 가덕수로에서는 8.2 ppm에서 13.6 ppm의 분포를 보이고 있다. Cd 함량은 정점 A01에서는 0.3 ppm이지만 마산만 내 2.6 ppm, 가덕수로 입구 0.2 ppm으로 점차 감소한다. 마산만 내 Co 함량은 14 ppm에서 16 ppm까지 분포하고, 마산만과 가덕수로 사이에서는 15 ppm과 13 ppm이며, 가덕수로 내에서는 15 ppm에서 13 ppm으로 감소한다. Cr 함량은 마산만 내에서 54 ppm에서 84 ppm까지 다양한 함량 분포가 나타나고, 마산만 입구에서 가덕수로 사이 78 ppm, 가덕수로 입구는 24 ppm으로 감소한다. Cu 함량은 정점 A01에서의 함량 24 ppm을 제외하고 64 ppm에서 마산만 입구까지 15 ppm으로 감소하고 가덕수로와 마산만 사이에서는 17 ppm, 가덕수로 입구는 7 ppm으로 감소한다. Fe 함량은 마산만에서는 별 경향없이 마산항에서 최저농도인 1.68 ppm, 마산만 입구는 최고농도인 4.33 ppm이다. 그러나 마산만과 가덕수로 사이에서부터 가덕수로 입구까지 4.33 ppm에서 2.63 ppm으로 감소한다. Mn 함량은 마산만에서는 별 경향없이 마산항에서 최저농도인 413 ppm, 마산만 입구는 최고농도인 848 ppm이다. 그러나 진해만 중 마산만과 가덕수로 사이에서부터 가덕수로 입구까지 1004 ppm에서 803

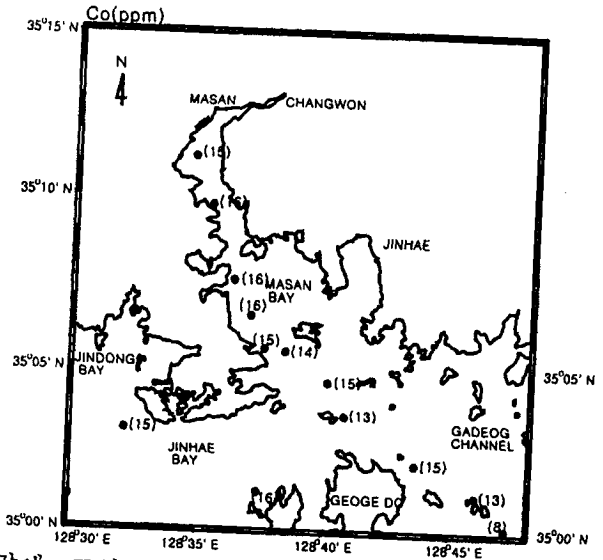
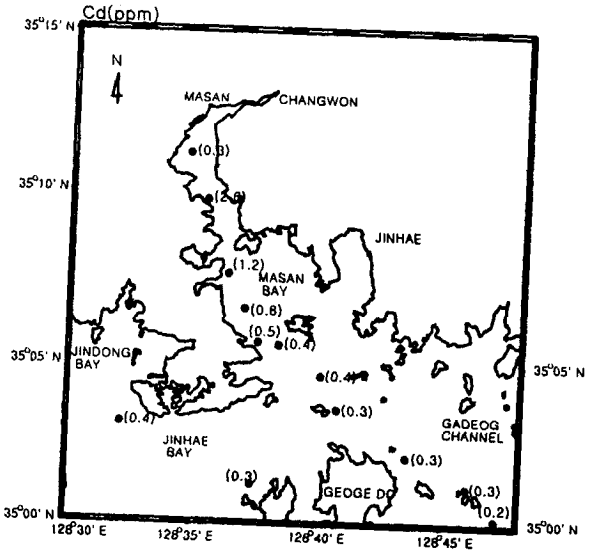
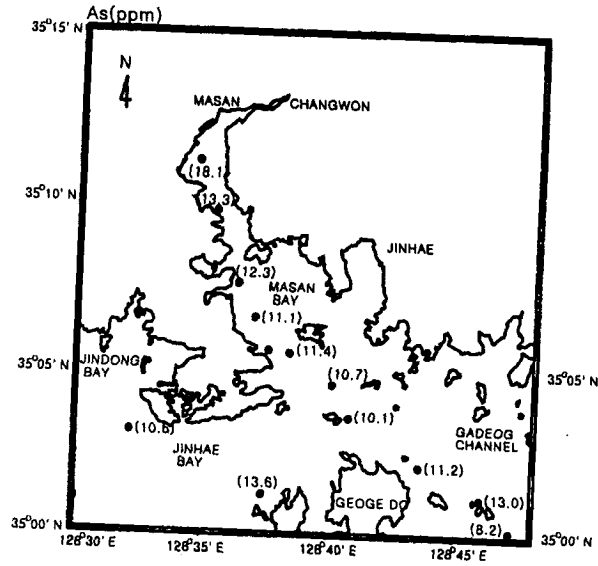
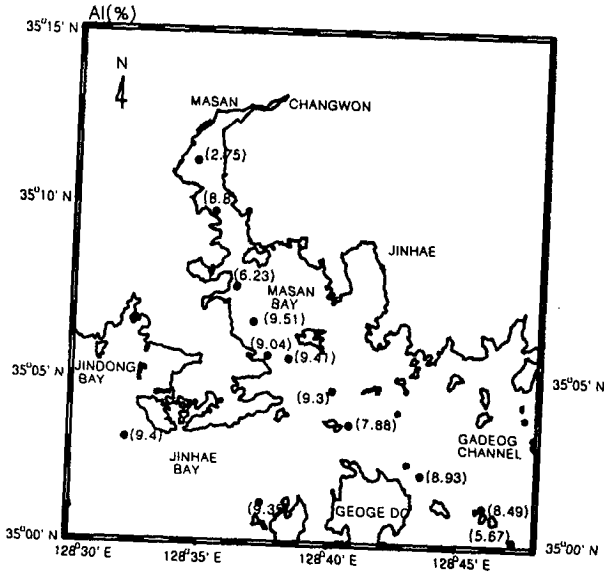


그림 4.5.1. 마산·진해만 해역 표층퇴적물 함량에 포함된 중금속 함량(1996년)

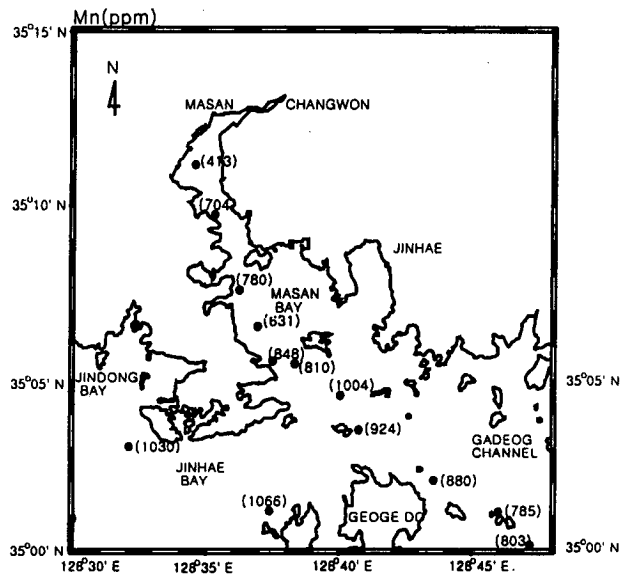
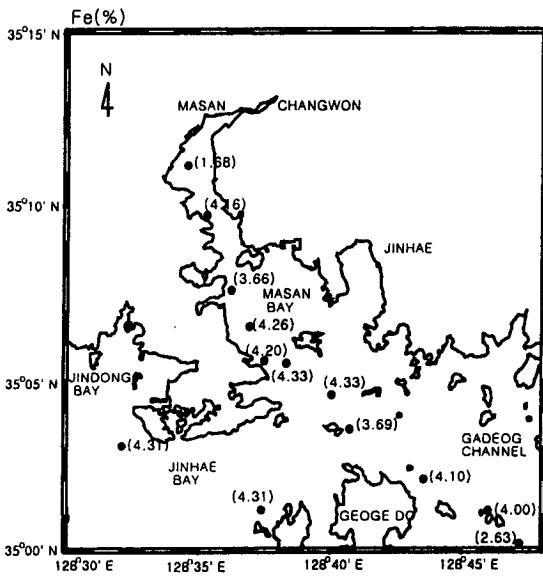
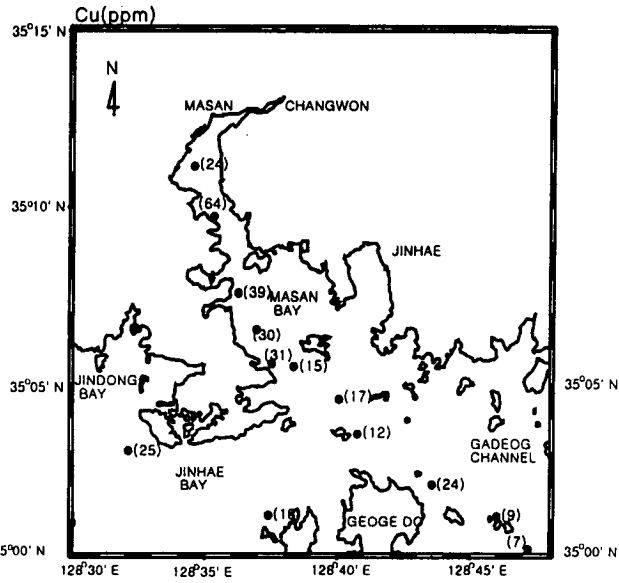
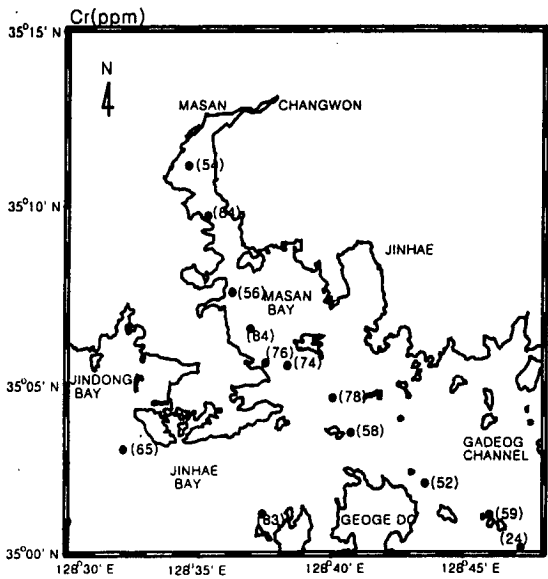


그림 4.5.1. 계속

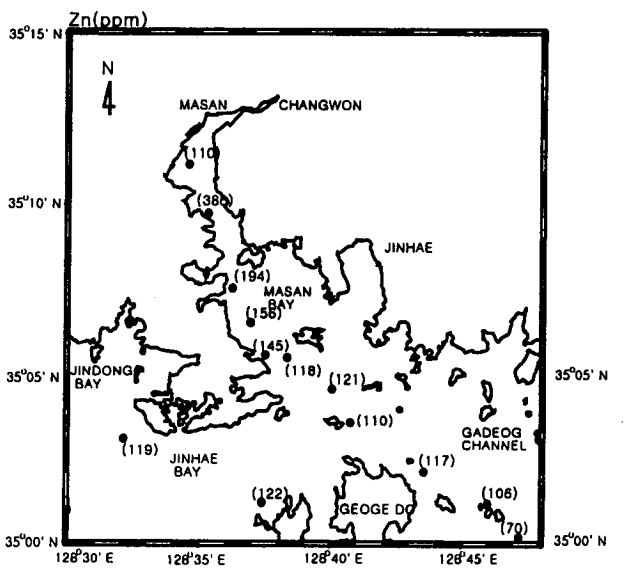
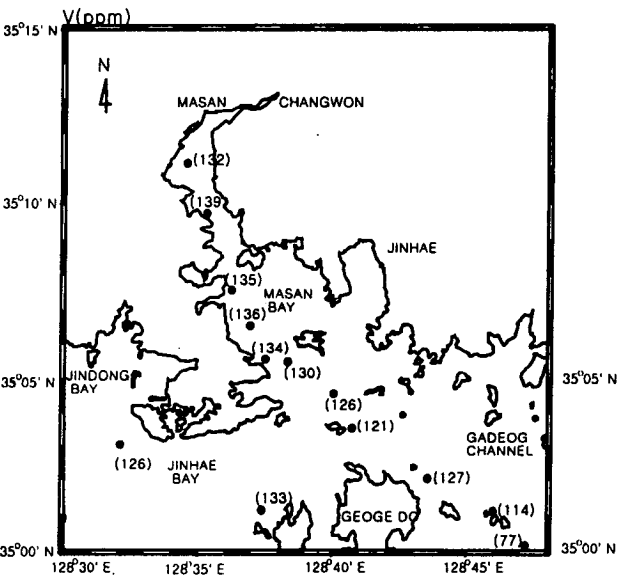
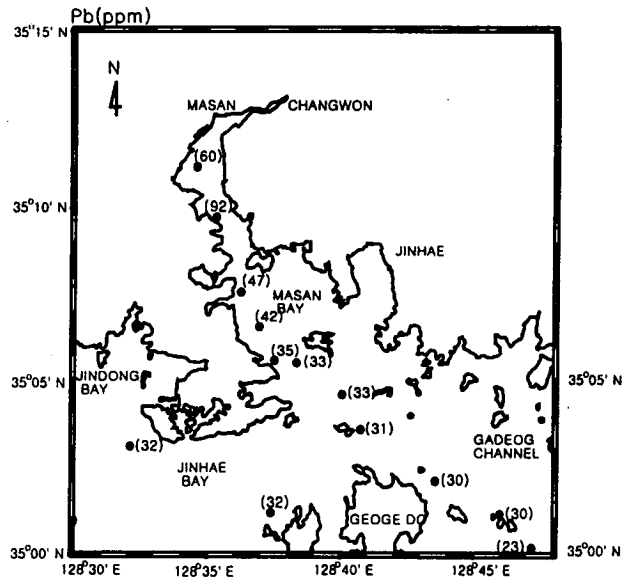
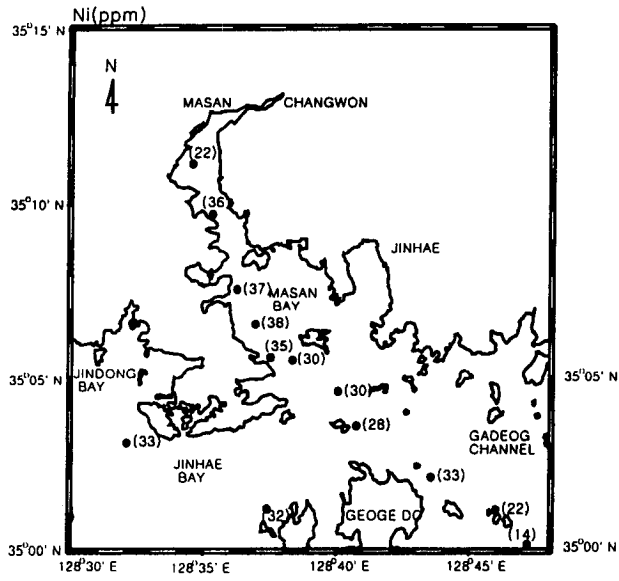


그림 4.5.1. 계속

표 4.5.1. 마산·진해만 해역 표층퇴적물에 포함된 중금속 함량 (1996년)

station	Al(%)	Fe(%)	Mn(ppm)	V(ppm)	Cr(ppm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)	Zn(ppm)	Cd(ppm)	Pb(ppm)	As(ppm)
96JG-A01	2.75	1.68	413	132	54	15	22	24	110	0.3	60	18.1
96JG-A02	8.8	4.16	704	139	84	16	36	64	386	2.6	92	13.3
96JG-A03	6.23	3.66	780	135	56	16	37	39	194	1.2	47	12.3
96JG-A04	9.51	4.26	631	136	84	16	38	30	156	0.8	42	11.1
96JG-A05	9.04	4.2	848	134	76	15	35	31	145	0.5	35	19
96JG-B01	9.35	4.31	1066	133	83	16	32	18	122	0.3	33	13.6
96JG-B02	9.4	4.31	1030	126	65	15	33	25	119	0.4	32	10.6
96JG-D01	8.93	4.1	880	127	52	15	33	24	117	0.3	30	11.2
96JG-D02	8.49	4	785	114	59	13	22	9	106	0.3	30	13
96JG-D03	5.67	2.63	803	77	24	8	14	7	70	0.2	23	8.2
96JG-F01	9.41	4.33	810	130	74	14	30	15	118	0.4	33	11.4
96JG-F02	9.3	4.33	1004	126	78	15	30	17	121	0.4	33	10.7
96JG-F03	7.88	3.69	924	121	58	13	28	12	110	0.3	31	10.1

ppm으로 감소한다. Mn 함량은 마산만보다 진해만에서 상대적으로 높다. Ni 함량은 마산항에서 22 ppm, 마산만 입구에서 38 ppm으로 점차 높아지며, 마산만 입구와 가덕수로 사이에서는 38 ppm에서 28 ppm으로 감소한다. 그리고 가덕수로에서는 14 ppm까지 다시 감소한다. Pb 함량은 마산항에서 60 ppm에서 가덕수로 입구까지 23 ppm으로 감소한다. V 함량은 마산만 내인 정점 A02에서 139 ppm에서 가덕수로 입구까지 77 ppm으로 점차 감소한다. Zn 함량은 마산만에서는 정점 A01에서의 농도 110 ppm을 제외하고는 마산만 내에서 386 ppm에서 마산만 입구까지 118 ppm으로 감소하고, 마산만과 가덕수로 사이에서부터 가덕도 입구까지 121 ppm에서 70ppm으로 점차 감소한다.

1997년 9월에 연구지역에 분포하는 중금속 함량은 그림 4.5.2와 표 4.5.2에 나타내었다. Al 함량은 마산만 최상부 내만에서 9.4 %, 마산만 내만에서 마산만 입구까지는 6.8 %에서 8.5 %의 범위이다. 마산만 입구에 위치하는 높은 둔덕부근의 정점들에서는 7.8 %에서 8.4%의 분포를 보이고 가덕수로에서 6.0 %에서 8.8 %의 범위를 보이고 있다. As 함량은 마산만항에서 최고농도인 7.4 ppm이며 마산만 입구까지 5.4 ppm에서 6.7 ppm이다. 마산만 입구에서 가덕수로 내까지 5.4 ppm에서 6.3 ppm으로 증가하는 경향을 보이고 있다. Cd 함량은 마산만 항에서 최고농도인 2.3 ppm이며 마산만 입구까지 0.3 ppm으로 감소한다. 마산만 입구에서 가덕수로 내까지는 0.1 ppm에서 0.3 ppm으로 마산만 내 Cd 함량과 상당한 차이를 보이고 있다. Co 함량은 마산만에서 13 ppm에서 14ppm, 마산만 입구에 위치하는 높은 둔덕부근에서 14 ppm에서 15ppm, 가덕수로 내에서 14 ppm에서 16 ppm이다. Cr 함량은 마산만 내 72 ppm에서 마산만 입구까지 49 ppm으로 감소하는 경향을 보이며, 마산만 입구에 위치하는 둔덕에서 49 ppm에서 62 ppm이며 가덕수로 내에서는 48 ppm에서 66 ppm의 범위로 증가하는 경향을 보인다. Cu 함량은 마산만 최상부에서 92 ppm이며 마산만 입구까지 36

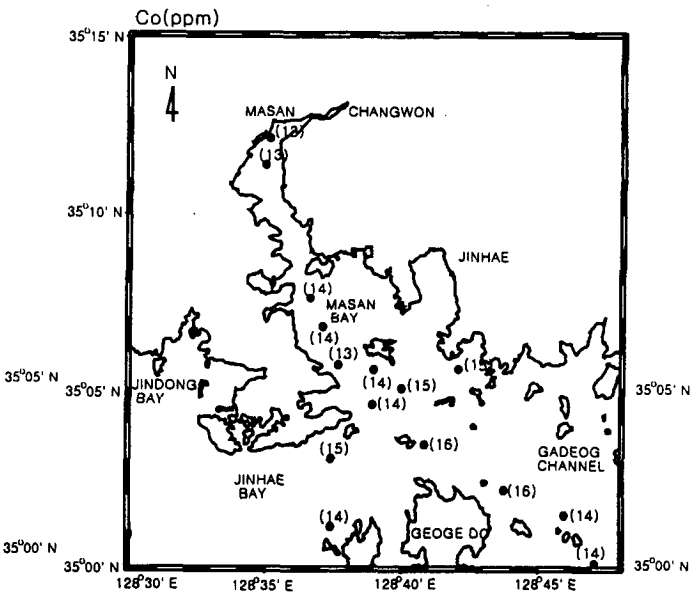
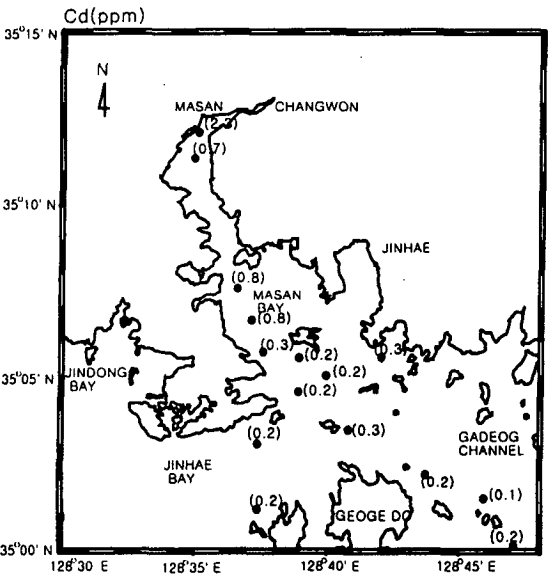
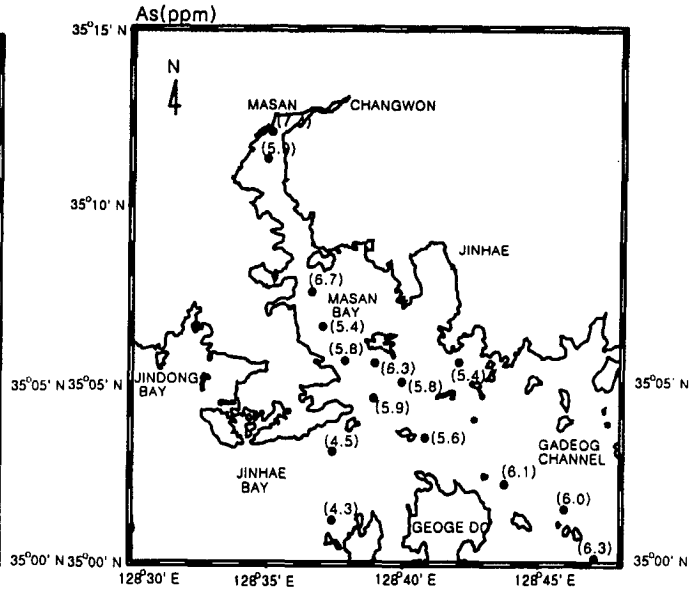
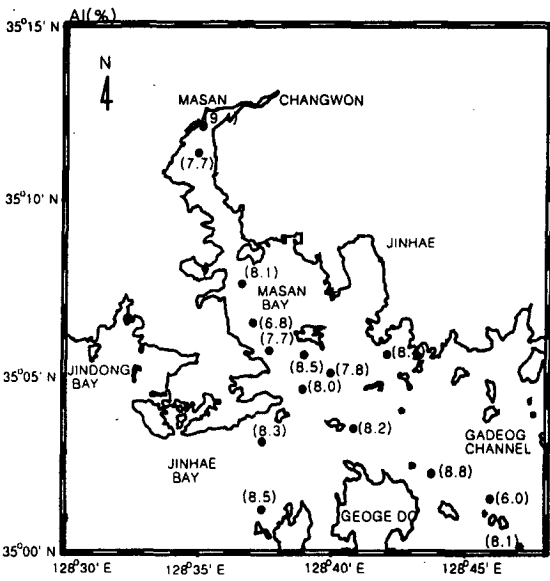


그림 4.5.2. 마산·진해만 해역 표층퇴적물 함량에 포함된 중금속 함량(1997년)

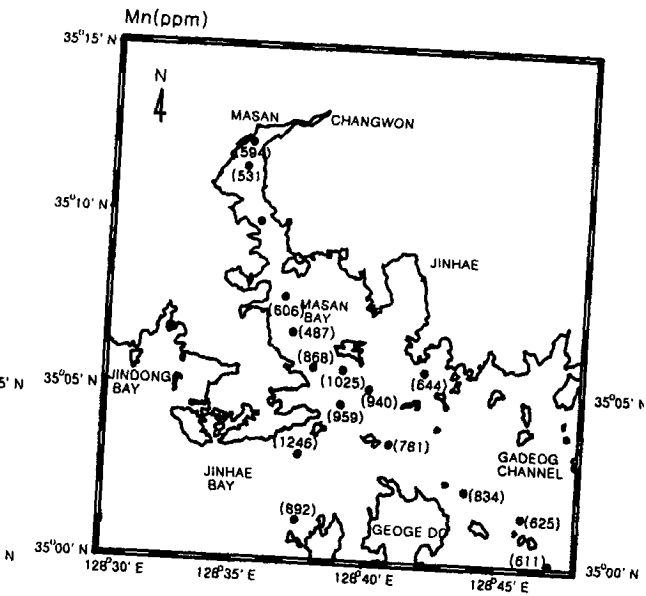
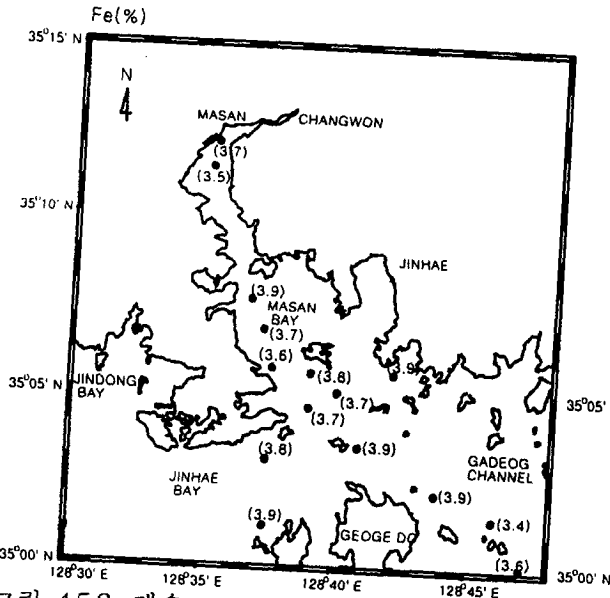
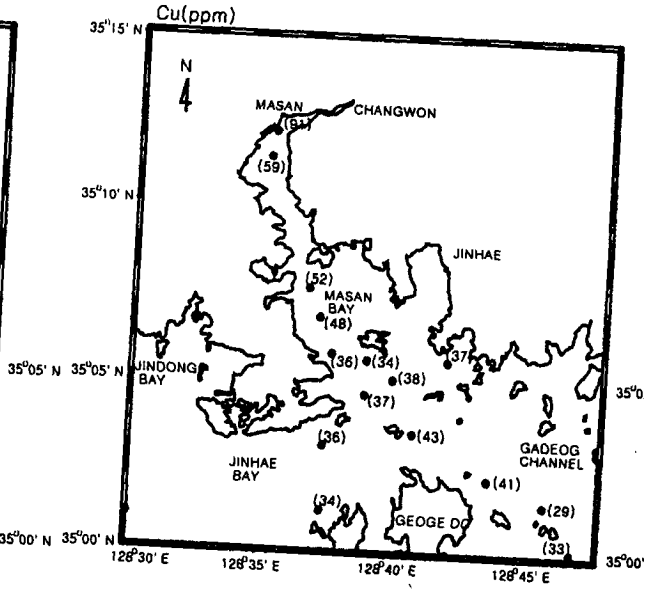
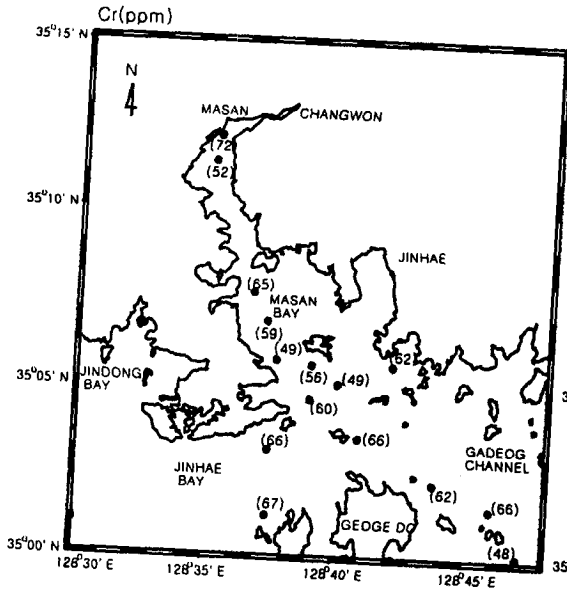


그림 4.5.2. 계속

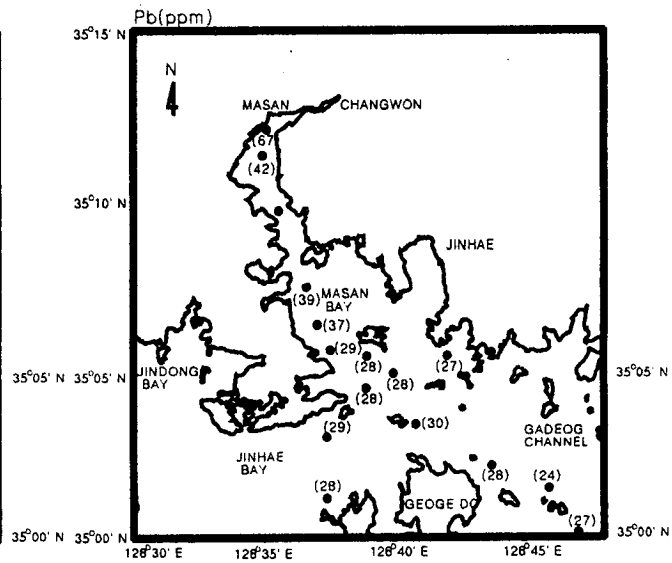
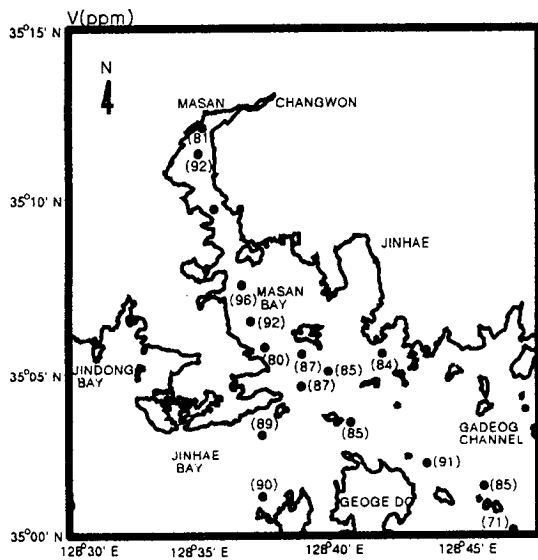
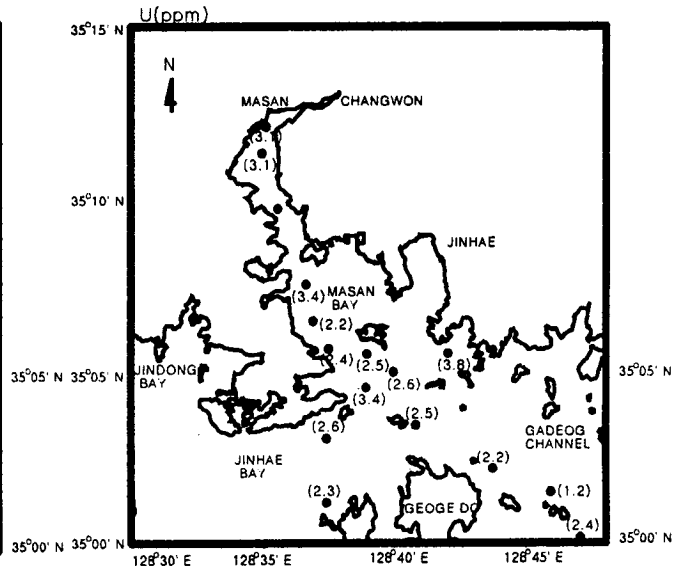
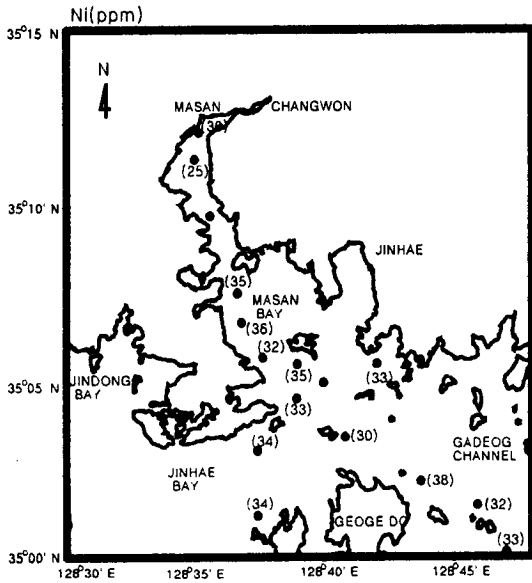


그림 4.5.2. 계속

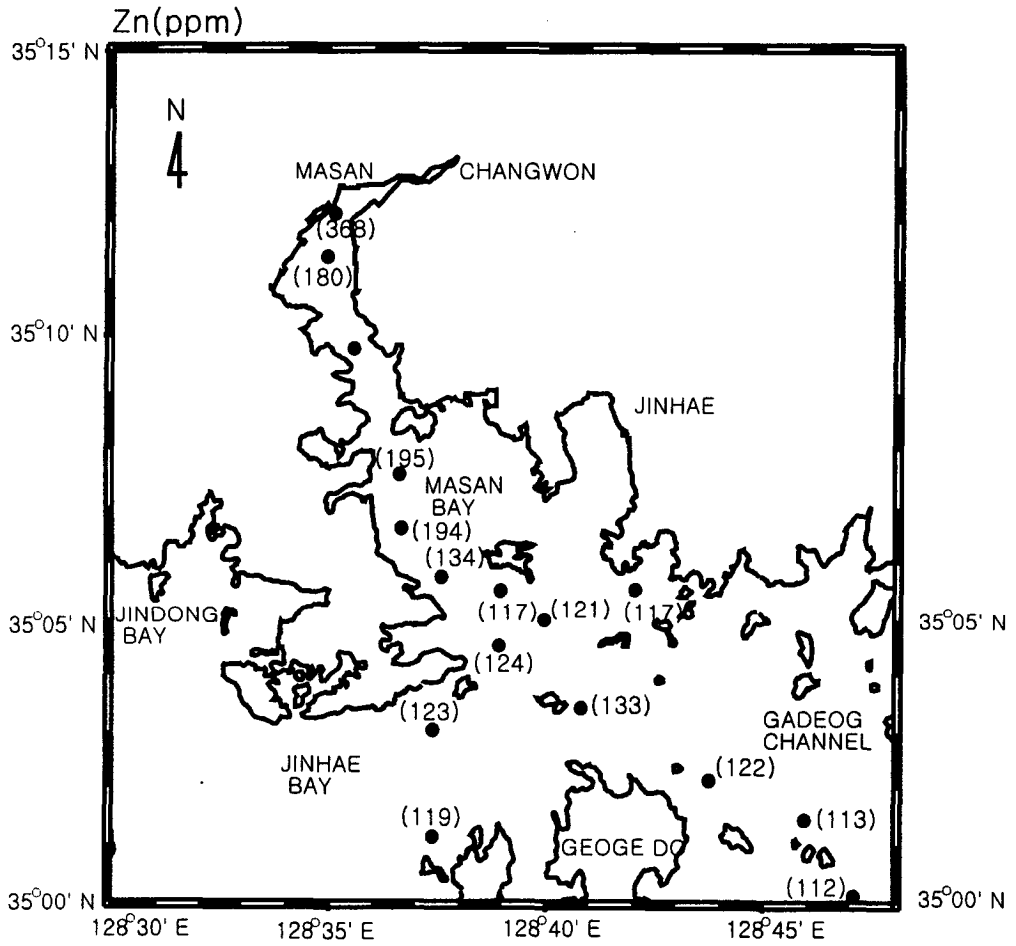


그림 4.5.2. 계속

표 4.5.2. 마산·진해만 해역 표층퇴적물에 포함된 중금속 함량 (1997년)

Station	Al(%)	Fe(%)	Mn(ppm)	V(ppm)	Cr(ppm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)	Zn(ppm)	Cd(ppm)	Pb(ppm)	U(ppm)	As(ppm)
97B01	8.5	3.9	892	90	67	14	34	34	119	0.2	28	2.3	4.3
97B02	8.3	3.8	1246	89	66	15	34	36	123	0.2	29	2.6	4.5
97C00	9.4	3.7	594	81	72	13	30	91	368	2.3	67	3.1	7.4
97C01	7.7	3.5	531	92	52	13	25	59	180	0.7	42	3.1	5.9
97C02	8.1	3.9	606	96	65	14	35	52	195	0.8	39	3.4	6.7
97C04	6.8	3.7	487	92	59	14	36	48	194	0.8	37	2.2	5.4
97C05	7.7	3.6	868	80	49	13	32	36	134	0.3	29	2.4	5.8
97C06	8	3.7	959	87	60	14	33	37	124	0.2	28	3.4	5.9
97D01	8.8	3.9	834	91	62	16	38	41	122	0.2	28	2.2	6.1
97D02	6.0	3.4	625	85	66	14	32	29	113	0.1	24	1.2	6.0
97D03	8.1	3.6	611	71	48	14	33	33	112	0.2	27	2.4	6.3
97F01	8.2	3.9	781	85	66	16	37	43	133	0.3	30	2.5	5.6
97F02	7.8	3.7	940	85	49	15	35	38	121	0.2	28	2.6	5.8
97F03	8.5	3.8	1025	87	56	14	35	34	117	0.2	28	2.5	6.3
97F04	8.4	3.9	644	84	62	15	33	37	117	0.3	27	3.8	5.4

ppm으로 감소하고, 마산만 입구에 위치하는 둔덕부근에서는 34 ppm에서 38 ppm이다. 가덕수로 내에서는 43 ppm에서 33ppm으로 감소한다. Fe 함량은 마산만 내에서는 3.5 %에서 3.9 % 함량 분포를 보이고 있으며, 마산만 입구에 위치하는 둔덕부근에서는 3.7 %에서 3.9 %이다. 가덕수로 내 3.4 %에서 3.9 %이다. Mn 함량은 마산만 내에서는 487 ppm에서 868 ppm 함량 범위이고, 마산만 입구에 위치하는 둔덕부근에는 644 ppm에서 1025 ppm이다. 가덕수로 내에서는 611 ppm에서 834 ppm이다. 둔덕 부근에서 Mn 함량이 마산만 내와 가덕수로 내보다 높은 함량 분포를 보이고 있다. Ni 함량은 25 ppm에서 38 ppm으로 전체적으로 비슷한 함량 분포를 보이고 있다. Pb 함량은 마산만 항에서 67 ppm부터 마산만 입구까지 29 ppm으로 감소한다. 마산만 입구에 위치하는 둔덕 부근에서는 27 ppm에서 28 ppm이고, 가덕수로 내에서는 24 ppm에서 30 ppm이다. U 함량은 별 경향 없이 마산만에서는 2.2 ppm에서 3.4 ppm까지 분포하고 마산만 입구에 위치하는 둔덕 부근에서는 2.5 ppm에서 3.8 ppm이다. 가덕수로 내에서는 1.2 ppm에서 2.5 ppm까지 상대적으로 낮은 함량이 분포한다. V 함량은 마산만 내에서는 80 ppm에서 90 ppm까지 분포하고 마산만 입구에 위치하는 둔덕 부근에서는 84 ppm에서 85 ppm까지 분포한다. 가덕수로 내에서는 71 ppm에서 91 ppm까지 분포한다. Zn 함량은 마산만 내에서는 마산만 항에서 최고함량인 368 ppm, 마산만 입구에서 최저함량 134 ppm이다. 마산만 입구에 위치하는 둔덕부근에서는 117 ppm에서 124 ppm이고 가덕수로 내에서는 133 ppm에서 112 ppm으로 감소한다.

2. 오염퇴적물의 연변화

1996년, 1997년의 마산만 내 중금속 변화를 살펴보면(그림 4.3.5, 표 4.5.3), 마산만 최상부(정점 M1)에서는 Al, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd이 증가

표 4.5.3. 마산·진해만 해역 오염퇴적물의 연변화

Station	Al(%)	Fe(%)	Mn(ppm)	Cr(ppm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)	Zn(ppm)	Cd(ppm)	Pb(ppm)
96M1	2.75	1.68	413	54	15	22	24	110	0.3	60
97M1	7.7	3.5	531	52	13	25	59	180	0.7	42
96M2	6.23	3.66	780	56	16	37	39	194	1.2	47
97M2	8.1	3.9	606	65	14	35	52	195	0.8	39
96M3	9.51	4.26	631	84	16	38	30	156	0.8	42
97M3	6.8	3.7	487	59	14	36	48	194	0.8	37
96M4	9.04	4.2	848	76	15	35	31	145	0.5	35
97M4	8.5	3.8	1025	56	14	35	34	117	0.2	28
96G1	9.3	4.33	1004	78	15	30	17	121	0.4	33
97G1	7.8	3.7	940	49	15	35	38	121	0.2	28
96G2	8.93	4.1	880	52	15	33	24	117	0.3	30
97G2	8.8	3.9	834	62	16	38	41	112	0.2	28
96G3	8.49	4	785	59	13	22	9	106	0.3	30
97G3	6	3.4	625	66	14	32	29	113	0.1	24
96G4	5.67	2.63	803	24	8	14	7	70	0.2	23
97G4	8.1	3.6	611	48	14	33	33	112	0.2	27

하였고, 정점 M2에서는 Al, Fe, Cr, Cu, Zn이 증가한 반면, Mn, Pb 함량이 감소하였다. 정점 M3에서는 Cu와 Zn만 증가하고 전체적으로 감소하였다. 마산만 입구에 해당하는 정점 M4에서는 Mn만 증가하고 다른 중금속은 예년과 비슷하거나 감소하였다. 상대적으로 마산 내만으로 갈수록 다수의 중금속이 증가한 반면, 마산만 입구쪽에서는 증가한 중금속의 수가 몇가지에 불과하다. 1996년, 1997년의 가덕수로 내 중금속 변화를 살펴보면(그림 4.3.5, 표 4.5.3), 마산만 입구에 위치하는 둔덕 부근인 정점 G1에서는 Cu만 급격히 증가하고 다른 중금속은 비슷하거나 감소하였다. 가덕수로 내(정점 G2, G3, G4)에서는 Cr, Co, Ni, Cu, Zn 함량이 1996년도보다 1997년에 급격히 증가하였다.

제6절 퇴적환경과 오염퇴적물의 집적

마산만 및 진해만에서는 분급이 불량하고 뿔퇴적상이 우세하게 나타난다. 1996년과 1997년 마산만 내 표층퇴적물의 변화는 마산항에서는 silt 함량은 1996년도에 비해 1997년도 급격히 증가하고 clay 함량은 상당히 감소하여서 평균입도가 조립해졌다. 마산항을 제외하고는 마산만 내와 가덕수로 내 평균입도 및 구성비에서는 거의 변화가 없다. 중금속들은 세립질 퇴적물들이 공급되는 마산 주변의 하천을 통해서 유입되는 것으로 추정되며, 지화학적 특성에 의해서 농집의 장소를 달리한다. 1996년, 1997년의 마산만 내 중금속 변화는, 마산만 최상부(정점 M1)에서는 Al, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd 이 증가하였고, 정점 M2에서는 Al, Fe, Cr, Cu, Zn이 증가한 반면, Mn, Pb 함량이 감소하였다. 정점 M3에서는 Cu와 Zn만 증가하고 전체적으로 감소하였다. 마산만 입구에 해당하는 정점 M4에서는 Mn만 증가하고 다른 중금속은 예년과 비슷하거나 감소하였다. 상대적으로 마산 내만으로 갈수록 다수의 중금속이 증가한 반면, 마산만 입구쪽에서는 증가한 중금속의 수가 몇

가지에 불과하다. 1996년, 1997년의 가덕수로 내 중금속 변화는 마산만 입구에 위치하는 둔덕 부근인 정점 G1에서는 Cu만 급격히 증가하고 다른 중금속은 비슷하거나 감소하였다. 가덕수로 내(정점 G2, G3, G4)에서는 Cr, Co, Ni, Cu, Zn 함량이 1996년도보다 1997년에 급격히 증가하였다. 가덕수로내에서 중금속의 증가는 외해에서 유입되는 것으로 추정된다.

참고문헌

- Folk, R.L., 1968, Petrology of sedimentary rocks. Texas, Hemphill's, 170.p
- Hong, G.H., Park, Y.A, and Lee, K.W., 1983, Partitioning of heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea, J. Geol. Soc. Korea, 18, 180-184.
- Kim, E.S., Lee, S.H., Kim, K.T. and Cho, S.R., 1993, Geochemical characteristics of suspended particulate matters in Masan Bay, Korea. Ocean Res., 15, 91-99.
- KORDI, 1989, A study on the coastal water pollution and monitoring, BSPG 00083-242-4, 360p.
- KORDI, 1993, Fluxes of organic carbon, nitrogen, phosphorus, and biogenic silicon in the coastal bays (Chingae Bay, Korea), BSPE 00307-575-4, 84p.
- Lee, S.H. and Lee. K.W., 1983, Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea, J. Oceanol. Soc. Korea, 18, 49-54.

제5장 3차원 해수유동 및 수질변화 예측모델링

제1절 서론

진해·마산만의 수질분포는 시간적·공간적으로 큰 변화를 보이고 있을 뿐 아니라, 해수순환이 활발하지 않은 정체수역에서는 성층화 현상으로 인하여 연직방향으로도 큰 수질변화를 보이고 있다. 특히, DO 항목의 경우 (표 5.1.1. 참조), 수온상승에 따른 포화용존산소량의 감소에도 불구하고 여름철에 플랑크톤의 활발한 광합성 작용으로 인하여 표층의 DO 농도가 큰 수치 또는 과포화 상태를 보이고 있는 경우가 많이 발생하고 있다. 반면, 저층에서는 저서생물의 활발한 분해활동에 의한 산소소비(Sediment Oxygen Demand)로 인하여 산소가 부족하거나 고갈되는 빈산소 또는 무산소층이 형성되어 저층생태계 및 수산업에 심각한 영향을 미치고 있다.

표 5.1.1 하계 마산만의 DO, 질소 및 인 농도(한국해양연구소, 1990)

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8
DO (mg/l)	7.01	4.98	5.56	8.40	8.96	8.59	7.94	10.47
	0.14	0.09	0.08	0.14	0.34	0.69	1.26	0.06
DO (%)	142.5	101.4	113.1	172.6	184.7	176.1	162.6	214.4
	2.8	1.8	1.6	2.7	6.7	13.4	24.6	1.2
Chl- α ($\mu\text{g/l}$)	37.65	24.67	26.50	34.25	33.01	19.23	-	-
	2.96	2.57	1.94	1.70	1.69	4.34	3.10	-
NO ₃ ($\mu\text{gN/l}$)	22.9	29.1	23.8	50.5	50.6	28.1	11.7	-
	4.5	2.9	2.4	3.4	5.5	6.2	6.1	-
NH ₃ ($\mu\text{gN/l}$)	14.8	22.8	7.5	9.3	10.2	4.4	9.6	-
	31.7	30.4	51.7	26.1	29.8	29.2	17.6	-
PO ₄ ($\mu\text{gN/l}$)	0.7	1.7	2.1	0.5	0.5	0.5	0.9	-
	4.1	5.9	5.3	5.6	5.8	4.5	4.3	-

* Upper Cell : Conc. of the Surface Layer; Lower Cell : Conc. of the Bottom Layer

한편, 강우시 하천을 통하여 유입되는 영양염류($\text{NO}_3\text{-N}$) 및 엽록소 항목의 경우, 하천유입구 부근에서는 표층에서 높은 농도를 보이고 있으며, 저층에서는 표층에 비하여 매우 낮은 농도를 보이고 있는 경우가 관측자료로부터 많이 제시되고 있다(표 5.1.1 참조; 한국해양연구소, 1989). 반면, 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$) 및 $\text{NH}_3\text{-N}$ 항목은 저층의 농도가 표층의 농도보다 큰 값을 유지하고 있다. 이러한 수질항목의 연직방향 변화는 특히 하계에 두드러지는 양상을 보이고 있으며, 동계에는 성층화가 파괴되어 연직방향의 농도변화가 하계에 비하여 미미한 실정이다. 따라서, 선행 연구사업(한국해양연구소, 1995, 1996) 과정에서 수립된 평면 2차원 수질관리 모형으로는 하계 수질관리(특히, 빈산소 수괴의 형성)를 위한 수질변동예측에 제한이 따른다. 또한, 수심방향으로의 오염물질 농도를 평균하기 때문에 계산된 농도가 생태계에 미치는 영향을 과소평가할 수 있는 단점도 있다.

최근 관심이 대두되고 있는 온배수 확산, 방조제에 의하여 형성된 호수에서의 담수방류에 의한 어업피해 예측, 오염물질 확산예측 등은 담수와 염수의 밀도차이에 의한 성층화로 인하여 3차원적 모델에 의한 예측이 타당하다고 할 수 있으며, 또한 이에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있는 실정이다(한국해양연구소, 1997).

본 연구에서는 평면 2차원 수질모형의 한계점을 극복하고, 보다 효과적으로 실제 해역에서의 농도변화 경향을 반영할 수 있는 3차원 수질모형의 수립·적용에 중점을 두었다. 모델의 정확성 및 관리모형으로의 활용을 위하여 3차원 해수유동 모형의 수립, 수질모형의 생물분야 및 지질분야 자료 활용, 오염부하량 예측모형의 수립을 통한 수질관리모형과의 연계운영(그림 5.1.1 참조)에 중점을 두어 연구를 수행하였다.

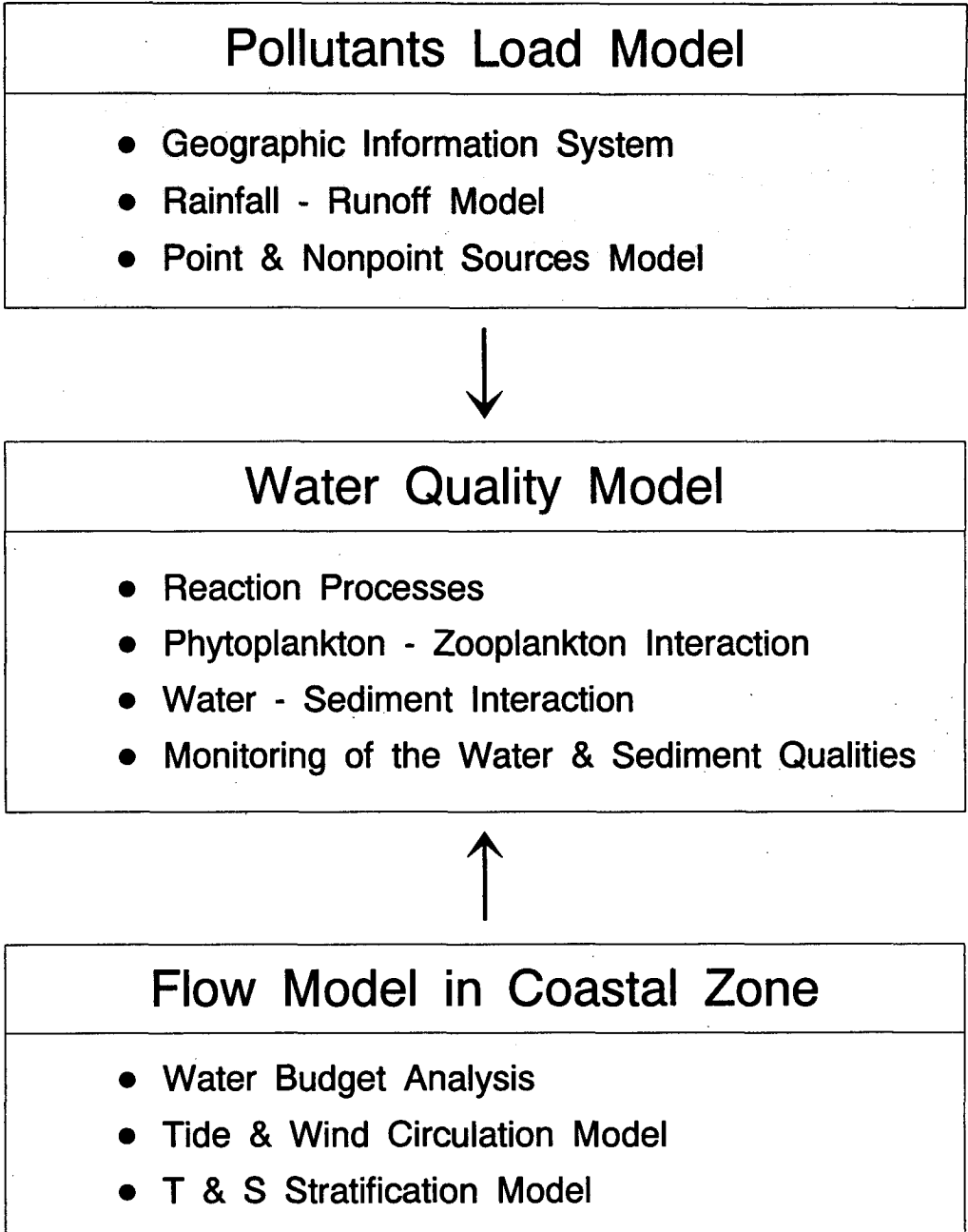


그림 5.1.1 수질관리 모형

수질관리모형은 대상해역의 환경에 영향을 미치는 개발계획(도시계획, 공간조경 등의 토지이용도의 변화 등) 및 환경시설 조성과 관련하여 변화되는 오염부하량을 예측하는 모형(pollutants load model; 점오염원 및 비점오염원 모형)을 이용하여 향후 예상되는 장기적인 오염부하량을 계산하는 작업이 필수적으로 포함한다. 또한, 오염부하량 예측은 연평균 부하량과 계절별 변화도 모의할 수 있는 모형이 수질환경 관리에 보다 적합할 것으로 사료된다. 그리고, 또 하나의 중요한 부모형으로는 해수순환 모형이 있다. 해수순환 모형에 대한 연구는 3차원 해수유동모형이 수립되어 있는 단계이므로 수질모형과의 적절한 연계(중간 처리과정 : time scale, data format 일치 등)를 위한 프로그래밍작업이 추가되면 된다. 그리고, 수질관리모형의 중심을 차지하고 있는 수질모형은 화학·생물·지질분야의 연구성과를 활용하여 모형을 구성하고, 보정·검증하는 작업을 수행한다.

따라서, 금번 제1차년도 연구에서는 3차원 수질모형의 수립에 중점을 두어, 장기적인 수질변동을 모의하기 위한 준 3차원 유동모형과 3차원 수질모형의 수치모형화 작업을 수행하였다. 향후 지속되는 제2, 3차년도 연구에서는 대상해역의 오염부하량을 예측하는 오염부하량 예측모형을 수립하여, 기수립된 3차원 수질관리모형의 보정 및 검증을 수행할 계획이다. 오염부하량 예측모형은 GIS 구축 및 비점오염원 산출에 중점을 두어 수행할 계획이다. 또한, 진해만 지역의 개발계획을 조사하여 향후 예상되는 오염부하량의 변동조건하에서 수질변동을 예측하고, 계산된 결과를 토대로 진해·마산만의 최적 수질관리를 위한 대안도출, 해역의 특성에 적합한 수질개선공법의 제시 및 정책결정을 위한 자연과학 분야의 자료제시 및 DB 수립, 연안해역 수질관리모형의 활용지침안 도출 등을 수행할 예정이다.

제2절 진해·마산만 3차원 해수유동모델링

전형적인 반폐쇄성 해역인 마산·진해만은 연안역의 개발과 활용의 증가로 인하여 도시하수, 공장폐수 등에 의하여 연안 수질환경이 심하게 오염되어 있으며, 각종 매립사업 등으로 인해 주변 해수유동 및 수질환경이 변화하고 있다. 만내 수질분포에 영향을 미치는 오염물질의 이동·확산은 만내 해수순환에 의해 주로 일어나고, 해수순환은 조석, 바람, 담수유입 등에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 즉 해역내 흐름은 조석에 의한 주기적인 해수면의 승강작용에 의해 흐름의 크기와 방향이 시간에 따라 변화하는 주기성 흐름인 조류, 바람에 의해 발생하는 수면 마찰력에 의한 풍성류(wind-driven flow), 밀도가 다른 하천수 등의 유입에 의한 밀도류 등에 의하여 발생한다. 이러한 흐름들은 단독으로 발생하는 것이 아니라 동시에 발생한다. 따라서, 연안해역에서의 해수유동을 정확히 이해하기 위해서는 흐름이 복합작용에 의하여 발생하므로 만내 해수유동에 영향을 미치는 흐름들의 복합적인 영향에 대한 정확한 이해, 평가 및 예측이 있어야 한다.

따라서, 마산-진해만의 해수유동에 대하여 조석운동에 의한 해수유동인 조류, 바람과 조석의 복합 외력에 의한 만내 해수유동, 담수의 영향을 3차원 수치모형의 적용결과(한국해양연구소, 1993; 1995; 1996; Kim, 1994)와 관측결과(한국해양연구소, 1992)를 토대로하여 정리 및 분석하였다.

1. 조류분포

기존 관측자료의 분석 및 3차원 수치모델링 결과에 기초하여 정리하면, 다음과 같다. 1982 ~ 1983년에 정점별로 관측한 층별 유속(한국해양연구

소, 1992)을 Godin의 조류분석법(Foreman, 1978)을 사용하여 분석하여 얻은 결과중 가장 큰 조류성분인 M_2 분조의 조류타원 분포도는 [그림 5.2.1]과 같다. 거제도 우측과 북측의 수로에서 유속이 크게 나타나고 있으며, 진해만 안에서는 대체로 유속크기가 작다. 수심에 따른 유속분포는 유속이 강한 지점에서는 관측수심별로 큰 차이가 없으나, 유속이 약한 지점에서는 수심이 깊어짐에 따라 유속이 감소하였다. 이 관측자료의 분석결과와 3차원 모델의 적용결과(한국해양연구소, 1993; 1995)에 의하면, 조석에 의한 마산-진해만의 해수유동은 다음과 같다. 대조기 창조시([그림 5.2.2])는 거제도 우측수로의 우측하단에 위치)와 계산영역의 동측수로(가덕수로)를 통해 유입된 외양수는 표층에서 최대 약 1 m/sec의 유속으로 마산만을 향하여 북서진하다가 대부분은 진해만으로 유입되고 일부는 마산만으로 유입된다. 표층유속은 마산만 입구에서는 10 ~ 20 cm/sec 크기이며, 마산만내에서는 전반적으로 10 cm/sec 미만이다. 또한, 견내랑해협을 통해 빠른 속도로 유입된 해수는 유입량이 진해만전체의 조량에 비하여 미약하여 부근 일부지역의 해수유동에만 그 영향을 준다. 이러한 흐름패턴은 모든 수심에 대하여 일정하나 바닥마찰의 영향으로 표층에서 바닥으로 갈수록 유속크기가 작아진다. 낙조시는 전반적으로 창조시와 유향이 반대되는 흐름패턴을 보여 마산·진해만으로 창조시 유입되었던 해수가 마산만과 진해만으로부터 흘러나와 서로 합쳐서 외해로 빠져나가고, 견내랑에서도 외해(충무쪽)으로 흘러 나간다. 소조기 층별 유속([그림 5.2.3]과 [그림 5.2.4]의 윗그림)은 양상은 대조기와 거의 유사하나 유속 크기가 크게 감소하여 거제도 동측수로에서도 30 cm/sec 미만이며, 주수로를 제외한 해역에서 유속크기는 매우 작다.

2. 취송류 분포

조류에 관해 수치모델링 및 관측결과의 분석자료(한국해양연구소,

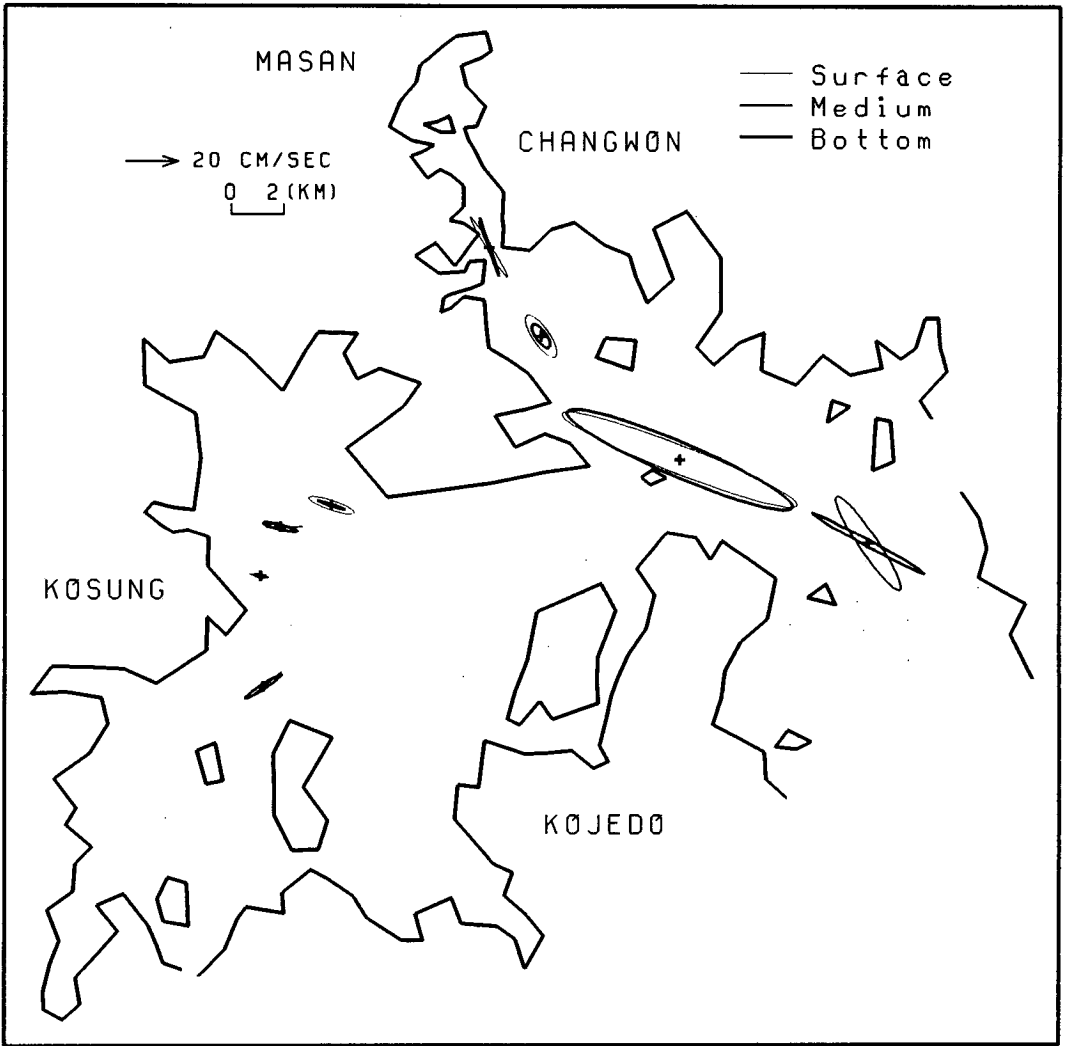


그림 5.2.1 관측된 M_2 분조 조류타원의 분포도

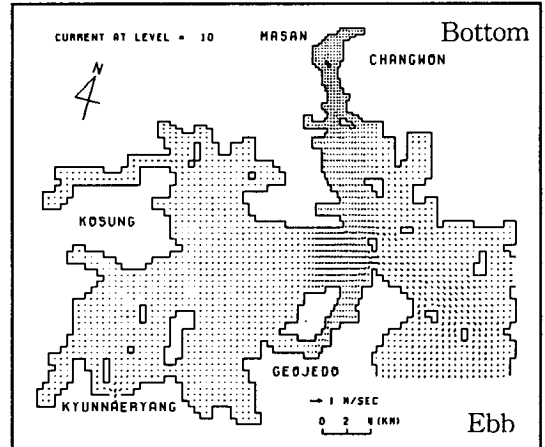
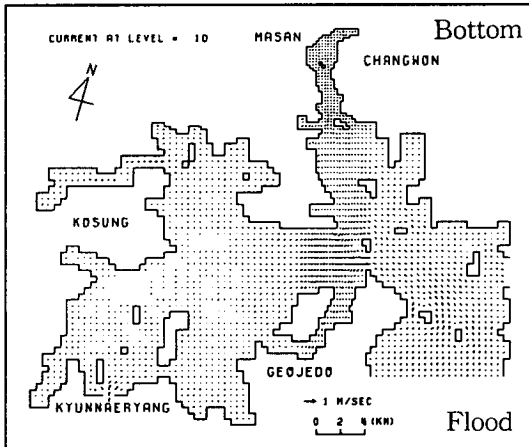
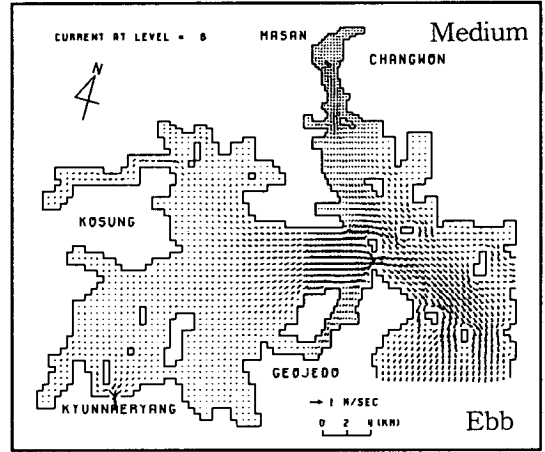
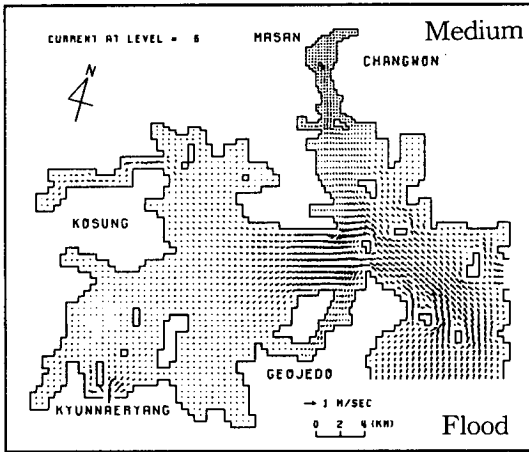
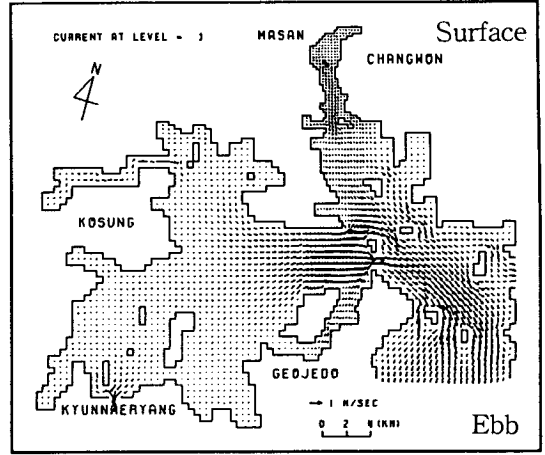
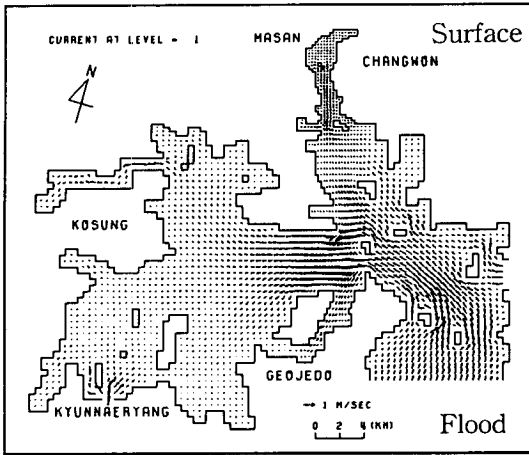


그림 5.2.2 대조기 조류분포

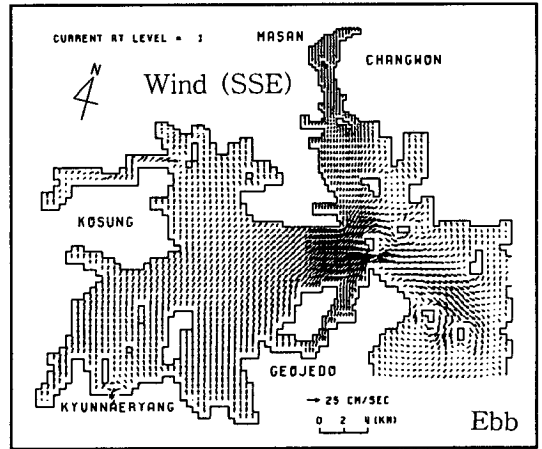
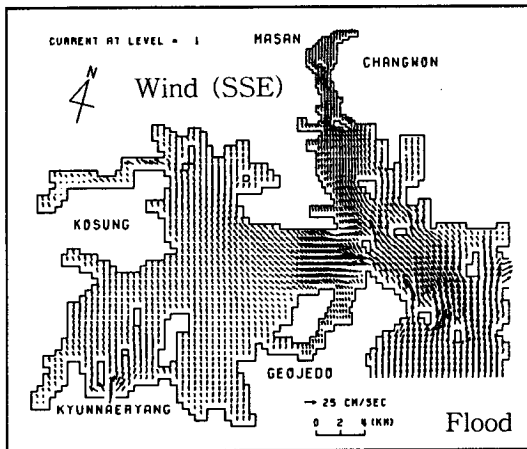
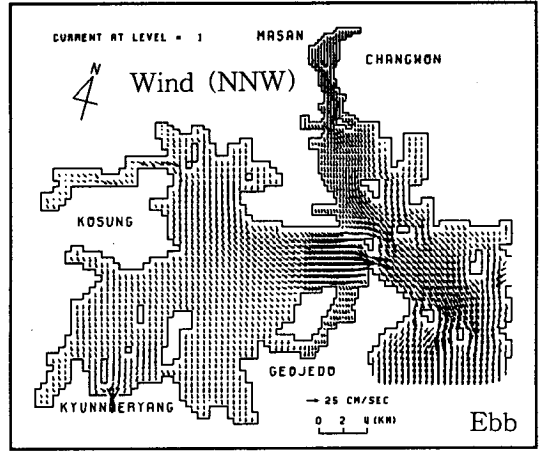
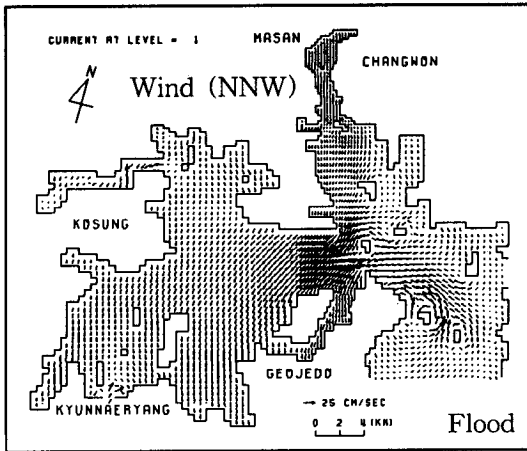
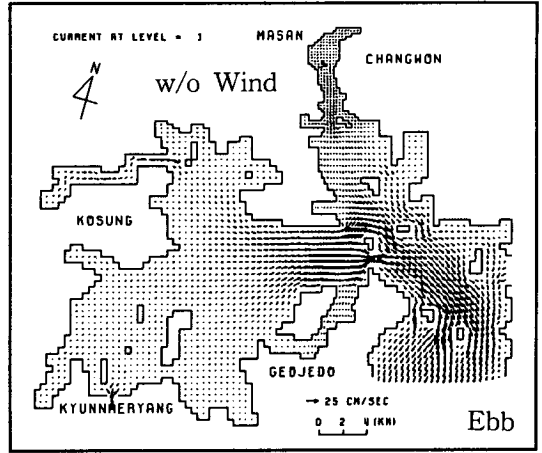
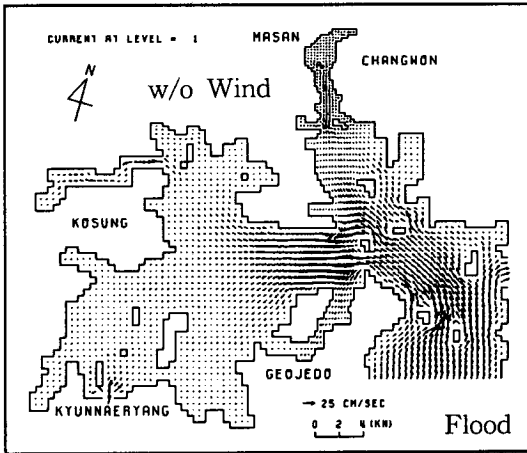


그림 5.2.3 소조기 표층 유속분포

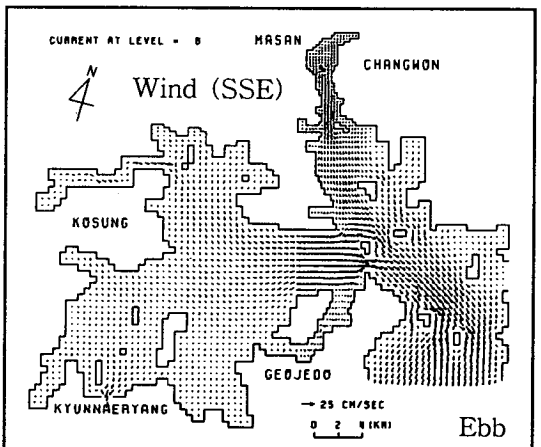
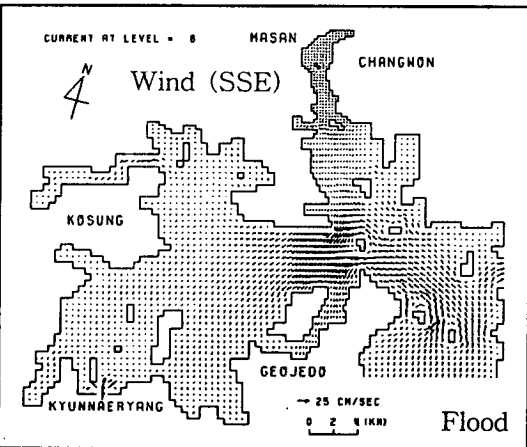
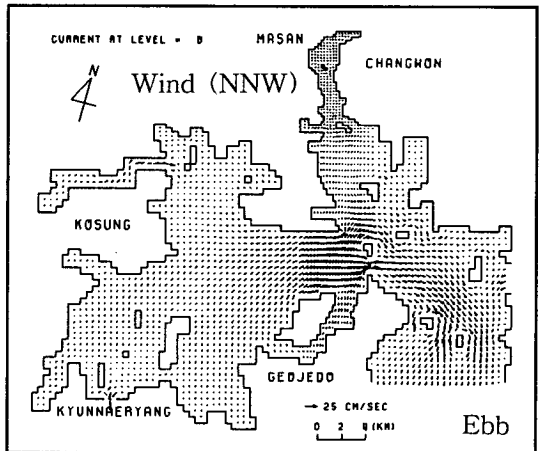
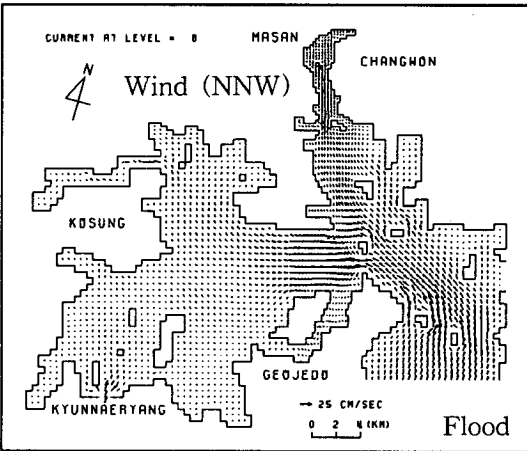
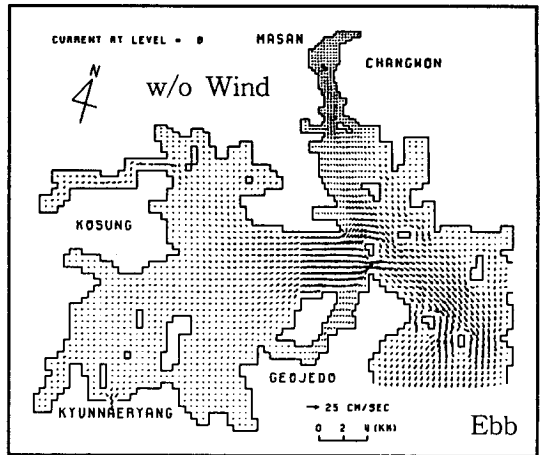
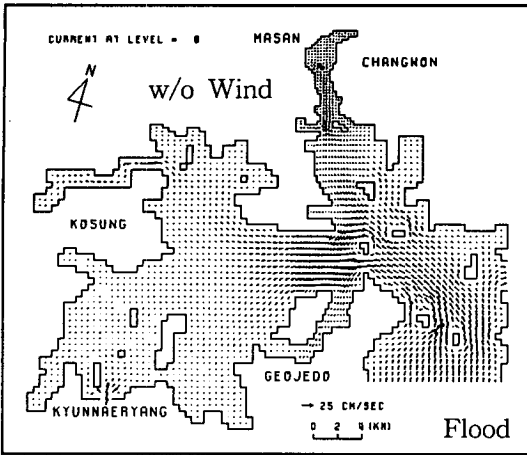


그림 5.2.4 소조기 하층 유속분포

1996)에 의하면, 해수면의 승강이 커서 조류의 속도가 강한 대조기에는 바람의 영향이 조류에 비하여 작아 상대적으로 해수유동에 크게 영향을 미치지 않으나, 조류의 속도가 상대적으로 약한 소조기에는 바람이 해수유동에 크게 영향을 주었다.

동, 하계 대표적인 평균 최대풍속이 마산-진해만의 해수유동에 미치는 영향은 다음과 같다. 1985 ~ 1990년에 마산측후소에서 관측한 자료를 분석한 결과(환경처, 1991)에 의하면, 풍향별 바람 발생률은 북북서풍이 동계에, 남남동풍이 하계에 가장 널리 발생하며, 풍향별 평균 최대풍속은 북북서풍 평균 10.6 m/sec, 남남동풍 평균 11.0 m/sec 였다. 관측결과에 의하면, 만내에 바람이 불 경우 지속적으로 약 0.5~1일간 계속해서 부는 모습을 보이고 있다(한국해양연구소, 1988; 1996). 따라서, 계절별 대표 바람이 반일동안 지속적으로 분 후에 발생하는 해수유동을 살펴보면, 다음과 같다. 계절별 대표바람은 겨울은 북북서풍이 10.6 m/sec, 여름은 남남동풍이 11.0 m/sec이다.

바람에 의한 영향은 모든 조석조건에 대하여 나타나나 작은 조류 크기로 바람의 영향을 뚜렷이 볼 수 있는 소조기에 대해서는 살펴보면 다음과 같다. 바람의 영향이 없는 경우에 창조류는 연구영역의 동남쪽에 위치한 가덕수도를 통하여 유입된 해수의 일부는 마산만(마산과 창원사이에 위치)으로 유입하고 대부분은 진해만으로 유입하였다. 그러나, 북북서풍이 불 경우에는 표층류([그림 5.2.3]의 중간 그림)는 마산-진해만의 동남쪽에 위치한 수로에서는 유속이 급격히 감소하여 주수로를 제외한 지역에서는 북진하는 흐름이 사라졌으며, 유속의 변화는 가덕수로와 마산만을 잇는 수로에서 최대 약 20 cm/sec 였다. 거제도 동측수로를 통하여 유입된 해수는 북북서진하다가 거제도 북측에서는 바람의 영향에 의하여 마산만으로 유입하지 못하고 마산만에서 흘러나온 표층 해수와 함께 진해만으로 유입하였으며, 진해만에서는 미약하던 표층류가 강한 바람에 의하여 남쪽으로 약 10 cm/sec

가 증가한 흐름을 형성하였다. 수면으로부터 전체수심의 70%인 연직위치에서 흐름인 하층류([그림 5.2.4]의 중간 그림)는 북풍에 의하여 바람이 없는 경우에 비하여 표층의 해수가 남쪽으로 이동함에 따라 저층 해수는 질량보전 측면에서 이를 보상하기 위하여 표층류와 반대방향으로 흐름이 발생하는 모습을 보여 마산-진해만 입구 가덕수도에서 마산만간의 수로에서는 북향류인 창조류의 유속크기가 약 4 cm/sec 증가하였다. 이렇게 북풍계열의 바람에 의하여 표층에는 남향류, 저층에는 북향류가 발생하는 계산결과는 관측결과에서도 볼 수 있다(한국해양연구소, 1988). 한편, 남남동풍에 의해서는 마산만으로 향하는 표층 창조류([그림 5.2.3]의 아랫그림)의 크기가 바람에 의해 약 10 ~ 15 cm/sec 증가하는 모습을 보였으며, 저층 창조류([그림 5.2.4]의 아랫그림)는 표층류에 의한 마산만으로 해수 수송을 보상하기 위하여 유속이 감소하였으나 그 변화량은 크지 않았다.

소조기 낙조류의 경우는 다음과 같다. 바람의 영향이 없는 경우에는 창조류시 마산-진해만으로 유입되었던 해수가 마산만과 진해만으로부터 빠져나와 합쳐져서 가덕수도를 통하여 외해로 흘러가는 모습을 보였다. 그러나, 북북서풍이 불 경우에 표층류는 마산에서 가덕수도를 잇는 수로에서는 유속이 증가하는 모습을 보였으며, 진해만에서는 바람의 영향에 의하여 남향류가 발생하였으며, 바람에 의한 유속증가량은 약 10 cm/sec였다. 하층류는 표층 해수가 북풍에 의하여 남쪽으로 이동함에 따라 만내 수괴의 질량보전 측면에서 이를 보전하기 위하여 표층류와 반대방향의 흐름이 증가하는 모습을 보였으며, 유속 크기가 약 5 cm/sec 감소하였다. 한편, 남남동풍에 의해서는 표층 낙조류는 낙조류와 반대방향의 바람에 의한 흐름에 의해 남쪽으로 거의 흐르지 못하였으며, 저층에서는 표층류에 의한 질량이동을 보전하기 위하여 낙조류의 크기가 약간 증가하였다.

요약하면, 바람에 의한 해수유동은 겨울철 대표바람인 북풍계열 바람이 불 경우에는 표층류는 전반적으로 바람방향과 같은 남향류를 발생시키고,

하층에서는 상층에서 바람에 따른 질량수송을 보전하기 위하여 바람과 반대되는 방향으로 북향류를 발생시킨다. 여름철 남풍계열의 바람이 불 경우에는 바람방향과 같은 북향류를 표층에서 발생시키며, 하층에는 바람과 반대방향인 남향류를 약하게 발생시킨다.

3. 담수유입

마산만 주위에 위치한 하천으로부터 담수의 유입으로 인한 해수유동 변화는 평상시에는 미미하다(Kim, 1994). 그러나, 하계 홍수기에는 1991년 8월에 발생한 강우에 대하여 수문분석을 실시한 경우에 의하면, 최대 약 $500 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에 달한다(한국해양연구소, 1994). 따라서, 이는 평상시 마산만 유입수량 약 $20 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 25배에 해당하는 수량으로 만내 해수유동에 상당히 영향을 미칠 것이다. 따라서, 홍수시 담수유입이 만내 해수순환에 미치는 영향에 대한 자세한 검토가 있어야 할 것이다.

4. 해수유동이 마산만 수질에 미치는 영향

위에서 검토한 만내 해수유동이 오염물질 이동에 미치는 영향을 살펴보면, 조류는 만내에 유입된 오염물질이 일정한 범위에서 주기적인 왕복성 이동을 하도록하며, 장기적으로는 담수유입, 조석잔차류에 의하여 오염물질을 일정한 방향으로 서서히 이동시킨다. 따라서, 마산만으로 유입된 오염수는 약한 조류로 인하여 평상시에는 대부분 만내에 거의 축적되게 된다.

한편 계절적 변화가 심한 바람의 영향에 의한 해수유동이 마산만의 수질에 미치는 영향을 살펴보면, 겨울철에는 북풍계열의 바람에 의하여 하천을 통해 유입된 표층의 오염된 만내 해수가 외해로 빠져나가고, 이에 따라 빠져나간 내만 해수를 보충하기 위하여 저층에서는 비교적 깨끗한 외해의

해수가 유입됨에 따라 만내 수질이 개선되는 긍정적인 영향이 있을 것이다. 그러나, 하계에는 강한 남풍계열의 바람에 의하여 하천으로부터 유입된 유기물질을 다량 포함한 표층수가 외해로 빠져나가지 못하고 만내에 축적되며, 표층수의 축적을 보전하기 위하여 저층수가 외해로 이동함에 따라 유기물질을 다량 함유한 만내 상층수가 하강(downwelling)하여 저층으로 이동하며, 이에 따라 표층에 있던 유기물이 다량 해저에 퇴적될 것이다. 이를 기존 연구에서 보고된 바 있는 마산만의 하계 저층 빈산소 수괴의 형성(한국해양연구소, 1988)과 연관지어 생각하면, 다량의 하천수 유입으로 인해 표층에 상존하고 있는 유기물질이 바닥에 퇴적함에 따라 저층에서는 유기물 산화를 위해 많은 양의 산소를 필요하게 될 것이다. 그러나, 하계에는 높은 수온으로 인하여 밀도 성층화 현상이 발생하여 밀도약층의 차단작용으로 저층에 산소공급이 거의 중단된다. 따라서, 하계 대표바람인 남풍계열 바람은 밀도약층 형성과 함께 저층 빈산소 수괴를 형성하는 한 원인이 될 수 있다.

요약하면, 계절적 대표바람은 낮은 수온, 적은 하천수량, 상하층수 혼합 양호 등으로 인하여 수질이 비교적 좋은 동계에는 수질을 더욱 깨끗하게 하는 데 기여하며, 반대로 적조 및 저층 빈산소 수괴 등이 수시로 발생하는 하계에는 오히려 수질을 더욱 악화 시키는 데 기여한다.

제3절 3차원 수질모형의 구조 및 특성

1. 수질관리모형의 지배방정식

진해·마산만의 수질환경을 예측하고 관리하기 위해서는 평면적인 분포와 연직방향의 수질변동을 고려할 수 있는 모형이 수립되어야 한다. 평면 2차원 수질모형은 신속하고 개략적인 농도분포를 계산할 수 있는 장점이 있는 반면, 정체수역의 연직방향 수질변화 모의에 취약한 단점이 있다. 따라서, 보다 정확하고 현상파악에 유리한 3차원 수질모형의 수립이 필요하다. 또한, 수립된 모형을 수질관리모형으로 활용하기 위해서는 월별, 계절별 또는 연변화 모의에 적합하도록 모형을 구성하여야 한다. 일반적으로, 3次元 수질모형의 지배방정식은 운송방정식으로 표현할 수 있으며, 모의수질항목에 따라 다르게 구성되는 반응항이 모형에서 모의하는 수질항목의 수만큼 추가된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + S_R + S_E$$

또는, 흐름모형의 연속방정식을 적용하면,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + S_R + S_E$$

여기서,

c = 모의수질항목의 농도(mg/l),

u, v, w = 각각 x, y, z 방향의 유속(m/sec),

Kx, Ky, Kz = 각각 x, y, z 방향의 확산계수(m^2/sec),

S_R = 모의 수질항목의 반응항(mg/l/day)

S_E = 수체외부의 오염부하 및 용출·소멸항(kg/day)이다.

수질관리모형의 특성(중심)에 해당하는 S_R, S_E 항은 모형의 구조 및 모의 수질항목의 반응·용출·소멸특성을 반영하여 구성한다. 일반적으로, 반응항(reaction term)은 온도보정계수를 고려한 1차 반응항으로 고려하며, 용출 및 소멸항은 상수항으로 구성한다. 그러나, 소멸항은 수체내에 존재하는 오염물질의 양보다 많이 소멸될 수는 없으므로 1차 반응식으로 소멸항을 고려하는 방법을 선택하는 것이 타당한 것으로 사료된다. 본 연구에서 모의하는 수질항목의 S_R 항은 한국해양연구소(1996) 보고서(평면 2차원 수질모형)에 제시된 방법을 이용하여 구성하였다(세부적인 내용은 한국해양연구소 보고서(1996) 참조). 계산구획 및 연직방향 층에서의 S_R, S_E 항 기본 골격은 동일한 형태를 가지게 된다.

다음은 3차원 수질관리모형에서 모의하는 수질항목의 S_R, S_E 항을 표현하는 것으로, WASP-5 모형에서 구분·모의하는 수질항목의 구조를 원용하였다. 일반적으로, 수질항목의 구조는 해역의 주요한 반응항, 저면 퇴적물로의 침전·용출량 및 외부 오염부하항만을 고려하여 구성한다. 그러나, 지배적인 반응 및 오염부하의 정량적인 영향과악이 미흡한 경우에는 범용성이 있는 수질모형의 구조를 참조하여 구성하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

가. 藻類(식물플랑크톤) - 요각류(동물플랑크톤) 모형

$$\frac{d[A]}{dt} = (G_a - k_r - e_x - s - m)[A] - g$$

여기서,

[A] = 조류의 농도(mg/l),

G_a = 조류의 성장률(1/day),

k_r = 조류의 호흡률(1/day),

e_x = 조류의 분비·배설률(1/day),

s = 조류의 침전률(1/day),

m = 조류의 사멸률 및 분해율(1/day),

g = 동물플랑크톤에 의한 조류 포획량(mgC/l-day)(= $k_G[Zoo][A]$)

k_G = 동물플랑크톤의 개체당 조류 포획율(1/day/ind.)

[Zoo] = 동물플랑크톤의 개체수(ind.)이다.

模型的 간편성을 위하여, 호흡률, 不活化率, 사멸률, 포획율을 통합하여 소멸률 D_a 로 표현하고, 침전을 s 는 조류의 침강속도와 수심(계산구획의 연직방향 길이 - layer thickness)의 함수로 표현하여, 최종적으로 模型 反應式을 구성하였다.

$$\frac{d[A]}{dt} = \left(G_a - D_a - \frac{v_A}{h} \right) [A]$$

여기서,

[A] = 조류의 농도(mg/l),

G_a = 조류의 총 성장률(1/day),

D_a = 조류의 총 소멸률(1/day),

v_A = 조류(dead algae)의 침강속도(m/day)이다.

$$\frac{d[Zoo]}{dt} = (G_Z - m_Z)[Zoo]$$

여기서,

$[Zoo]$ = 동물플랑크톤(요각류)의 개체수(ind.),

G_Z = 요각류의 총 성장률(1/day),

m_Z = 요각류의 총 사멸률(1/day)이다.

나. BOD-DO 模型

$$\begin{aligned} \frac{d[DO]}{dt} = & k_a(DO_{sat} - [DO]) - k_d[BOD] - \frac{SOD}{h} \\ & + R_{oc}(G_a[A] - k_R[A]) - R_{NO}k_n[NH_3 - N] \end{aligned}$$

여기서,

$[DO]$ = 용존산소(DO) 농도(mg/l),

$[BOD]$ = 생화학적 산소요구량(BOD) 농도(mg/l),

$[A]$ = 조류의 농도(mg/l),

$[NH_3-N]$ = 암모니아성 질소의 농도(mg/l),

DO_{sat} = 포화용존산소의 농도(mg/l),

k_a = 재폭기계수(1/day),

k_d = 탈산소계수(1/day),

SOD = 저면퇴적물에 의한 산소소비량(g/m^2 -day),

R_{oc} = 탄소에 대한 산소의 증량비,

R_{NO} = 산소에 대한 질소의 증량비,

G_a = 조류의 성장률(1/day),

k_R = 조류의 호흡률(1/day),

k_n = 질산화율(1/day)이다.

$$\frac{d[\text{BOD}]}{dt} = -[k_d + k_s(1 - f_p)][\text{BOD}] + \frac{L_{\text{BOD}}}{H} + D_a R_{oc}[A]$$

여기서,

$[\text{BOD}]$ = BOD 농도(mg/l),

$[A]$ = 조류의 농도(mg/l),

k_d = 탈산소계수(1/day),

k_s = 입자성 유기물의 침전률(1/day),

D_a = 조류의 소멸률(1/day),

R_{oc} = 탄소에 대한 산소의 증량비,

f_p = 전체(용존성+입자성) 유기물에 대한 입자성 유기물의 비율(0 - 1),

L_{BOD} = 외부오염원에 의한 BOD 오염부하율($\text{g}/\text{m}^2\text{-day}$)이다.

다. 窒素收支(nitrogen budget) 模型

$$\frac{d[\text{Org. N}]}{dt} = -k_{nm}[\text{Org. N}] + D_a R_{NC} F_{ON}[A] - \frac{V_{ON}}{H}[\text{Org. N}] + \frac{L_{ON}}{H}$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{NH}_3 - \text{N}]}{dt} &= k_{nm}[\text{Org. N}] - k_n[\text{NH}_3 - \text{N}] \\ &\quad - G_a P_A R_{NC}[A] + D_a R_{NC}(1 - F_{ON})[A] + \frac{L_{AN}}{H} \end{aligned}$$

$$\frac{d[\text{NO}_3\text{-N}]}{dt} = k_n[\text{NH}_3\text{-N}] + G_a(1 - P_A)R_{\text{NC}}[A] - k_{\text{dn}}[\text{NO}_3\text{-N}] + \frac{L_{\text{NN}}}{H}$$

여기서,

[Org.N] = 유기질소의 농도(mg/l),

[NH₃-N] = 암모늄이온과 암모니아성질소의 농도(mg/l),

[NO₃-N] = 질산성질소와 아질산성질소의 농도(mg/l),

[A] = 조류의 농도(mg/l),

G_a = 조류의 성장률(1/day),

D_a = 조류의 소멸률(1/day),

k_{nm} = 유기질소의 가수분해(또는 무기질소화)율(1/day),

k_n = 질산화율(1/day),

k_{dn} = 탈질산화율(1/day),

L_{ON} = 유기질소의 외부유입을 및 퇴적물로부터의 용출율(g/m²-day),

L_{AN} = 암모니아의 외부유입을 및 퇴적물로부터의 용출율(g/m²-day),

L_{NN} = 질산성질소의 외부유입을 및 퇴적물로부터의 용출률(g/m²-day),

P_A = 암모니아성질소의 선호계수,

R_{NC} = 질소에 대한 탄소의 비율,

v_{ON} = 입자성 유기질소의 침강속도(m/day),

F_{ON} = 질소순환과정 중 영양염류가 유기질소로 회귀되는 비율이다.

라. 磷收支(phosphorus budget) 模型

$$\frac{d[\text{Org.P}]}{dt} = -k_{\text{pm}}[\text{Org.P}] + D_a R_{\text{PC}} F_{\text{OP}}[A] - \frac{V_{\text{OP}}}{H}[\text{Org.P}] + \frac{L_{\text{OP}}}{H}$$

$$\frac{d[\text{PO}_4\text{-P}]}{dt} = k_{pm}[\text{Org.P}] - G_a R_{PC}[A] + D_a R_{PC}(1 - F_{OP})[A] + \frac{L_{PP}}{H}$$

여기서,

[Org.P] = 유기 인의 농도(mg/l),

[PO₄-P] = 무기인(인산염 인)의 농도(mg/l),

[A] = 조류의 농도(mg/l),

G_a = 조류의 성장률(1/day),

D_a = 조류의 사멸률(1/day),

k_{pm} = 유기인의 가수분해(또는 무기인화)율(1/day),

R_{PC} = 인에 대한 탄소의 비율,

L_{OP} = 유기인의 외부유입을 및 퇴적물로부터의 용출률(g/m²-day),

L_{PP} = 인산염[무기]인의 외부유입을 및 퇴적물로부터의 용출률(g/m²-day),

v_{OP} = 입자성 유기인의 침강속도(m/day),

F_{OP} = 인순환 과정 중 영양염류가 유기 인으로 회귀되는 비율이다.

2. 수질관리 모형의 수치기법

운송방정식으로 표현되는 수질모형의 지배방정식에 대하여 적용가능한 수치기법은 매우 다양하다. 그러나, 본 연구에서 구성하는 3차원 수질모형의 경우에는 지배방정식을 직접 차분하는 방법과 간단한 형태의 지배방정식으로 분리하여 고차의 차분식을 적용하는 방법이 있다. 그러나, 시간축적의 차이가 많은 환경분야의 다차원 문제는 1차원 또는 2차원 방정식으로 표현되는 간단한 형태의 문제로 분리하여, 순차적으로 풀이하는 분할단계법(fractional step method)이 많이 적용되고 있다. 수질관리모형의 수치기법은 공간분할 기법을 선택하였다. 이 방법은 평면상의 계산과정과 연직방향의 계산과정을 구분하여 수치기법을 적용하는 방법으로, 평면상의 수치계산

기법은 QUICKEST 기법(Leonard, 1979)을 이용하고, 연직방향의 수치기법은 Crank-Nicholson 기법을 이용하였다. 따라서, 3차원 수질모형의 지배방정식은 수치기법의 적용을 위하여 평면상의 방정식과 연직방향의 방정식으로 분리할 수 있다. 그러나, 구획 수질모형의 경우에는 지배방정식이 단순하여지기 때문에 간단한 양해법에 의한 수치기법을 적용할 수도 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + S_R + S_E$$

수질모형의 지배방정식은 다음과 같이 평면방향의 이송·확산, 연직방향의 이송·확산, 반응 및 용출·소멸항으로 분리할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = S_R + S_E$$

해수유동모형에서의 연속방정식($\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0$)을 적용하면, 위 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial uc}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = S_R + S_E$$

분리된 방정식은 시간단계별로 별도의 차분기법을 적용하여 농도를 계산한다. 분리된 방정식이 3개인 경우에는, 시간간격을 3등분하여 각각의 방정식을 차분하는 형식을 취한다.

한편, 연직방향을 n (본 연구의 경우는 $n=3$)층으로 구분하면, 연직방향의 격자간격은 각각 수심의 $1/n$ 이 된다. 각 층을 상층, 중층, 하층으로 명명한다. 따라서, 각층의 유속성분이 해수유동모형으로부터 계산되고, 계산된 해수유동장 자료(구획의 유속 및 수위)로부터 각층의 평면 및 연직확산계수를 산정한다(확산계수 산정식 이용). 산정된 계수를 이용하여 격자상의 농도변화를 이송에 의한 질량변화율, 확산에 의한 질량변화율, 반응 또는 용출·소멸에 의한 질량변화율을 계산하면 농도가 계산되며, 계산을 위한 차분식은 다음에 제시된 바와 같다.

수질관리모형의 경우에는 시간규모가 월 또는 계절단위의 농도변화를 모의하여야 하므로, 계산구획에 대한 질량보존식으로 표현할 수 있다. 평면상의 위치를 격자가 아닌 구획으로 구성할 경우에는 평면상의 위치, 연직방향의 층으로 계산체적이 형성된다. 따라서, k 번째 구획의 l 번째 층에 대한 질량보존식은 다음과 같이 표현된다(지배방정식을 3차원 구획에 대하여 적분한 형태에 해당한다). 격자모형과 구획모형의 수치기법의 적용에 대해서는 보다 세세한 검토가 필요하지만, 장기간의 수질모의에는 구획모형이 적당할 것으로 사료되어 구획모형에 대한 차분기법을 제시하였다. 그러나, 위에서 언급한 분리기법에 의한 격자수질모형의 경우에는 단기간의 수질모형에 적

합하므로, 이에 대한 수치모형의 수립도 필요하다고 생각된다.

$$\frac{d(hA_S c)}{dt} = \sum_{i=1}^{I_N} (u A_I c_I) + \sum_{i=1}^{I_N} (A_I D_H \frac{\partial c}{\partial s_i}) + \sum S_i$$

$$+ (w A_{SU} c_U) - (w A_{SL} c_L) - (D_V A_{SU} c_U) + (D_V A_{SL} c_L)$$

여기서,

c = 계산구획의 농도 (mg/l)

u = 평면 유속 (m/sec)

w = 연직방향의 유속 (m/sec)

h = 계산구획 층(layer)의 두께(길이) (m)

s_i = 계산구획중심과 인접구획 중심간의 거리 (m)

A_S = 계산구획의 평면방향 평균 단면적(m²)

A_{SU} = 계산구획의 평면방향 상단 단면적(m²)

A_{SL} = 계산구획의 평면방향 하단 단면적(m²)

A_I = 계산구획과 인접구획사이의 연직방향 단면적(m²)

c_I = 계산구획과 인접구획이 접하는 면(지점)에서의 농도(mg/l)

c_U = 계산구획 층 상단에서의 농도(mg/l)

c_L = 계산구획 층 하단에서의 농도(mg/l)

D_H = 평면 확산계수(m²/sec)

D_V = 연직방향 확산계수(m²/sec)

S_i = 계산구획에서의 반응, 용출, 소멸에 의한 질량 변동항이다.

따라서, 좌변을 차분식[$d(hA_S c)/dt = hA_S (c^* - c^0)/dt$; c^* = 다음 시간단계의 농도, c^0 = 현 시간단계의 농도]으로 표현하여 정리하면 계산구획에서의 농도변동량을 계산(양해법)할 수 있다. 이 방법은 양해법이므로, 모형의

수행시 수치계산의 수렴조건(stability condition)을 만족하여야 하며, 수치계산 결과의 정확성에 대한 검토도 수행하여야 한다.

$$c^* = c^0 + \frac{\Delta t}{(hA_S)} \left[\sum_{i=1}^{I_N} (uA_{IC_I}) + \sum_{i=1}^{I_N} (A_I D_H \frac{\partial c}{\partial s_i}) + \sum S_i \right] + \frac{\Delta t}{(hA_S)} \left[(wA_{SUC_U}) - (wA_{SLC_L}) - (D_V A_{SUC_U}) + (D_V A_{SLC_L}) \right]$$

수치모형 계산구획의 변수는 다음과 같이 정의된다. 구획의 중심에서는 모의수질항목의 농도, 수심 및 확산계수가 정의되고, 구획과 구획이 접하는 면(interface area)에서는 유속이 정의된다. 그리고, 정의되는 지점을 제외한 면에서의 값은 적정 수준의 정확도를 가진 내삽법을 이용하여 관련 변수를 계산한다.

수질관리 모델의 시간규모에서 접근할 경우, 조석변화에 따른 이송 및 확산효과는 조석간차류에 의한 이송 및 조석평균 분산계수에 의한 확산효과로 분리할 수 있다. 계산구획에서의 평균 조석간차류가 작은 경우에는 조석평균 분산효과만을 고려한 모형의 적용이 가능할 수 있다. 즉, 이송효과는 장기간의 유역유입량에 해역의 평균류를 산정하여 고려할 수 있으며, 확산효과는 분산계수에 의하여 고려될 수 있다. 따라서, 최종적으로 제시된 차분식에서의 유속은 구획의 장기적(월단위) 평균유속에 해당되는 값이며, 평면 확산계수는 조석평균 분산계수를 포함한 값이다. 또한, 연직방향 확산계수는 조석의 크기 등에 의하여 결정되는 값이며, 장기적으로는 연직방향의 이송에 의한 물질수송은 무시한다(가정).

따라서, 3차원 수질관리모형의 최종적인 수치계산식(차분식)은 다음과 같이 표현된다.

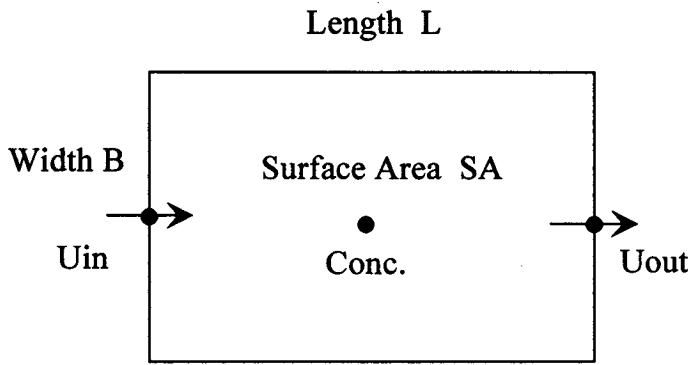
수행시 수치계산의 수렴조건(stability condition)을 만족하여야 하며, 수치계산 결과의 정확성에 대한 검토도 수행하여야 한다.

$$c^* = c^0 + \frac{\Delta t}{(hA_S)} \left[\sum_{i=1}^{I_N} (uA_I c_I) + \sum_{i=1}^{I_N} (A_I D_H \frac{\partial c}{\partial s_i}) + \sum S_i \right] + \frac{\Delta t}{(hA_S)} \left[(wA_{SU} c_U) - (wA_{SL} c_L) - (D_V A_{SU} c_U) + (D_V A_{SL} c_L) \right]$$

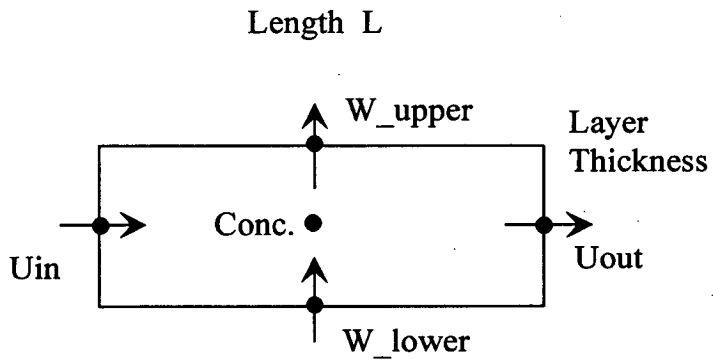
수치모형 계산구획의 변수는 다음과 같이 정의된다. 구획의 중심에서는 모의수질항목의 농도, 수심 및 확산계수가 정의되고, 구획과 구획이 접하는 면(interface area)에서는 유속이 정의된다. 그리고, 정의되는 지점을 제외한 면에서의 값은 적정 수준의 정확도를 가진 내삽법을 이용하여 관련 변수를 계산한다(그림 5.3.1 참조).

수질관리 모델의 시간규모에서 접근할 경우, 조석변화에 따른 이송 및 확산효과는 조석잔차류에 의한 이송 및 조석평균 분산계수에 의한 확산효과로 분리할 수 있다. 계산구획에서의 평균 조석잔차류가 작은 경우에는 조석평균 분산효과만을 고려한 모형의 적용이 가능할 수 있다. 즉, 이송효과는 장기간의 유역유입량에 해역의 평균류를 산정하여 고려할 수 있으며, 확산효과는 분산계수에 의하여 고려될 수 있다. 따라서, 최종적으로 제시된 차분식에서의 유속은 구획의 장기적(월단위) 평균유속에 해당되는 값이며, 평면 확산계수는 조석평균 분산계수를 포함한 값이다. 또한, 연직방향 확산계수는 조석의 크기 등에 의하여 결정되는 값이며, 장기적으로는 연직방향의 이송에 의한 물질수송은 무시한다(가정, 그림 5.3.2 참조).

따라서, 3차원 수질관리모형의 최종적인 수치계산식(차분식)은 다음과 같이 표현된다.

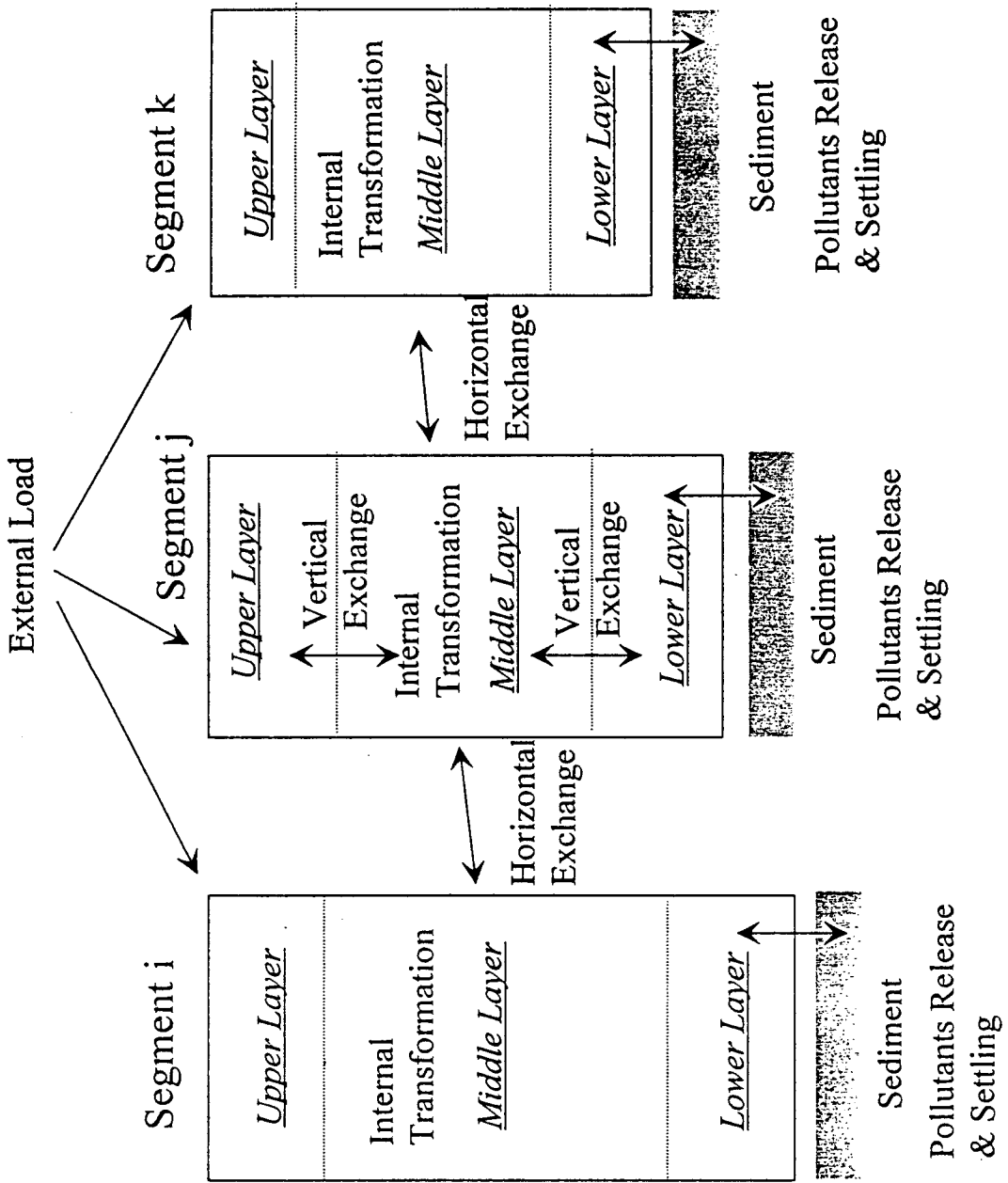


Plan View



Side View

그림 5.3.1 수질모형 구획의 변수정의체계



Schematic Diagram of the 3-D WQ Management Model

그림 5.3.2 수질모형의 구획별 계산모식도

$$c^* = c^0 + \frac{\Delta t}{(hA_S)} \left[\sum_{i=1}^{I_N} (u_T A_{T_i} C_i) + \sum_{i=1}^{I_N} (A_i D_{HL} \frac{\partial c}{\partial S_i}) + \sum S_i \right] + \frac{\Delta t}{(hA_S)} \left[-(D_V A_{SU} C_U) + (D_V A_{SL} C_L) \right]$$

여기서,

u_T = 계산구획의 월(또는 계절)평균 유속 (m/sec)

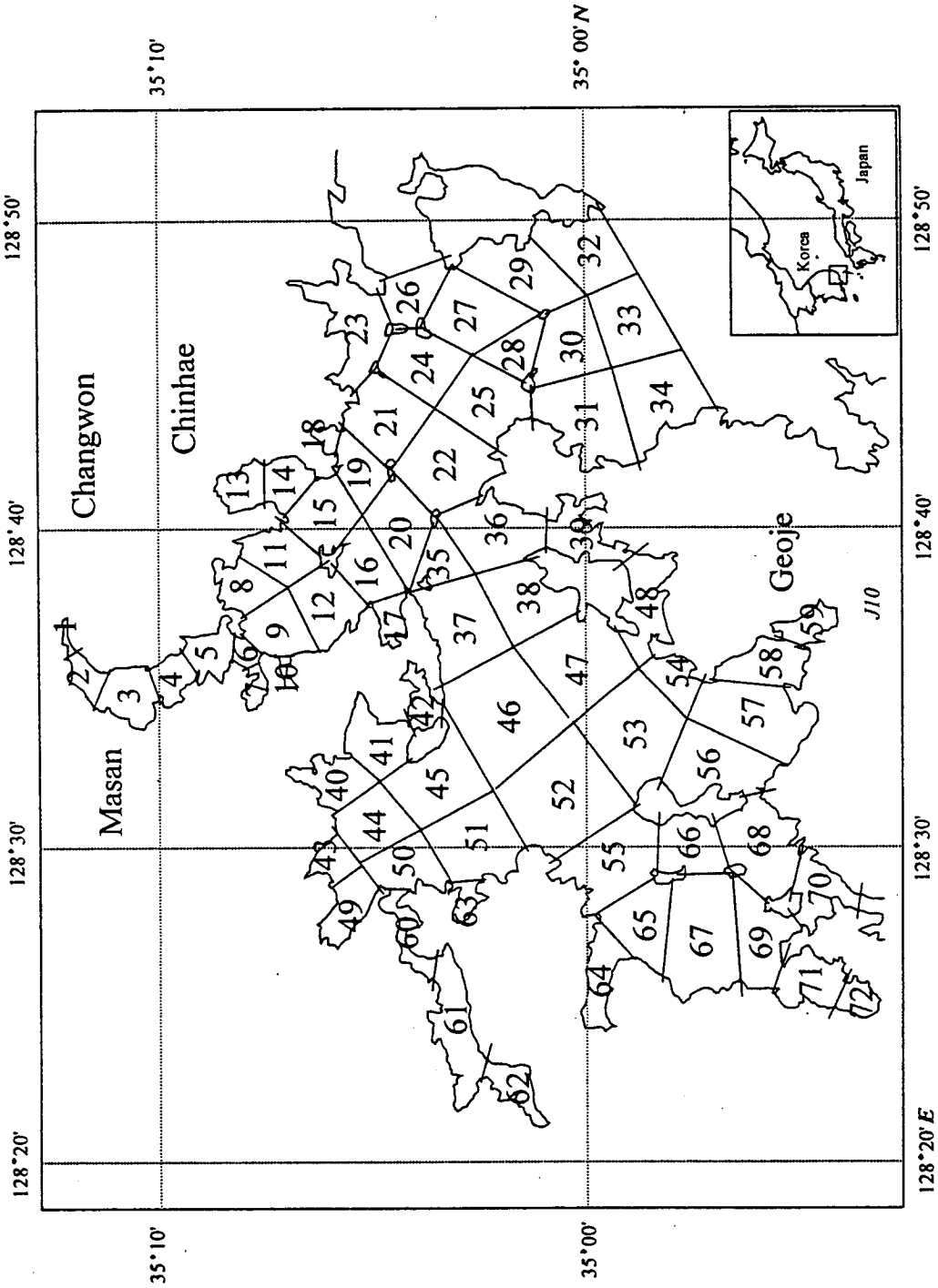
D_{HL} = 조석평균 분산계수 + 평면 확산계수(m²/sec)이다.

모형의 적용을 위하여 진해·마산만을 70여개의 구획으로 분할(그림 5.3.3)하였으며, 분할된 구획에 대하여 기본 정보(구획의 표면적, 구획의 평균수심, 인접한 구획간의 단면적 등)를 추출하여, 모형의 입력자료로 이용하였다.

3. 수질모형의 부모형 및 입력자료

(1) 해수유동 모형

3차원 해수유동 모형(격자모형)이 수립되어 있으나, 장기간의 수질관리모형에 직접 연계모의하기에는 방대한 자료의 입력문제 및 입력자료간의 시간규모의 불일치, 장기모의에 따른 계산의 비효율성 등의 제반 문제로 인하여 보다 효율적인 장기 해수유동 모형을 구성할 필요가 있다. 해역의 환경관리를 위하여 3차원 해수유동 모형은 수질관리모형에 적합한 구획모형으로 구성하였다. 구성된 모형은 격자모형에 비하여 간단한 모형이지만 해역 및 호소의 수질관리를 위하여 적용된 사례(Maryland Bay, Peaonic Bay, 팔당호, 대청호 등)가 많이 있으므로, 본 연구지역인 진해·마산만에서의 사용도 가능할 것으로 사료된다. 이 모형은 평면간 구획연결은 절점·마디



Segmentation of the 3-D WQ Management Model

그림 5.3.3 수질관리모델을 위한 진해만의 구획분할

(link-node) 방식을 도입하여 폭방향으로 적분한 준 3차원(Quasi 3-D) 장기 해수유동 모형이 된다. 수립된 모형은 장기적인 해수유동 양상을 계산하기 때문에 조석의 영향은 조석효과를 포함하는 분산계수에서 고려된다고 할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 3차원 해수유동 지배방정식인 연속방정식 및 운동방정식의 수치기법은 다음과 같다.

▶ 연속방정식

$$\frac{\partial [bu(i, k)]}{\partial s} + \frac{\partial [bw(i, k)]}{\partial z} = q_s$$

여기서,

s = 계산구획과 인접구획의 중심을 연결하는 방향

z = 연직방향(계산구획의 층을 연결하는 방향)

b = 계산구획과 인접구획의 경계면의 평균 폭(m)

$u(i, k)$ = 평면방향 유속(계산구획 i , 층 k) (m/sec)

$w(i, k)$ = 연직방향 유속(계산구획 i , 층 k) (m/sec)

q_s = 계산구획의 표면적을 통한 단위면적당 물 유출입량(m/sec)이다.

계산구획의 표면적을 통한 단위면적당 물 유출입량(예, 강우에 의한 유입 또는 증발에 의한 유출, 인공적인 유입·유출에 해당하는 담수공급 및 취수 등)은 q_s 항에서 고려할 수 있다. 반면, 계산구획의 단면을 통한 단위면적당 외부에서의 물 유입량이 존재하는 경우에는 계산구획 단면에서의 유속으로 환산할 수 있으며, 해당 계산구획의 유속 기지값(경계조건) 부여조건에 해당된다. 또한, 육지경계구획의 유속은 수체 유출입이 없는 경우, 유속 = 0 조건이 자동적으로 부여되어, 무흐름조건이 성립된다.

연속방정식을 연직방향으로 적분(층 두께 h)하면,

$$\frac{\partial [u(i, k)b(i, k)h(i, k)]}{\partial s} + w_U(i, k)b(i, k) - w_L(i, k)b(i, k) = q_L(i, k)h(i, k)$$

$$\begin{aligned} \frac{[u_I(i, k)A_I(i, k) - u_O(i, k)A_O(i, k)]}{\Delta L(k)} + b(i, k)[w_U(i, k) - w_L(i, k)] \\ = q_L(i, k)h(i, k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_I(i, k)A_I(i, k) - u_O(i, k)A_O(i, k) + A_S(k)[w_U(i, k) - w_L(i, k)] \\ = q_L(i, k)A_S(k) \end{aligned}$$

여기서,

A_I = 유입구획(가정)과 계산구획이 접하는 지점의 단면적,

A_O = 유출구획(가정)과 계산구획이 접하는 지점의 단면적,

$\Delta L(k)$ = 계산구획의 길이,

$b(i, k)h(i, k)$ = $A(i, k)$ (구획인접면의 단면적),

$\Delta L(k)b(i, k)$ = $A_S(k)$ (계산구획의 표면적),

$\Delta L(k)A(i, k)$ = $V(i, k)$ (계산구획의 체적)이다.

한편, 계산구획의 길이는 한 구획이 다른 구획과 연결되는 방향으로의 길이에 해당되며, 단면적은 구획이 접하는 면, 표면적은 계산구획간 연직방향으로 접하는 면에 해당하는 값이다. 계산구획에서의 유속 정의는 수질모형의 차분식(운송방정식)에서 정의된 첨자설명 및 격자에서의 변수정의 내용과 동일하다.

▶ 운동방정식

$$\frac{\partial [bu(i, k)]}{\partial t} + \frac{\partial [bu^2(i, k)]}{\partial s} + \frac{\partial [bu(i, k)w(i, k)]}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (Pb)}{\partial x} - D_s \frac{\partial^2 [u(i, k)b]}{\partial x^2} - \frac{\partial (\tau_z b)}{\partial z} \right] = 0$$

여기서,

P = 압력(수심의 함수),

D_s = 평면방향의 확산계수

τ_z = 마찰응력(수심의 함수)의 함수이다.

운동방정식을 연직방향으로 적분(층 두께 h)하면,

$$\frac{\partial [bhu(i, k)]}{\partial t} + \frac{\partial [bhu^2(i, k)]}{\partial s} + u(i, k)b[w_U(i, k) - w_L(i, k)] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (Pbh)}{\partial x} - D_s \frac{\partial^2 u(i, k)}{\partial x^2} \right] - \frac{b}{\rho} [(\tau_z)_U - (\tau_z)_L] = 0$$

공간미분항을 차분하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \Delta L(k) \frac{\partial [Au(i, k)]}{\partial t} + A_f(k)u^2(i, k) - A_o(k)u^2(i, k) \\ + u(i, k)A_s(k)[w_U(i, k) - w_L(i, k)] \\ + \frac{1}{\rho} \left[P_f(k)A_f(k) - P_o(k)A_o(k) - D_s \Delta L(k) \frac{\partial^2 u(i, k)}{\partial x^2} \right] \\ - \frac{A_s(k)}{\rho} [(\tau_z)_U - (\tau_z)_L] = 0 \end{aligned}$$

여기서,

P_I = 유입구획(가정)과 계산구획이 접하는 지점의 압력,

P_O = 유출구획(가정)과 계산구획이 접하는 지점의 압력,

Ds = 평면방향의 확산계수

$(\tau_z)_U$ = 계산구획 상단의 마찰응력,

$(\tau_z)_L$ = 계산구획 하단의 마찰응력이다.

시간미분항도 차분하여 정리하면,

$$\begin{aligned}
 V(i, k) \frac{[u^*(i, k) - u(i, k)]}{\Delta t} &+ A_I(k)u^2(i, k) - A_O(k)u^2(i, k) \\
 &+ u(i, k)A_S(k)[w_U(i, k) - w_L(i, k)] \\
 &+ \frac{1}{\rho} [P_I(k)A_I(k) - P_O(k)A_O(k) \\
 &- Ds\Delta L(k) \frac{\partial^2 u(i, k)}{\partial x^2}] \\
 &- \frac{A_S(k)}{\rho} [(\tau_z)_U - (\tau_z)_L] = 0
 \end{aligned}$$

따라서, 최종적인 차분방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u^*(i, k) = u(i, k) - \frac{\Delta t}{V(i, k)} \{ &A_I(k)u^2(i, k) - A_O(k)u^2(i, k) \\
 &+ u(i, k)A_S(k)[w_U(i, k) - w_L(i, k)] \\
 &+ \frac{1}{\rho} [P_I(k)A_I(k) - P_O(k)A_O(k) \\
 &- Ds\Delta L(k) \frac{\partial^2 u(i, k)}{\partial x^2}] \\
 &- \frac{A_S(k)}{\rho} [(\tau_z)_U - (\tau_z)_L] \}
 \end{aligned}$$

여기서,

$$A = (A_I + A_O)/2,$$

$$P(x, y, z, t) = P_A + \rho_0 g \eta + g \int_z^0 \rho(x, y, z', t) dz' \approx \rho(k) g z(k),$$

$z(k)$ = 계산구획의 k 층에 해당하는 평균수심(m)이다.

따라서, 수질관리모형의 부모형(submodel)에 해당하는 장기간의 해수유동 양상을 모의하는 흐름모형의 수치계산은 다음과 같은 단계를 거쳐서 수행할 수 있다.

1단계 : 초기상태의 유속 및 방향을 가정

**2단계 : 운동방정식의 차분식을 이용하여 평면 유속을 층별로 계산
(연직방향의 유속은 전 시간단계에서 계산된 값을 사용)**

**3단계 : 연속방정식의 차분식을 이용하여 연직방향 유속을 층별로 계산
(평면방향의 유속은 전 시간단계에서 계산된 값을 사용)**

4단계 : 표층에서의 연직 및 평면방향 유속을 이용하여 수위 계산

**5단계 : 유속 및 수위의 수렴을 검토,
수렴하지 않은 경우 2단계 수행하고, 수렴한 경우 계산종료**

6단계 : 계산결과의 출력 (구획별, 층별 유속 및 층의 두께)

장기간의 해수유동양상을 모의하는 구획흐름모형의 계산결과는 3차원 수질관리모형의 수리학적 입력자료를 제공하는 부모형에 해당한다. 오염물질의 이송·확산의 정확한 모의는 정확한 수리학적 입력자료의 제공에 직결되는 문제이므로, 보다 세분화되고 정확한 해수유동 모형의 사용이 요구될 수 있다. 그러나, 장기적인 수질관리를 위한 오염물질 농도분포를 수치모의하기 위해서는 시간축적(time scale)의 일치문제가 대두된다. 즉, 수질관리차원의 시간규모로 조명한 해수유동은 장기간에 걸쳐 평균된 양상을 제시하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 준 3차원 해수유동모형을 3차원 수질관리모형의 부모형으로 선정하였다. 선정된 해수유동 모형은 구획유동모형으로 장기간의 유동분석에 적합하며, 수질관리모형의 수리학적 입력자료로 활용이 가능한 결과를 제공할 수 있다.

(2) 오염부하량

대상해역인 진해만에서의 오염부하량은 육지로부터의 유입량, 대기로부터의 유입량, 저층 퇴적물로부터의 유입량으로 구별할 수 있으며, 도시 및 공장지역에서는 육지로부터의 하천 및 하수방류관을 통한 유입량이 대부분을 차지하고 있으며, 하계에는 퇴적물로부터 용출되는 오염물질도 상당한 양을 차지하고 있다. 그리고, 대기로부터 유입되는 오염물질(예, 질소화합물 등)은 관측자료가 미흡하여 오염부하량에서 제외되고 있는 실정이나, 공장이 밀집된 또는 대기오염이 심한 지역에서는 이에 대한 정량적인 평가가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서의 오염부하량은 한국해양연구소(1995, 1996)에서 관측한 하천의 오염부하량 및 저면 퇴적물로부터의 오염물질 용출 부하량을 이용할 계획이다. 그러나, 향후 수질관리모형으로의 활용을 위해서는 육상에서의 공장 및 도시의 규모, 토지이용도, 강우 등의 영향과 관측된 오염부하량과의 관계를 설정하는 작업이 추진되어야 한다. 즉, 육상환

경의 변화에 따른 또는 주변해역환경의 변화에 따른 오염부하량의 변화를 예측하는 모형이 수립되어야 한다. 이 모형은 3차원 수질관리모형에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있는 모형이다. 정확하고 환경변화를 적절하게 반영할 수 있는 오염부하량의 입력은 정확한 수질예측 및 관리를 가능하게 한다. 따라서, 본 연구에서 구성하고 있는 3차원 수질관리모형은 해수유동 모형 및 오염부하량 예측모형의 수립, 3차원 수질모형의 보정 및 검증을 통한 수립의 과정을 통하여 개발·적용될 수 있다.

(3) 입력자료

수질관리모형의 입력자료는 대상해역의 유동, 대상해역으로의 오염부하량, 대상해역에서의 외부환경(기상), 해역내부에서의 오염물질간 반응, 모형의 구조적 매개변수 등으로 분류할 수 있다. 대상 해역의 유동 및 대상해역으로의 오염부하량은 관련 부모형의 수치모의에 의한 계산결과를 연계하여 사용할 수 있으나, 기타 입력자료는 관측, 문헌조사 및 적절한 추정에 의하여 입력하여야 한다. 특히, 모의 수질항목간의 반응을 표현하는 반응계수 및 반응에 영향을 크게 미치는 외부 환경인자의 정확한 입력은 수질관리모형을 이용한 수치계산에 중요한 부분을 차지한다.

따라서, 본 연구에서는 모형의 적절한 보정 및 검증을 위하여 기존의 수질자료를 DB 자료로 정리하였으며, 부유생태계를 표현하는 계수는 한국해양연구소 해양생물연구부의 연구성과를 활용하였다. 또한, 오염물질의 퇴적 및 저층의 오염도 분석은 한국해양연구소 해양지질연구부의 연구성과를 활용하였다. 그리고, 외부환경인자인 광도, 일조시간, 기온 등의 자료는 마산 측후소의 자료를 활용하였다.

그러나, 3차원 수질관리모형에서 요구하는 정확도 및 형식에 맞게 모든 입력자료가 가용한 상태가 아니므로, 입력이 곤란한 것은 문헌 및 기존 연구방법 등을 참고하여 적절한 추정을 통하여 선정·입력하였다.

4. 수질모형의 보정 및 검증

3차원 수질관리모형을 관리모형으로 활용하기 위해서는 대상해역에서의 수질모델이 수립되어야 한다. 수립된 모델은 해역에서의 모의수질항목에 해당하는 수질관측자료와의 비교를 통하여 보정·검증되어야 한다. 그러나, 입력자료의 정확성에 대한 검토없이 적절한 보정 및 검증이 수행되었다고 볼 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 입력자료의 정확성 검토를 우선 수행하고, 다음 단계로 모형의 보정 및 검증을 수행할 계획이다. 모형의 보정 및 검증을 위한 자료는 기존의 관측자료가 비교적 풍부하므로, 이를 활용하면 가능할 것으로 사료된다.

5. 수질관리모형의 활용방안

수립된 3차원 수질모형을 수질관리모형으로 활용하기 위해서는 장기적인 수질변동에 영향을 미치는 요인의 파악이 우선 되어야 한다. 수질모델의 수립은 현 상황에 대한 모델의 적용성 검토이므로, 수질관리를 위해서는 장래의 수질을 예측하여야 한다. 장래의 수질예측을 위해서는 대규모 개발계획, 환경시설의 건설 등 대상해역의 수질에 영향을 미치는 유역 또는 해역에서의 인간활동에 대한 파악 및 토지이용도의 변화, 인구의 변화, 산업시설의 변화 등을 다각적으로 고려하여 오염부하량의 변화를 예측하여야 한다. 즉, 예상되는 오염부하량을 추정하는 것이 가장 우선적으로 수행되어야 적절한 수질관리 대책을 도출할 수 있으며, 또한 가상 시나리오에 대한 수질모의를

통하여서도 최적의 수질관리대책을 도출할 수 있다.

이를 위해서는, 대상 해역의 GIS 수립 및 오염부하량 예측모형 - 수질관리모형 등과의 연계모의를 수행할 수 있는 시스템이 구축되어야 한다.

제4절 결론 및 토의

연안해역의 수질관리를 자연과학적인 자료에 근거하여 수행할 수 있는 방법을 제시하는 수질관리모형은 해역의 수질모델 수립만으로는 달성할 수 없다. 따라서, 수질관리를 위한 제반 사항(해역의 수질환경에 영향을 미칠 것으로 예상되는 모든 개발계획 및 환경시설 등을 포함)의 규정 및 오염부하량의 변화 파악이 병행되어 추진되어야 한다. 기존의 연구가 수질모형의 수립을 위한 해역의 수환경 변화 파악에 중점을 두고 추진되어 오염부하량에 대한 연구는 상대적으로 미진한 실적이다. 그러므로, 제2·3차년도 연구에서는 GIS 수립을 통하여 육지의 오염부하량 변동을 파악하는 연구와 예상되는 오염부하량의 변동 예측에 대한 연구를 수질모형의 수립에 대한 연구와 병행하여 추진하여야 할 것이다. 즉, 해역의 수질변화는 육지의 오염부하량변화, 해역의 해수유동과 밀접한 관련성이 있으며, 그 중요성도 대등한 위치를 차지하고 있으므로, 통합모형 - 병행연구가 수질관리모형 수립 및 활용을 위한 필수적인 연구계획 및 방향으로 사료된다.

참고문헌

- Dailey, J.E. and Harleman, D.R.F. (1972.10). Numerical Model for the Prediction of Transient Water Quality in Estuary Networks. Ralph M. Parsons Lab. for Water Resources and Hydrodynamics, MIT Report No.158. R72-72.
- Edinger, J.E. and Buchak, E.M., 1975.9. A Hydrodynamic, Two-Dimensional Reservoir Model : The Computational Basis. U.S. Army Engineer Div., Ohio River. Contract No. DACW27-74-C-0200.
- Harleman, D.R.F., Dailey, J.E., Thatcher, M.L., Najarian, T.O., Brocard, D.N., and Ferrara, R.A. (1976.8.). User's Manual for the M.I.T. Transient Water Quality Network Model including Nitrogen - Cycle Dynamics for Rivers and Estuaries. Ralph M. Parsons Lab. for Water Resources and Hydrodynamics, MIT Report No.216. R76-216
- Hwang, B., 1995. Modeling remobilization of sediment-bound contaminants in sediments and their fate and transport in overlaying waters, Ph.D. Dissertation, Univ. of Virginia, Dept. of Civil Eng., Environmental Div.
- Jorgensen, S.E. (1994). Fundamentals of Ecological Modelling(2nd Edition). Developments in Environmental Modelling, 19. Elsevier.
- Kirk, J.T.O. 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge Univ. Press.

- Leonard, B.P., 1979. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.19, pp.59-98.
- Morton, M., Stoddard, A. and Pagenkopf, J., 1989. Eutrophication and nutrient enrichment in Peconic Bay : Numerical model of historical conditions of the mid-1970s, *Estuarine and Coastal Modeling*(Edited by M.L. Spaulding), pp.351-360.
- O'Kane, J.P., 1980. *Estuarine Water-Quality Management with Moving Element Models and Optimization Techniques*, Pitman Advanced Publishing Program.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, 1982. *Eutrophication of Waters Monitoring, Assessment and Control*. OECD.
- Park, K. and Kuo, A.Y. 1996. Effect of variation in vertical mixing on residual circulation in narrow, weakly nonlinear estuaries, *Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics*(Edited by D.G. Aubrey and C.T. Friedrichs), *Coastal and Estuarine Studies*, Vol.53., American Geophysical Union.
- Park, K., Kuo, A.Y. and Neilson, B.J. 1993.8. A Modeling Study of Hypoxia and Eutrophication in the Tidal Rappahannock River, Virginia, *Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering* No. 322.

Shukla, J.B., Hallam, T.G., and Capasso, V.(Editor.) (1987). Mathematical Modelling of Environmental and Ecological Systems. Elsevier Science Publishers.

Stoddard, A., Morton, M.R. and Pagenkopf, J.R., 1989. Pre- and post-processing data management approach for eutrophication model of Peconic Bay, Long Island, Estuarine and Coastal Modeling(Edited by M.L. Spaulding), pp.341-350.

Ward Jr., G.H., and Espey Jr., W.H.(Editors). 1971. Estuarine Modeling : An assessment, capabilities and limitations for resources management and pollution control, TRACOR National Coastal Pollution Research Program, Water Quality Office, U.S. EPA.

국립수산진흥원, 1993. 부영양화 및 적조현상 규명에 관한 연구.

국립수산진흥원, 1994.11. 해양환경 관리기술, 부영양화 및 적조현상 규명에 관한 연구, 제2차년도 보고서.

국립수산진흥원, 1993. 7. 한국연안의 적조생물. 김학균, 박주석, 이삼근, 안경호 편집.

양동범 등. 1987.2. 진해만의 질소화합물 순환에 관한 연구. BSPE 00086-145-4. 한국과학기술원 해양연구소.

양동범, 홍기훈 등. 1990.2 진해만의 유기물 순환과 무산소 환경 발생에 관한 연구. BSPE 00148-265-4. 한국과학기술연구원 해양연구소.

유신재 등. 1994.6. 생태계모델링에 의한 해양 생태계 동태 연구(제2차년도).

BSPN 00238-701-3, 해양연구소, 과학기술처.

유신재, 장창익 등. 1993.8. 생태계모델링에 의한 해양 생태계 동태 연구(1차년도). BSPN 00206-624-3, 해양연구소, 과학기술처.

이찬원, 권영택. (1994.12). 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링 (1990 - 1994). 경남대학교 환경문제연구소. 마산시.

조흥연, 1994. 좌표변환에 의한 2차원 수질모형의 개발 및 적용. 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문.

조흥연, 채장원, 1997. 마산만의 장기간 물수지 및 해수교환 특성, 한국해양안·해양공학회지, 제9권, 제2호, pp.74-85.

조흥연, 전경수, 이길성, 한광석, 1993.9, WASP4 모형의 매개변수 추정, - 팔당호를 중심으로 -, 대한토목학회논문집, 제13권, 제4호, pp.177-188.

조흥연, 전경수, 이길성, 1993.9, WASP4 모형에 의한 수질모델링, 한국해양안·해양공학회지, 제5권, 제3호, pp.221-231.

한국해양연구소, 1993.11. 연안 수질예측 모델링 기초연구, BSPE 00333-638-2, 과학기술처.

한국해양연구소, 1993.8. 폐쇄성 연안해역의 수질관리기술 연구(I). BSPN 00205-613-2, 과학기술처.

한국해양연구소, 1994.4. 폐쇄성 연안해역의 수질관리기술 연구(II). 제2차년도 중간보고서, BSPN 00241-720-2, 과학기술처.

한국해양연구소, 1995. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(I), 제1차년도 보고서, BSPN 00260-807-6, 과학기술처.

한국해양연구소, 1996. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(II·III), 제2·3차년도 보고서, BSPN 00322-968-7, 과학기술처.

한국해양연구소, 1997.1. 해양환경 감시 및 평가기술 : 연안수질 평가 및 예측기술 개발, 제2단계 제1차년도 보고서, BSPN 00303-945-2, 환경부, 과학기술처.

한국해양연구소, 1997.12. 해양환경 감시 및 평가기술 : 연안수질 평가 및 예측기술 개발, 제2단계 제2차년도 보고서, BSPN 96339-00-1014-2, 환경부.

황병기, 1997. 수질모델 EUTRO5를 이용한 확산계수 산정법에 관한 연구, 한국수질보존학회지, 제13권, 제3호, pp.275-282.

제6장 결론 및 토의

진해·마산만은 진해시, 창원시, 마산시, 고성군, 통영시, 거제시의 육지부로 둘러 쌓여 있는 전형적인 폐쇄성해역이다. 진해·마산만의 해수 유동경로에 따라 측정된 결과에 의하면 진해·마산만의 외해입구에서 마산 내만으로 들어 올 수록 수질이 점점 악화되는 경향을 보여주고 있다. 진해·마산만의 수질측정결과를 항목별, 지점별, 깊이별, 계절별, 연도별 변화로 나누어 고찰하였다.

적조미생물 발생과 표층으로의 담수(오염물질)유입으로 표층의 수질이 상대적으로 좋지 않았다. 마산만 해수이동경로 해역에서 8년동안의 해수수질 변화추이에 의하면 1997년에는 COD, TSS, 질소의 년평균 농도가 낮아졌으며, 반면에 인의 농도는 증가하였다. 그리고 Secchi disk 투명도는 2.2m로 개선되어 전반적으로 해수수질이 다소 좋아졌다. 진해만의 연도별 수질변화는 일정한 경향 없이 증감을 계속하고 있으며, COD의 경우 1995년 이후부터 서서히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 1997년의 식물 플랑크톤 조사결과는 규조류가 72%, 쌍편모조류가 22%로 대부분을 차지하였으며 97년의 결과를 고찰할 때 식물플랑크톤 대발생이 마산만 수로 전정점에 걸쳐서 나타나지 않았으며 현존량 또한 매우 감소한 점이 특이하였다.

마산·진해만에서 보고된 식물플랑크톤은 총 253종이었고, 그 중 규조류는 151종이고 와편모조류는 89종이었다. 동물플랑크톤은 유충섬모충류 28종, 유행동물 1종, 요각류 33종, 지각류 5종, 모악류 3종, 유형류 2종, 다양한 부유성 유생 등이 보고되었다. 마산만에서 엽록소의 양은 하계에 가장 높았고, 동계에 가장 낮았다. 한편 저층보다는 표층에서 더 높았다. 특히 와편모조류가 우점하는 9월에는 표층의 엽록소양은 저층보다 아주 높았다. 동

물플랑크톤 중 우점하는 요각류의 개체수는 춘계와 추계에 높고 하계에 낮아, 하계의 높은 식물플랑크톤 생물량의 원인 중에 하나인 것으로 판단되었다. 요각류의 초식률($\mu\text{g} \cdot \text{chl-a}/\text{copepod}/\text{d}$)은 전 실험기간을 통해 0.0096~0.2856, 섭식률($\mu\text{g} \cdot \text{C}/\text{copepod}/\text{d}$)은 0.432~12.852 범위였다. 요각류 군집에 의한 초식률($\mu\text{g} \cdot \text{chl-a} \cdot /\text{l}/\text{d}$)의 범위는 표층에서는 0~3.750, 저층에서는 0.014~0.094이었으며, 전 수층에서의 평균 군집 초식률은 0.007~1.850였다. 일반적으로 표층보다는 저층에서 요각류 군집에 의한 섭식률 변화폭이 적었다. 조사해역에서 요각류 군집은 5월에 식물플랑크톤 생물량의 최대 11.9%까지 섭식하였으며, 10월에 가장 낮아 0.2%를 소비하였다.

보다 정확한 수질예측 모델을 개발하기 위해서는 대발생을 일으키는 우점종 식물플랑크톤에 대한 다양한 초식성 동물플랑크톤의 선호도 및 섭식률 측정이 필요할 것이다. 또한 초식자의 개체수 변동이 식물플랑크톤의 생물량을 조절하는 중요한 인자중의 하나이므로, 동물플랑크톤의 개체수를 조절하는 포식자에 대한 연구가 향후 이루어져야 할 것이다. 한편 적조를 유발하는 식물플랑크톤에 대한 요각류의 섭식효과가 낮으므로, 이들을 소비할 수 있는 대체 천적생물을 찾아내 수질개선에 이용하는 것도 과제로 개발해볼 가치가 있다. 환경요인의 변동이 심하고, 동·식물플랑크톤의 군집변화가 단기간에 걸쳐 크게 변화하는 곳에서는 많은 자료를 축적하여야 보다 정확한 모델 개발이 가능할 것이다. 따라서 고정 조사해역에서 장기적인 조사가 이루어져야 할 것이다.

진해·마산만의 표층퇴적물은 일반적으로 분급이 불량한 니질 퇴적물로 구성되어 있다. 표층퇴적물은 마산항(M1)에서는 평균입도가 1996년 8.73 ϕ 에서 1997년 6.73 ϕ 로 조립해졌다. 마산항을 제외하고는 전반적으로 표층퇴적물은 평균입도 및 조성비에서 연변화가 거의 없는 것으로 보인다. 1996년

과 1997년 표층퇴적물에 함유된 중금속 함량을 비교하면, 마산항(M1)에서는 Al, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd이 증가하였다. 마산만내에서는 Cr, Cu, Zn 등이 증가하였으며, 가덕수로내(G2, G3, G4)에서는 Cr, Co, Ni, Cu, Zn 함량이 증가하였다. 가덕수로내의 중금속 함량의 증가는 마산만내에서의 유입보다는 외해의 오염물질의 유입에 의한 것으로 보인다.

진해·마산만에서 수행된 퇴적물의 특성 및 중금속 함량의 연변화 자료는 연안환경의 퇴적학적 변화를 추정할 수 있는 자료로서 활용될 것이다. 퇴적학적 자료는 수질환경 관리모델 구축을 위해 지속적인 자료의 첨가와 수정이 요구되며, 부유물질의 농도 및 성분분석의 추가적인 자료가 요구된다.

진해·마산만의 3차원 수질관리모델은 오염부하량 모형, 장기 해수유동모형 및 수질모형으로 구성된다. 제1단계에서는 3차원 수질모형을 수립하기 위하여, 3차원 장기 해수유동 모형과 3차원 수질모형의 프로그래밍 작업과 입력자료 산정작업을 수행하였다. 또한, 진해·마산만의 3차원적인 수질환경 특성을 보다 자세하게 파악하기 위하여 수온, 염분, DO 항목에 대한 보충측정을 수행하였으며, 모델의 보정 및 검증자료로 활용하기 위하여 해역의 수질항목 및 오염부하량 자료를 DB화 하였다.

본 연구에서 개발하고 있는 3차원 수질관리모형은 오염부하량 추정모형과 수질모형의 보정·검증과정을 수행하면, 진해·마산만의 효율적인 수질관리 방안 및 개발계획에 따른 수질환경의 영향파악을 수행할 수 있다. 또한, 가상의 시나리오에 대하여 적절한 수질변동을 예측할 수 있으므로, 수질개선을 위한 최적 대안을 도출할 수 있으며, 수질환경의 악화에 따른 저감방안을 제시할 수 있다.

진해·마산만의 수질환경 관리모델 개발을 위한 향후 연구계획은 다음과 같다.

- ▣ 수질환경 관리모델 입력자료의 개선을 위한 비점오염원 모델의 수립
- ▣ 3차원 해수유동모형-수질모형 연계가 가능한 모델의 수립 및 검증
- ▣ 자연과학 분야 DB 자료의 가시화(Visualization)와 GIS 연계
- ▣ 진해·마산만 해역의 지속적인 모니터링 및 오염부하량 측정
- ▣ 수질환경관리를 위한 3-D 모델개발시 필요한 부유생태계 자료 제공
- ▣ 식물플랑크톤의 조사로 발생기작을 파악 (방류구 및 양식장 지점)
- ▣ 진해·마산만 퇴적물 특성 및 지화학 분석에 의한 퇴적물 오염도 파악
- ▣ 부유퇴적물 농도 및 성분 분석에 의한 오염부유물질의 거동 특성 규명
- ▣ 진해·마산만 환경오염추적자 (유공충) 분석

제2·3차년도 연구를 수행하면, 진해·마산만의 해역특성에 적합한 해수 순환모형 및 수질모형이 수립되고, 진해·마산만 유역에서의 오염부하량 예측모형이 수립된다. 따라서, 향후 모형의 수립 및 활용을 통하여 진해·마산만 수질관리를 과학적인 자료에 근거하여 수행할 수 있으며, 적절한 수질 관리 개선대책의 도출에 활용할 수 있다.

부 록

부록 A. 자연과학분야 자료 DB 및 현장측정

1. 전산입력(EXCEL 97 FORMAT : DB)

자연과학분야의 자료 DB化 작업의 일환으로 진해·마산만 해역 및 육지에 대한 자연과학분야의 정보를 전산입력하였다. 전산입력된 자료는 3차원 수질모형의 입력 자료 및 보정·검증용 자료로 활용될 계획이며, 향후 수립될 GIS DB 모듈로 전환하여 사용할 계획이다. 전산입력된 주요 자료는 다음과 같다.

- 기상자료 : 기온, 강우량, 증발량, 일조시간, 일사량 (월별 자료)
마산(1985년 개국), 충무(통영), 거제, 부산측후소 : 1976년-현재
- 오염부하량 자료 : 간헐적 일시적인 측정자료(1990년대 이후)
 - 하천별 유량, 오염물질 농도 입력 (주로 마산만 유입하천에 집중)
 - 하수방류량(1993년 11월 가동) 일별자료 :
방류량, 하수처리 전·후의 COD, SS, TN, TP, 염소이온 농도
- 해역에서의 수질측정자료 입력(항목은 일반수질항목 및 영양염류 항목)
 - 자료입력기간 : 1979-1983, 1986, 1988-1991, 1990-1997
 - 자료측정지점, 측정간격은 측정기관, 월별~계절별로 다양
 - 자료의 출처 : 한국해양연구소, 환경부(미입력 : 표층농도만 측정)
- 동·식물 플랑크톤의 생체량 및 개체수 자료 (입력중 : 일부 완료)
- 퇴적물의 입도 및 중금속 농도 분포 자료

	Rainfall(0.1mm)				Temperature(0.1C)			
	Masan(155)	Geoje(294)	Pusan(159)	Chungmu(182)	Masan(155)	Geoje(294)	Pusan(159)	Chungmu(182)
				Tongyoung				Tongyoung
1976	20	32	7	20	14	11	15	15
	884	660	1031	1070	60	63	66	61
	851	959	685	909	77	72	80	79
	2423	2898	2205	2167	126	121	128	127
	1064	1190	936	1066	165	163	166	165
	1429	2007	1008	1271	198	198	197	198
	964	993	950	948	226	226	225	226
	1839	2357	1750	1410	261	250	262	260
	753	955	587	717	203	195	206	207
	680	684	688	668	164	164	169	169
	353	392	319	347	83	76	86	86
	483	611	353	514	47	40	52	50
1977	54	53	39	71	-11	-16	-10	-6
	1	4	0	0	19	15	23	19
	1035	835	1069	1200	81	79	82	81
	3294	3862	2762	3269	133	132	133	134
	1552	1805	1241	1611	172	171	174	172
	1820	1799	1691	1971	199	202	196	200
	1338	1580	1124	1310	251	254	252	248
	748	849	660	734	242	240	243	242
	1385	2119	976	1061	226	222	228	229
	202	176	236	196	188	178	193	193
	1200	1340	1294	966	113	108	114	116
	385	492	341	322	71	60	79	73
1978	241	270	255	197	32	28	34	34
	334	385	336	280	29	27	29	30
	898	1049	852	792	76	72	80	76
	400	506	347	347	136	136	138	134
	129	113	139	135	181	179	183	182
	5328	6701	6049	4233	210	213	208	210
	834	913	683	925	266	269	263	265
	1196	1238	771	1578	268	266	270	268
	902	1142	907	657	222	214	225	226
	738	864	683	667	166	166	171	171
	821	748	1143	573	117	109	121	120
	295	312	274	299	60	52	67	62
1979	528	553	754	278	47	43	49	49
	764	833	662	807	63	47	68	66
	496	477	481	529	84	78	88	85
	1577	1765	1420	1546	124	122	124	126
	1659	1679	1668	1630	172	169	175	173
	3656	4663	3363	2761	212	216	210	210
	2665	3523	2252	2219	236	239	237	237
	4051	4106	3171	4876	267	256	269	267
	2147	2400	2132	1910	216	213	217	217
	86	46	190	23	180	171	186	182
	301	329	271	304	101	95	104	103
	683	781	729	560	69	60	65	62
1980	179	191	184	163	23	21	24	25
	266	339	161	308	19	16	21	21
	1151	1197	1210	1046	78	70	82	81
	1682	1866	1605	1585	121	118	121	123
	2479	2563	2410	2465	173	173	174	171
	1188	1103	1465	996	213	217	213	208
	3815	4680	3190	3574	226	229	226	224
	4181	4129	4494	3920	223	224	220	224
	2095	2908	1802	1674	205	199	206	206
	2160	2601	1916	1966	167	162	160	160
	512	601	499	436	114	106	121	116
	206	183	208	228	23	21	22	27
1981	393	461	354	363	-2	-5	-1	0
	639	617	494	606	26	20	30	26
	303	298	282	330	82	78	86	82
	918	960	1068	737	133	132	136	131

그림 1. 진해·마산만의 기상자료 DB (마산측후소 등; 일부)

	유입량	BOD	COD	SS	Cl	T-P	T-N	방류량	BOD	COD	SS	T
94-01-01	54000							66420				
94-01-02	63792							77367				
94-01-03	51160		28.1	205	5730			67527		37.2	110	
94-01-04	61920		37.2	175	3417			73308		27.1	140	
94-01-05	72000		28.1	175	1566			82656		25.1	125	
94-01-06	16848		66.3	185	1566			19065		33.1	105	
94-01-07	8640							8979				
94-01-08	11520							12792				
94-01-09	47664							54243				
94-01-10	67680		48.2	195	7560			88437		44.2	90	
94-01-11	81792		31.1	185	6727			92865		29.1	90	
94-01-12	74160		32.1	220	9040			93357		22.1	100	
94-01-13	106560		33.1	215	4855			120294		23.1	90	
94-01-14	84960		32.1	260	4036			90651		25.1	190	
94-01-15	67680							86715				
94-01-16	70560							85731				
94-01-17	87120		38.2	230	3673			84501		30.1	155	
94-01-18	83088		54.2	100	1402			98892		41.2	65	
94-01-19	66960		41.2	210	2541			76998		36.1	95	
94-01-20	69120		28.1	185	1139			84255		22.1	105	
94-01-21	63360		34.1	120	883			71955		24.1	90	
94-01-22	73440		34.1	185	2691			87945		25.1	75	
94-01-23	59760							68019				
94-01-24	86400		38.2	110	2719			101967		30.1	70	
94-01-25	110160		35.1	115	565			117957		26.1	85	
94-01-26	88560		40.2	240	4943			98646		32.1	130	
94-01-27	85480		41.2	295	5593			94587		25.1	145	
94-01-28	108378		46.2	270	5908			108365		25.1	120	
94-01-29	80948		44.2	215	1032			80938		31.1	135	
94-01-30	76993							76980				
94-01-31	146450		48.2	235	4947			146423		41.2	145	
94-02-01	141969		36.1	245	2990			134295		26.1	140	
94-02-02	163152		40.2	195	5410			163138		37.2	110	
94-02-03	152935		34.1	220	4164			152902		29.1	125	
94-02-04	130535		22.1	290	5050			130509		20.1	190	
94-02-05	127115		36.1	95	3270			127115		28.1	65	
94-02-06	137248		38.2	115	4157			137236		30.1	70	
94-02-07	125967		34.1	255	6483			125945		28.1	105	
94-02-08	153504		33.1	82	4124			153481		31.1	58	
94-02-09	117906	24	34.1	82	4880			117906	23	31.1	46	
94-02-10	85487							85500				
94-02-11	63830							63818				
94-02-12	129450	32.7						129441	21.9			
94-02-13	102020	50.9						102020	44.9			
94-02-14	120299	31	32.1	106	5162			120281	28	22.1	96	
94-02-15	136800		37.2	158	5593			136574		35.1	104	
94-02-16	131455		32.1	160	2316			131432		27.1	60	
94-02-17	132864		35.1	78	2210			132851		32.1	66	
94-02-18	131100		39.2	90	3488			131120		35.1	64	
94-02-19	112893	85.4	44.2	144	1490			112913	72.9	35.1	88	
94-02-20	108012	92.9	37.2	82	2811			108012	67.9	30.1	58	
94-02-21	122550	89.9	43.2	72	2486			122570	68.9	34.1	56	
94-02-22	111605	92.9	40.2	74	4322			111625	61.9	39.2	64	
94-02-23	150015	48	41.2	92	4237			150035	22	37.2	48	
94-02-24	137471	88.4	37.2	96	4265			137491	59.9	36.1	52	
94-02-25	125254	58.5	50.2	96	3044			125274	62	29.1	44	
94-02-26	115440	60	39.2	96	3700			115920	48.9	29.1	44	
94-02-27	114378	135.6	34.1	66	6546			114858	46	31.1	42	
94-02-28	140213	67.4	46.2	70	5692			140893	50.9	33.1	48	
94-03-01	107054	51						107534	47.9			
94-03-02	126420	77.9	37.2	66	7273			126900	40	23.1	60	
94-03-03	114485	49.5	40.2	90	4329			114965	51	42.2	56	
94-03-04	138961	54	42.2	80	2578			139431	42.9	34.1	58	
94-03-05	125540	57	39.2	84	1822			126020	48	34.1	52	
94-03-06	117655							118135				
94-03-07	139077	72	33.1	96	3319			139557	34	32.1	42	
94-03-08	124255	49.5	37.2	84	6935			124735	46	30.1	40	
94-03-09	125080	57	36.1	128	5437			125560	37	30.1	66	

그림 2. 마산·창원 하수처리장 방류수 자료 DB (일부)

Station	Point	Layer	Temperature	Salinity	pH	DO	COD	SS	Tran.	Ammonia	Nitrate	Nitrite
199505	KNA1	U	19.30	29.10	8.85	15.70	10.30	13.00		0.864	1.093	0.043
		M	19.20	29.90	8.71	14.10	8.00	10.00		0.630	1.066	0.063
	KNA2	U	19.00	29.40	8.80	14.00	9.20	11.00		0.808	0.576	0.010
		M	18.00	30.20	8.43	9.80	6.40	9.00		0.599	0.907	0.024
	KNA3	U	16.70	30.50	8.82	8.70	6.00	11.00		0.387	0.759	0.016
		M	15.70	31.00	8.54	4.30	5.20	8.20		0.406	0.808	0.011
	KNA4	U	17.70	31.40	8.91	12.40	6.80	7.00		0.420	0.643	0.009
		M	16.90	30.90	8.64	9.30	6.20	8.00		0.404	0.596	0.007
	KNA5	U	15.50	31.80	8.64	5.80	7.60	8.00		0.382	0.699	0.007
		M	17.30	31.00	8.91	13.10	5.80	8.00		0.273	0.611	0.009
	KNA6	U	16.90	31.80	8.88	9.20	5.00	5.00		0.302	0.546	0.008
		M	16.90	31.20	8.76	7.60	3.80	6.00		0.300	0.646	0.006
KNA7	U	16.30	31.60	8.85	11.20	5.40	7.00		0.281	0.520	0.008	
	M	16.10	31.10	8.74	8.70	4.20	6.00		0.266	0.536	0.007	
KNA8	U	16.10	31.40	8.90	8.70	3.60	6.00		0.291	0.624	0.006	
	M	17.80	31.80	8.84	9.40	3.80	8.20		0.288	0.558	0.008	
KNA9	U	17.20	31.30	8.94	8.10	4.20	5.00		0.290	0.544	0.007	
	M	16.90	31.00	8.96	8.00	3.60	7.00		0.270	0.532	0.010	
KNA10	U	16.30	31.20	8.87	8.40	2.40	6.00		0.287	0.572	0.006	
	M	16.10	30.90	8.70	3.00	1.80	3.00		0.264	0.524	0.005	
KNA11	U	15.10	31.60	8.78	8.00	2.40	5.00		0.286	0.532	0.008	
	M	15.90	31.40	8.51	8.50	1.60	4.00		0.302	0.365	0.006	
KNA12	U	15.70	30.90	8.07	8.30	1.80	4.00		0.296	0.536	0.007	
	M	15.60	31.60	8.73	7.40	4.00	7.00		0.286	0.536	0.007	
KNA13	U	16.20	30.40	8.16	8.60	2.60	6.00		0.247	0.629	0.009	
	M	15.70	31.50	8.52	9.20	2.40	4.00		0.217	0.512	0.008	
199506	KNA1	U	15.60	30.20	8.84	8.00	1.60	9.00		0.280	0.403	0.008
		M	21.70	28.40	8.67	6.70	9.60	10.00		0.061	0.642	0.037
KNA2	U	20.20	29.20	8.01	3.20	8.80	6.00		0.838	0.623	0.032	
	M	19.60	29.00	8.00	2.80	8.20	4.00		0.547	0.687	0.032	
KNA3	U	22.30	30.70	8.77	11.60	6.00	11.00		0.327	0.663	0.062	
	M	20.60	31.20	8.31	6.60	7.20	13.00		0.612	0.672	0.016	
KNA4	U	16.80	31.10	8.04	3.10	8.80	8.00		0.484	0.470	0.013	
	M	21.60	31.00	8.59	10.30	4.80	6.00		0.399	0.524	0.009	
KNA5	U	19.90	31.60	8.12	4.70	8.80	4.00		0.210	0.464	0.004	
	M	18.80	31.60	8.03	3.90	5.60	6.00		0.219	0.488	0.003	
KNA6	U	20.60	30.90	8.49	9.80	7.20	7.00		0.382	0.488	0.084	
	M	19.90	31.60	8.36	6.40	7.20	8.00		0.369	0.619	0.003	
KNA7	U	20.50	31.80	8.52	7.50	4.00	5.00		0.385	0.456	0.006	
	M	20.30	31.40	8.42	7.70	5.60	7.00		0.371	0.490	0.006	
KNA8	U	20.70	30.60	8.45	7.70	4.80	5.00		0.321	0.513	0.003	
	M	19.30	31.60	8.23	6.10	2.40	4.00		0.287	0.452	0.002	
KNA9	U	20.40	30.70	8.35	6.40	4.00	6.00		0.326	0.480	0.014	
	M	20.30	30.80	8.37	7.10	2.40	3.00		0.410	0.465	0.020	
KNA10	U	19.20	30.70	8.16	5.40	4.20	4.00		0.296	0.464	0.006	
	M	20.20	31.20	8.31	7.00	3.20	4.00		0.288	0.496	0.005	
KNA11	U	20.40	31.90	8.35	7.00	2.60	6.00		0.276	0.476	0.008	
	M	20.20	31.80	8.24	7.50	4.00	6.00		0.324	0.452	0.011	
KNA12	U	20.20	32.00	8.35	6.80	3.60	7.00		0.287	0.436	0.003	
	M	20.10	32.10	8.35	7.10	2.60	3.00		0.310	0.428	0.008	
KNA13	U	20.20	30.20	8.34	7.60	4.20	6.00		0.412	0.436	0.014	
	M	20.20	31.30	8.35	6.90	3.60	4.00		0.361	0.420	0.020	
199507	KNA1	U	19.50	31.10	8.28	6.40	3.80	8.00		0.317	0.436	0.005
		M	26.60	22.00	9.49	14.20	12.60	13.00		1.110	0.680	0.078
KNA2	U	21.00	30.80	8.32	6.90	5.80	8.00		0.740	1.080	0.010	
	M	23.50	25.50	8.23	4.60	4.00	6.00		1.080	0.980	0.021	
KNA3	U	24.90	28.60	8.96	10.80	8.40	11.00		0.720	0.760	0.014	
	M	20.60	31.50	8.82	0.70	7.60	10.00		0.680	0.710	0.008	
KNA4	U	19.00	32.50	8.21	1.10	8.20	14.00		0.530	0.930	0.001	
	M	25.00	30.20	8.77	11.10	6.40	12.00		0.460	0.470	0.008	
KNA5	U	20.20	31.80	8.70	2.80	8.00	12.00		0.560	0.600	0.010	
	M	18.50	32.80	8.31	2.90	5.40	8.00		0.360	0.480	0.012	
KNA6	U	24.00	31.00	8.63	6.90	6.80	5.00		0.330	0.330	0.005	
	M	20.00	32.20	8.61	4.80	3.80	4.00		0.270	0.320	0.006	
KNA7	U	18.50	32.60	8.59	3.80	3.80	7.00		0.300	0.380	0.006	
	M	22.00	31.20	8.52	7.00	5.20	6.00		0.410	0.290	0.002	
KNA8	U	19.50	31.80	8.50	5.90	3.80	3.00		0.310	0.300	0.001	
	M	18.00	32.30	8.54	5.40	6.40	3.00		0.230	0.450	0.001	
KNA9	U	20.50	31.90	8.39	5.00	5.00	7.00		0.460	0.430	0.008	
	M	20.00	32.00	8.41	6.20	7.60	6.00		0.430	0.660	0.006	
KNA10	U	18.00	31.80	8.40	6.30	6.20	6.00		0.420	0.470	0.007	
	M	21.00	33.20	8.54	8.30	5.20	7.00		0.384	0.487	0.011	
KNA11	U	19.50	31.50	8.50	7.40	4.30	6.00		0.412	0.464	0.007	
	M	18.00	31.80	8.61	6.80	6.00	7.00		0.364	0.610	0.008	
KNA12	U	21.50	32.00	8.37	9.20	4.80	6.00		0.424	0.434	0.009	
	M	21.00	32.00	8.52	8.80	4.00	3.00		0.342	0.493	0.005	
KNA13	U	20.00	32.00	8.52	6.80	3.50	5.00		0.402	0.461	0.014	
	M	20.50	32.50	8.50	8.50	4.30	4.00		0.387	0.518	0.005	
KNA14	U	19.50	32.00	8.47	7.00	3.80	5.00		0.365	0.436	0.008	
	M	20.00	31.50	8.40	7.30	3.60	4.00		0.377	0.436	0.006	
KNA15	U	21.00	31.50	8.22	8.90	2.40	7.00		0.328	0.448	0.002	
	M	20.50	32.00	8.15	8.10	2.80	8.00		0.337	0.520	0.003	
KNA16	U	18.00	32.00	8.23	6.20	3.20	9.00		0.432	0.450	0.003	
	M	25.50	28.00	7.71	9.40	2.80	6.00		0.242	0.428	0.016	
KNA17	U	20.00	31.50	7.71	4.40	1.60	4.00		0.270	0.436	0.005	
	M	19.00	32.50	7.75	2.80	1.20	4.00		0.457	0.683	0.014	
KNA18	U	22.00	32.00	8.17	8.50	1.20	5.00		0.365	0.564	0.009	
	M	22.00	32.00	8.17	8.20	3.20	6.00		0.222	0.420	0.012	
KNA19	U	19.00	32.50	8.02	5.50	4.00	4.00		0.210	0.516	0.010	
	M	22.00	32.00	8.18	8.80	4.40	4.00		0.220	0.472	0.005	
KNA20	U	22.00	32.00	8.00	7.80	3.60	6.00		0.300	0.468	0.012	
	M	18.00	32.00	7.87	2.70	1.20	3.00		0.280	0.524	0.020	

그림 3. 전해·마산만 수질항목자료 DB (일부)

Zooplankton Abundance in Masan Bay (from Excel'97 DB Format)

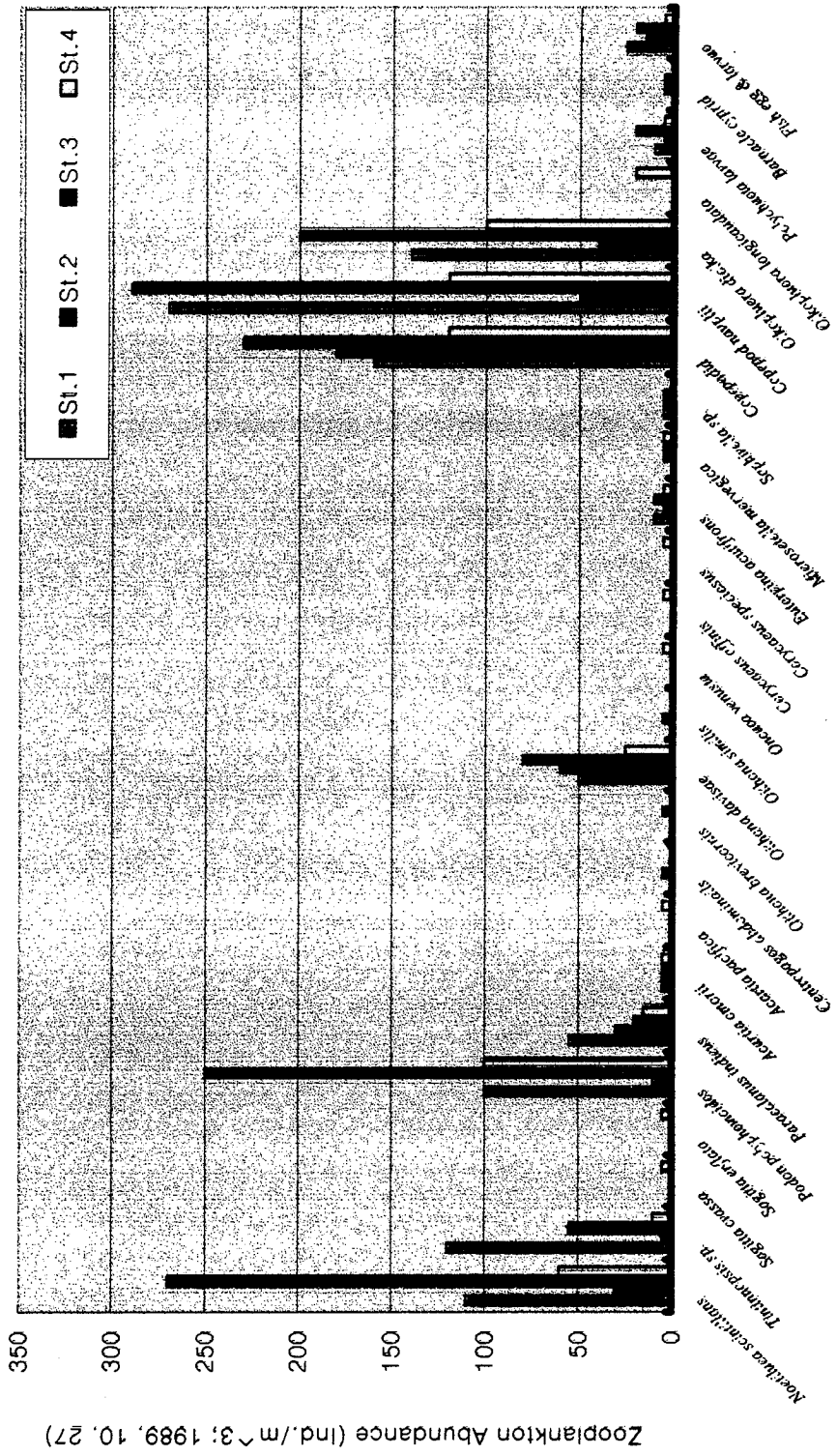


그림 4. 동물플랑크톤 DB 자료를 이용한 막대그래프

Station	Al(%)	Fe(%)	Mn(ppm)	V(ppm)	Cr(ppm)	Co(ppm)	Ni(ppm)	Cu(ppm)	Zn(ppm)	Pb(ppm)	Station	Cd(ppm)	
97-B01	8.5	3.9	892	90	67	14	34	97-B01	34	119	28	97-B01	0.2
97-B02	8.3	3.8	1246	89	66	15	34	97-B02	36	123	29	97-B02	0.2
97-B03	8.5	3.8	742	93	66	15	36	97-B03	37	114	27	97-B03	0.2
97-B04	8.4	3.7	651	96	66	16	38	97-B04	39	125	29	97-B04	0.3
97-C00	9.4	3.7	594	81	72	13	30	97-C00	91	368	67	97-C00	2.3
97-C01	7.7	3.5	531	92	52	13	25	97-C01	59	180	42	97-C01	0.7
97-C02	8.1	3.9	606	96	65	14	35	97-C02	52	195	39	97-C02	0.8
97-C03	6.8	3.7	487	92	59	14	36	97-C03	48	194	37	97-C03	0.8
97-C04	7.7	3.6	868	80	49	13	32	97-C04	36	134	29	97-C04	0.3
97-C05	8	3.7	959	87	60	14	33	97-C05	37	124	28	97-C05	0.2
97-C06	8.8	3.8	656	88	55	13	29	97-C06	52	183	40	97-C06	0.7
97-D01	8.8	3.9	834	91	62	16	38	97-D01	41	122	28	97-D01	0.2
97-D02	6.0	3.4	625	85	66	14	32	97-D02	29	113	24	97-D02	0.1
97-D03	8.1	3.6	611	71	48	14	33	97-D03	33	112	27	97-D03	0.2
97-D04	8.2	3.6	611	79	61	13	30	97-D04	30	106	25	97-D04	0.2
97-D05	7.6	3.5	573	83	58	13	30	97-D05	32	108	26	97-D05	0.1
97-F01	8.2	3.9	781	85	66	16	37	97-F01	43	133	30	97-F01	0.3
97-F02	7.8	3.7	940	85	49	15	35	97-F02	38	121	28	97-F02	0.2
97-F03	8.5	3.8	1025	87	56	14	35	97-F03	34	117	28	97-F03	0.2
97-F04	8.4	3.9	644	84	62	15	33	97-F04	37	117	27	97-F04	0.3

그림 5. 퇴적물의 중금속 농도자료 DB (일부)

Heavy Metal Distribution (1997)

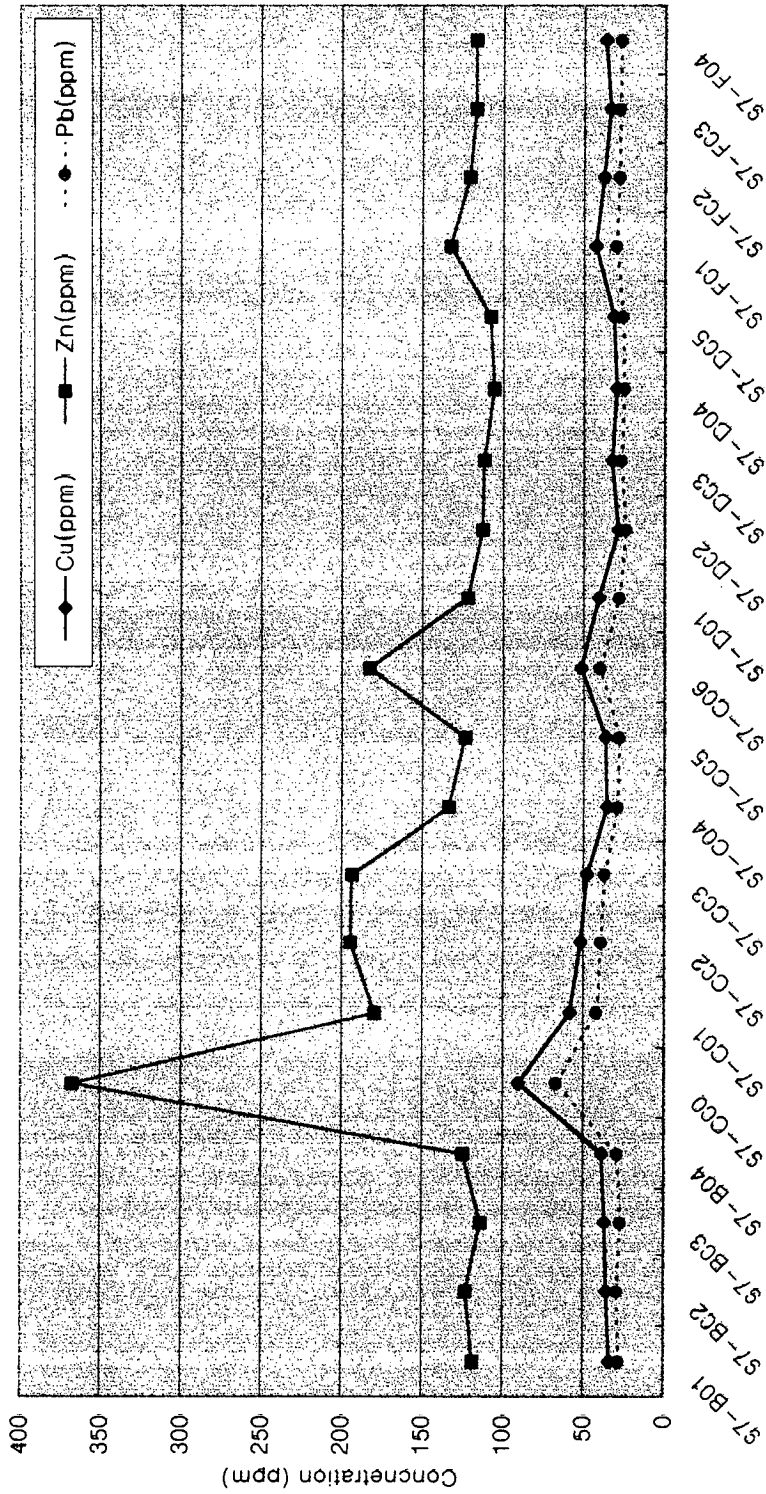


그림 6. 중금속 DB 자료를 이용한 막대 그래프

Heavy Metal Distribution (1997)

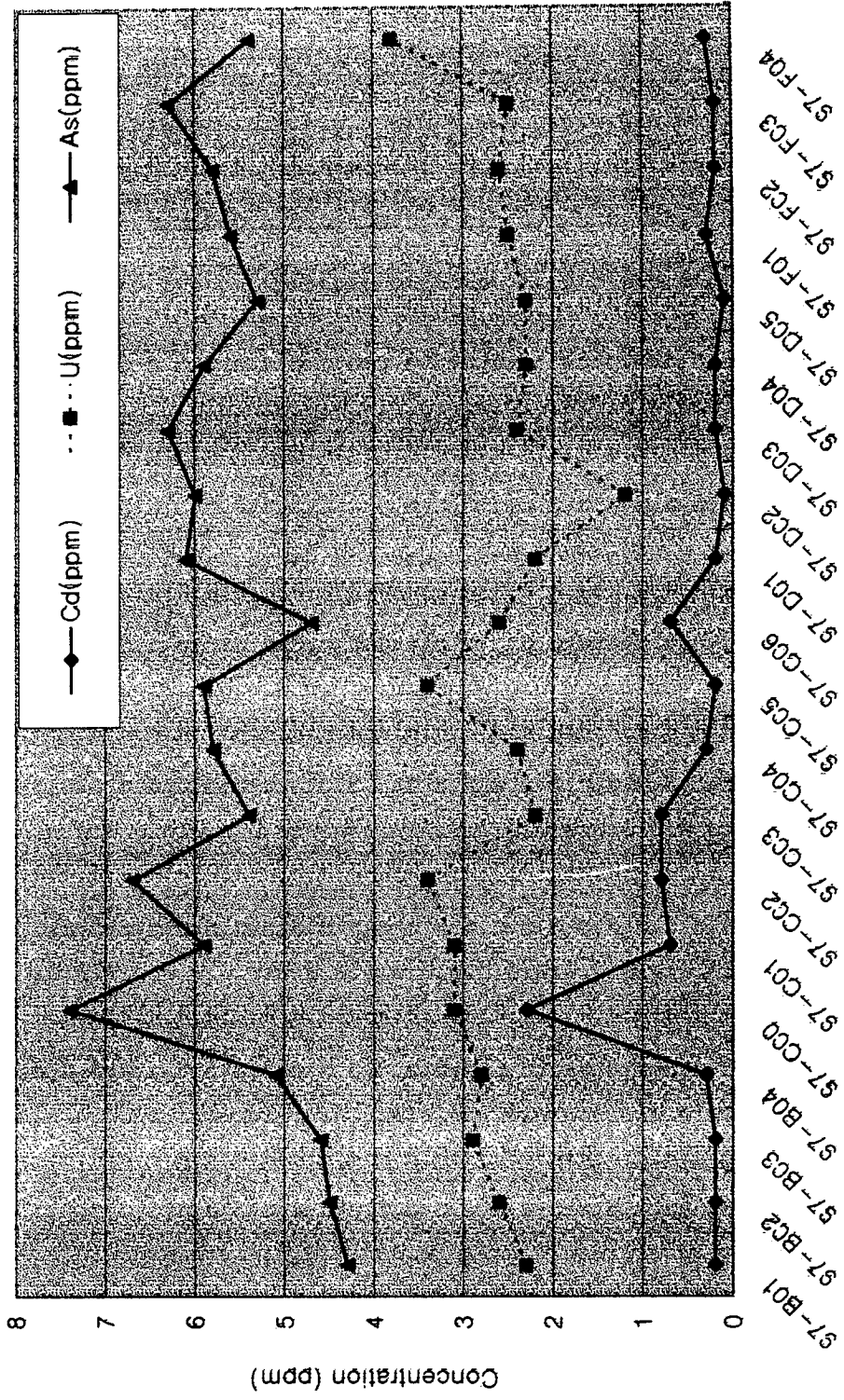


그림 7. 중금속 DB 자료를 이용한 막대그래프(계속)

2. 진해·마산만 현장 수질측정

1997년의 진해·마산만 현장출장은 기존의 수질자료 분석과정에서 보완이 필요하다고 판단된 지점 및 항목의 세세한 측정에 목표를 두고 수행되었다. 보완측정은 진해군항에서의 수질측정 및 DO 측정으로 구분된다. 진해군항에서의 수질측정은 1997년 4월 23일-24일, 9월 23일-24일 2차에 걸쳐 진해군항내 15개지점에 대하여 일반 수질항목 및 STD 관측을 실시하였으며, 1998년에는 하계 7-8월경에 수질측정을 수행할 계획이다. 진해군항내의 수질측정은 이 지역이 일반선박의 항행이 금지된 구역이기 때문에 수질자료가 진해·마산만의 타 지점에 비하여 극히 미흡한 실정이다. 그러나, 마산만의 입구에 위치하고, 비교적 넓은 면적을 차지하고 있는 이 지역에 대한 수질조사는 해군과의 협조관계를 긴밀히 유지하면서 향후 지속적으로 추진하여야 할 사항으로 사료된다.

한편, 1997년 10월 7일-8일에는 DO 일변화를 파악하기 위하여 돌섬 및 하수방류관 지점에서 DO 농도의 시간변화량을 표층 및 연직방향에 대하여 관측하였다. 관측결과를 분석해보면, 돌섬의 DO 일변화는 매우 큰 변화를 보이고 있는 반면, 하수방류관 지점의 DO 농도는 8.1-8.3(mg/l) 범위의 값으로 큰 변화를 보이지 않고 있었다. 또한, 1997년 12월 16일-17일에는 진해만 전역 20여개 지점에 대하여 CTD 및 DO 관측을 수행하였다. 겨울철 관측에 해당하는 12월 관측시에는 수질항목의 성층화는 명확하게 드러나지 않고, 연직방향으로 일정한(거의 변화 없는) 값을 보이고 있으며, 지점별로만 농도변화를 보이고 있었다. 본 과업의 제2차년도 수행시기인 1998년도에도 계절별 또는 월별로 지속적으로 수행하여, 연직방향의 수온, 염도 및 DO 성층화 시기 및 현상을 파악하고 3차원 수질모형의 보정·검증자료로 활용할 예정이다.

* 1997년 10월 7일

Time	수온(℃)	DO(mg/l)
9:20:00	21.00	5.86
9:30:00	20.80	5.88
9:40:00	20.90	5.86
9:50:00	21.00	5.86

10:00:00	21.00	5.87
10:10:00	21.00	5.91
10:20:00	21.00	5.80
10:30:00	21.20	6.13
10:40:00	21.20	6.10
10:50:00	21.30	6.37

11:00:00	21.40	6.61
11:10:00	21.40	6.66
11:20:00	21.30	6.87
11:30:00	21.30	7.10
11:40:00	21.30	7.00
11:50:00	21.30	7.11

12:00:00	21.30	7.27
12:10:00	21.30	7.15
12:20:00	21.30	7.26
12:30:00	21.30	7.42
12:40:00	21.40	7.53
12:50:00	21.40	7.39

13:00:00	21.40	7.47
13:55:00	21.30	7.57

14:00:00	21.30	7.22
14:10:00	21.20	7.36
14:20:00	21.20	7.26
14:30:00	21.30	7.82
14:35:00	21.30	8.02
14:40:00	21.30	7.94
14:50:00	21.30	8.35

15:00:00	21.40	8.73
15:10:00	21.40	8.52
15:20:00	21.40	9.03
15:25:00	21.50	9.20
15:30:00	21.50	9.46
15:40:00	21.50	8.99
15:45:00	21.40	8.82
15:50:00	21.40	8.70
15:55:00	21.40	8.78

Time	수온(℃)	DO(mg/l)
16:00:00	21.40	8.69
16:15:00	21.40	8.45
16:20:00	21.40	8.82
16:30:00	21.40	8.77
16:40:00	21.30	8.69
16:50:00	21.30	8.60
16:55:00	21.30	8.30
16:58:00	21.30	8.03

17:00:00	21.30	8.56
17:10:00	21.30	8.46
17:20:00	21.30	8.42
17:30:00	21.40	8.50

* 1997년 10월 8일

Time	수온(℃)	DO(mg/l)
8:20:00	20.80	5.40
8:30:00	20.80	5.79
8:40:00	20.60	6.17
8:50:00	20.60	6.40
8:55:00	20.40	6.57

9:00:00	20.50	6.42
9:10:00	20.60	6.50
9:20:00	20.80	6.49
9:30:00	20.80	6.68
9:40:00	20.90	6.88
9:50:00	20.90	6.70

10:00:00	20.90	6.63
10:10:00	21.00	6.55
10:20:00	21.10	6.81
10:30:00	21.10	7.03
10:40:00	21.20	7.23
10:50:00	21.30	7.85

11:00:00	21.30	7.54
11:10:00	21.40	8.57
11:20:00	21.50	10.80
11:26:00	21.60	10.03
11:30:00	21.60	9.49
11:30:22	21.60	9.57
11:30:44	21.60	9.79
11:31:06	21.60	9.25
11:31:28	21.60	9.81
11:31:50	21.60	8.43
11:32:12	21.60	8.59

Time	수온(℃)	DO(mg/l)
11:32:34	21.60	8.54
11:32:56	21.60	9.06
11:33:18	21.60	8.85
11:33:40	21.60	9.00
11:34:02	21.60	8.49
11:34:24	21.60	8.44
11:34:46	21.60	8.55
11:35:00	21.60	8.47
11:40:00	21.70	8.52
11:50:00	21.80	8.59

12:00:00	21.90	8.55
12:05:00	21.90	11.70
12:10:00	21.90	13.00

13:50:00	22.80	15.88

14:00:00	22.70	13.28
14:05:00	22.70	12.75
14:06:00	22.70	10.13
14:06:00	22.70	10.45
14:08:00	22.60	10.30
14:09:00	22.60	12.96
14:09:30	22.60	13.20
14:10:00	22.60	12.60
14:10:10	22.60	12.30
14:10:20	22.60	11.89
14:10:30	22.60	11.25
14:10:40	22.60	10.96
14:10:50	22.60	10.87
14:11:00	22.60	10.75
14:11:10	22.60	10.65
14:11:20	22.60	10.61
14:11:30	22.60	10.78
14:11:40	22.60	10.83
14:12:00	22.60	10.93
14:12:10	22.60	10.79
14:12:20	22.60	10.81
14:12:30	22.60	10.99
14:12:40	22.60	11.03
14:12:50	22.60	11.01
14:13:00	22.60	10.76
14:13:10	22.60	10.46
14:13:20	22.60	10.47
14:13:30	22.60	10.60
14:13:40	22.60	10.52
14:13:50	22.60	10.28
14:14:00	22.60	9.65
14:14:10	22.60	9.26

Time	수온(℃)	DO(mg/l)	14:25:00	22.10	10.80	16:05:10	21.90	11.03
			14:26:00	22.10	10.69	16:05:20	21.90	10.96
14:14:20	22.60	8.33	14:27:00	22.10	10.68	16:05:30	21.90	11.16
14:14:30	22.60	8.82	14:28:00	22.10	10.04	16:05:40	21.90	10.50
14:14:40	22.60	9.70	14:29:00	22.10	9.83	16:05:50	21.90	10.10
14:14:50	22.60	10.05	14:30:00	22.10	10.89	16:06:00	21.90	10.15
14:15:00	21.60	10.23	14:31:00	22.10	10.78	16:06:10	21.90	10.43
14:15:10	21.60	10.35	14:32:00	22.10	10.49	16:06:20	21.90	10.71
14:15:20	22.60	10.72	14:33:00	21.10	10.51	16:06:30	21.90	11.11
14:15:30	22.60	11.15	14:34:00	21.10	10.65	16:06:40	21.90	11.05
14:15:40	22.60	11.74	14:35:00	21.10	10.96	16:06:50	21.90	11.18
14:15:50	22.60	11.50	14:36:00	21.10	10.82	16:07:00	21.90	11.20
14:16:00	22.60	11.64	14:37:00	21.10	10.65	16:07:10	21.90	11.47
14:16:10	22.60	11.72	14:40:00	21.10	10.65	16:07:20	21.90	11.25
14:16:20	22.60	11.62	14:41:00	21.10	10.47	16:07:30	21.90	10.76
14:16:30	22.60	11.37	14:42:00	21.10	10.49	16:07:40	21.90	10.99
14:16:40	22.60	11.47	14:44:00	21.10	10.19	16:07:50	21.90	11.23
14:16:50	22.60	11.35	14:45:00	21.10	10.35	16:08:00	21.90	11.10
14:17:00	22.60	11.35	14:50:00	21.90	10.40	16:08:10	21.90	11.19
14:17:10	22.60	11.37	14:55:00	21.90	10.13	16:08:20	21.90	11.67
14:17:20	22.60	11.38				16:08:30	21.90	11.73
14:17:30	22.60	11.33	15:00:00	21.90	10.48	16:08:40	21.90	11.43
14:17:40	22.60	11.25	15:10:00	21.80	10.33	16:08:50	21.90	10.62
14:17:50	22.60	11.15	15:20:00	21.70	9.49	16:09:00	21.90	10.52
14:18:00	22.60	11.03	15:30:00	21.70	9.81	16:09:30	21.90	10.40
14:18:10	22.60	10.87	15:40:00	21.70	9.82	16:09:50	21.90	10.78
14:18:20	22.60	10.92	15:50:00	21.70	9.59	16:10:00	21.90	10.98
14:18:30	22.60	11.10				16:10:30	21.90	11.09
14:18:40	22.60	11.25	16:00:00	21.80	9.71	16:11:00	21.90	11.58
14:18:50	22.60	11.19	16:00:30	21.90	9.76	16:11:30	21.90	11.74
14:19:00	22.60	10.96	16:01:00	21.90	9.51	16:12:00	21.90	11.82
14:19:10	22.60	10.72	16:01:30	21.90	9.79	16:12:30	21.90	11.90
14:19:20	22.60	10.79	16:02:00	21.90	9.93	16:13:00	21.90	11.68
14:19:30	22.60	10.83	16:02:10	21.90	9.77	16:13:30	21.90	11.32
14:19:40	22.60	10.92	16:02:20	21.90	9.88	16:25:00	21.70	10.27
14:19:50	22.60	10.93	16:02:30	21.90	10.49	16:30:00	21.70	9.47
14:20:00	22.60	10.99	16:02:40	21.90	10.98	16:40:00	21.60	9.66
14:20:10	22.60	11.01	16:02:50	21.90	11.42	16:47:00	21.60	9.20
14:20:20	22.60	11.03	16:03:00	21.90	11.87	16:50:00	21.60	9.18
14:20:30	22.60	11.10	16:03:10	21.90	11.52	16:55:00	21.50	9.04
14:20:40	22.60	11.27	16:03:20	21.90	11.81			
14:20:50	22.60	11.37	16:03:30	21.90	11.85	17:00:00	21.50	9.02
14:21:00	22.60	11.46	16:03:40	21.90	12.01	17:05:00	21.50	8.86
14:21:10	22.60	11.37	16:03:50	21.90	12.17	17:10:00	21.40	8.69
14:21:20	22.60	11.00	16:04:00	21.90	12.25	17:20:00	21.40	8.72
14:21:30	22.60	11.18	16:04:10	21.90	12.30	17:25:00	21.20	8.16
14:21:40	22.60	11.43	16:04:20	21.90	12.18	17:28:00	21.20	7.91
14:21:50	22.60	11.41	16:04:30	21.90	11.66	17:30:00	21.20	7.31
14:22:00	22.60	11.41	16:04:40	21.90	11.55	17:40:00	21.20	8.27
14:22:30	22.60	11.37	16:04:50	21.90	11.64	17:50:00	21.20	7.50
14:23:00	22.60	11.37	16:05:00	21.90	11.43	17:55:00	21.20	7.25

부록 B. 해양방류에 의한 주변해수 수질변화 검토

1. 서론

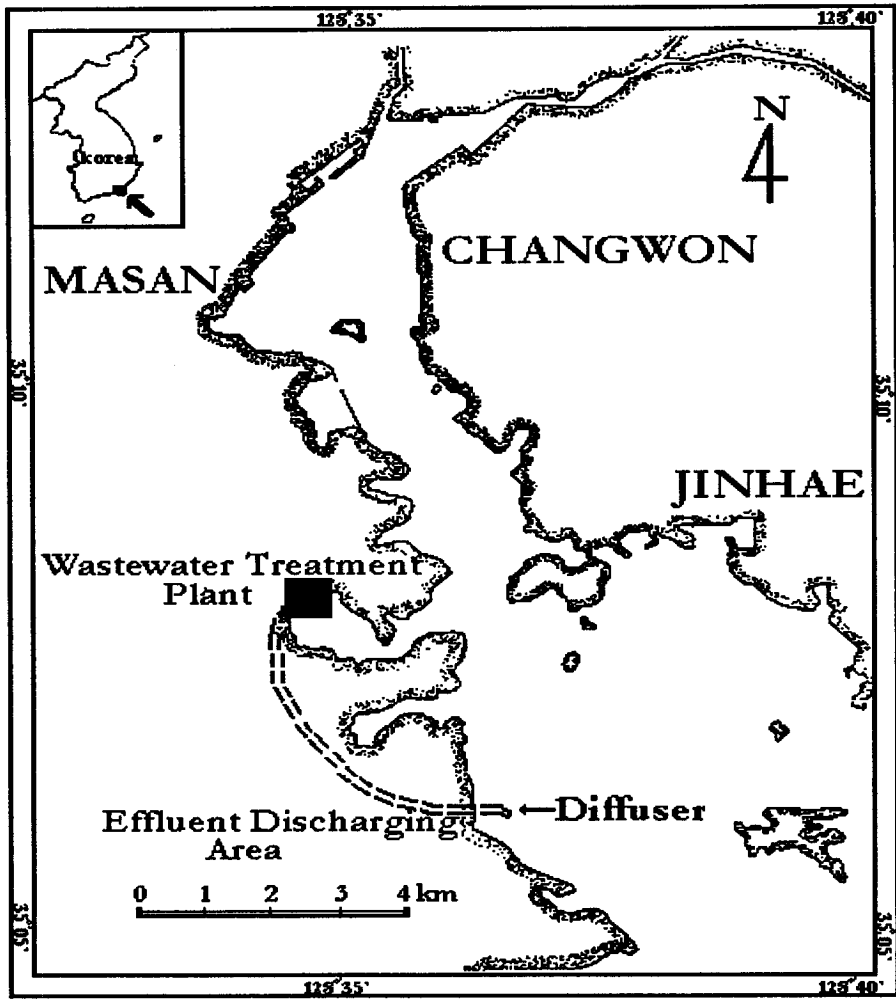
마산만의 수질오염 문제를 해소하기 위한 대책으로 마산시와 창원시에서 발생하는 하수를 차집하여 해양방류하기 위해 마산·창원 하수처리장 및 차집관거 매설공사가 1984년 4월에 공사가 착공되었다. 1차처리시설을 하수처리장이 1993년 11월에 준공됨에 따라 경상남도 창원군 구산면 옥계리에서 현재 다중확산관을 통해 해양방류를 시행하고 있다[그림 1]. 본 연구에서는 하수처리후 해양 방류되고 있는 하수가 해양 수질에 미치는 영향을 CORMIX2 모형을 사용하여 해석하였다.

2. CORMIX2 모형

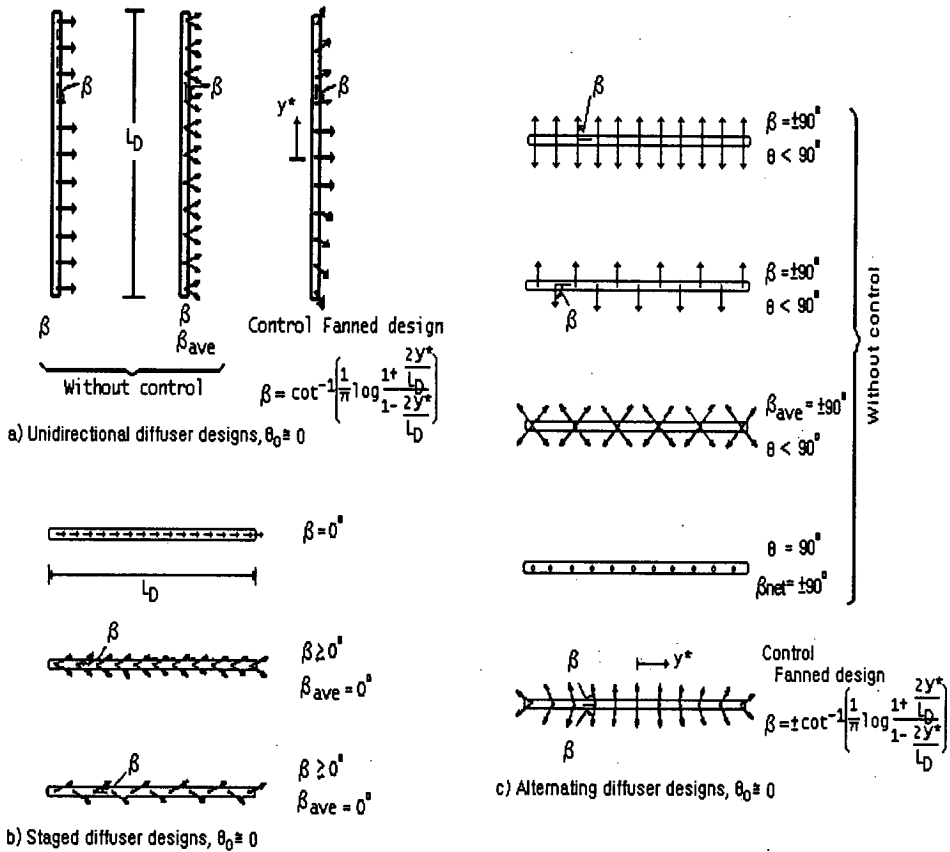
CORMIX2 모형은 오염물질이 자연 수괴로 방류되는 경우에 대하여 비전문가가 확산현상을 해석할 수 있도록 개발된 CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System) 모형의 일부로 오염물질이 다중확산관(multi-port diffuser)을 통하여 수중으로 방류되는 경우에 확산현상을 해석하기 위한 프로그램이다. CORMIX 모형은 미국 환경청(EPA)의 지원으로 Cornell 대학의 Akar and Jirka(1990)에 의해 개발된 모형으로 BOD, COD, 온도 등과 같은 일반오염물질과 독성 오염물질의 초기혼합 및 희석과정을 모의하도록 개발된 모형으로써, 수중 단일확산관 방류시 확산해석을 위한 CORMIX1 모형, 수중 다중확산관 방류시 확산해석을 위한 CORMIX2 모형, 표층방류시 확산해석을 위한 CORMIX3 모형으로 구성되어 있다.

가. 다중확산관

다중확산관은 하수가 해양으로 방류시 발생되는 수질오염을 최소화하기 위해 수중에 설치되는 구조물로 강한 유속으로 하수를 방류하여 초기 희석효과를 높이기 위해 많은 수의 포트 또는 노즐이 일정한 간격으로 배치되어 있다([그림 2]). 다중확산관을 통한 방류시스템은 높은 희석률로 인하여 처리



[그림 1] 마산-창원시 하수종말처리장의 해양방류 위치도



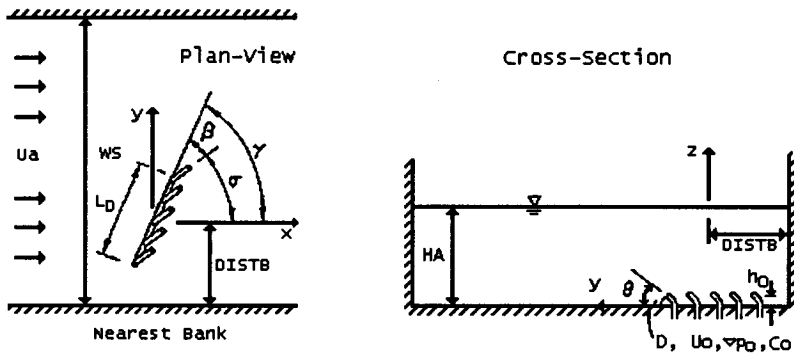
[그림 2] 다중확산관의 종류 및 형태(Jirka and Hinton, 1992)

또는 미처리된 하수를 해양으로 방류하는 방법으로 외국에서 널리 사용되어 왔으며, 최근에 엄격해지고 있는 수질기준은 다중확산관의 사용을 더욱 증가시켰다. 최근에는 국내에서도 발전소로부터 방출되는 온배수에 의한 수온상승을 저감하기 위한 노력으로 다중확산관 방류시스템이 검토되고 있으며, 일부 발전소에서는 방류시스템의 구조에 대하여 설계중에 있다. 따라서, 마산시와 창원시에서도 증가하고 있는 마산-진해만의 수질오염을 저감시키기 위

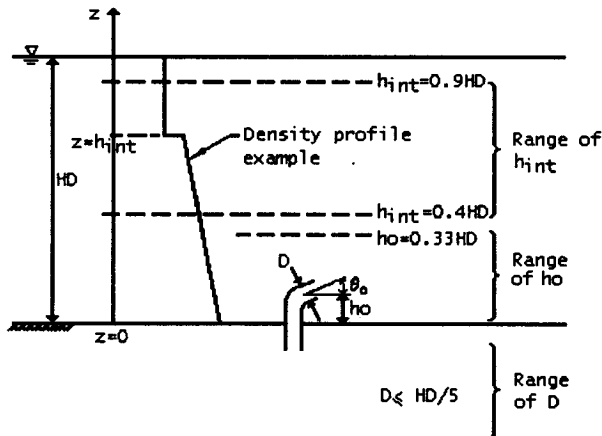
한 방법으로 다중확산관을 설치하게 되었다.

나. 다중확산관의 해역내 설치형상

모형에서 다중확산관의 배치는 [그림 3]과 같이 해역에 설치되어 있는 것으로 가정한다. 방류구 주변특성 인자는 방류구로부터 육지경계까지 거리, 대표적인 주변해수의 유속, 밀도성층 특성 등이다(Jirka and Akar, 1991).



a) Definition Diagram CORMIX2 (Special case: $HA=HD$)



b) Limits of Applicability CORMIX2

[그림 3] 다중확산관의 수중 설치형상(Jirka and Hinton, 1992)

[그림 3]에서 L_D 는 확산관의 길이이며, 확산관의 중간점은 육지로부터 DISTB 떨어진 거리에 있다. 확산관 길이방향의 흐름방향에 대한 각도 γ 가 0인 경우는 흐름방향과 다중확산관 설치방향이 일치하는 경우이고, 90도 인 경우는 서로 직각되는 경우이다.

다중확산관에 있어서 확산에 가장 큰 영향을 미치는 동적인 인자는 운동량플럭스($Q_o U_o$)와 부력플럭스($g_o Q_o$, $g_o = g(\rho_a - \rho_o)/\rho_a$)이다. 확산관 운동량 플럭스는 방향성을 가지고 있기 때문에 θ_o 와 β 같은 방류각도는 확산에 큰 영향을 미친다. 이에 따라 확산관을 노즐의 배치양상에 따라 [그림 2]와 같이 세가지로 분류할 수 있다. 일방향으로 방류되는 일방향확산관(unidirectional diffuser)과 양방향으로 방류하는 양방향확산관(alternating diffuser), 그리고 확산관의 축방향으로 방류하는 축방향확산관(staged diffuser)으로 분류한다. 양방향확산관은 방출운동량이 주변수의 유동에 거의 영향을 미치지 않으며, 일방향확산관과 축방향확산관은 주변수내에 방출운동량에 의한 흐름을 발생시킨다. 일방향 및 축방향 확산관은 주변수의 흐름이 일정한 경우에 적합한 방법이며, 해안에서와 같이 조석현상에 의하여 흐름의 방향이 변하는 경우에는 양방향 확산관이 적합하다.

다. 다중확산관의 동적거동 해석을 위한 기본 가정

다중확산관에서 방류된 방류수의 동적거동은 방류수심과 방류포트사이의 거리(s)의 비에 따라 두가지 경우로 크게 생각할 수 있다. 방류구사이의 간격이 방류수심에 비해서 큰 경우와 방류수심에 비해 작은 경우이다. 이러한 경우의 확산거동에 2차원 등슬롯확산관의 개념을 가정할 수 있다(Jirka, 1982). 기본 가정은 초기확산시 개별 노즐로부터 방출된 하수가 서로 합쳐지기까지의 초기 3차원 젯트류 현상을 무시한다. 그 대신에 합쳐진 후에 2차원 평면 젯트현상을 폭 $B(= a_o/s, a_o = \text{포트단면적})$ 인 슬롯 확산관으로 가정한다. 이러한 가정은 합쳐진 후에 거동에 주된 관심이 있을 경우에 확산관의 초기 혼합과정에 대한 적절한 가정이라 할 수 있다.

이러한 가정은 대부분의 확산관 해석에 적용할 수 있으나, 천해역에서 확

산관의 경우에는 3차원 거동을 고려하는 것이 바람직하다. 이 경우에는 단일 방류관의 확산 개념(Jirka and Doneker, 1991)을 동시에 고려해야 한다.

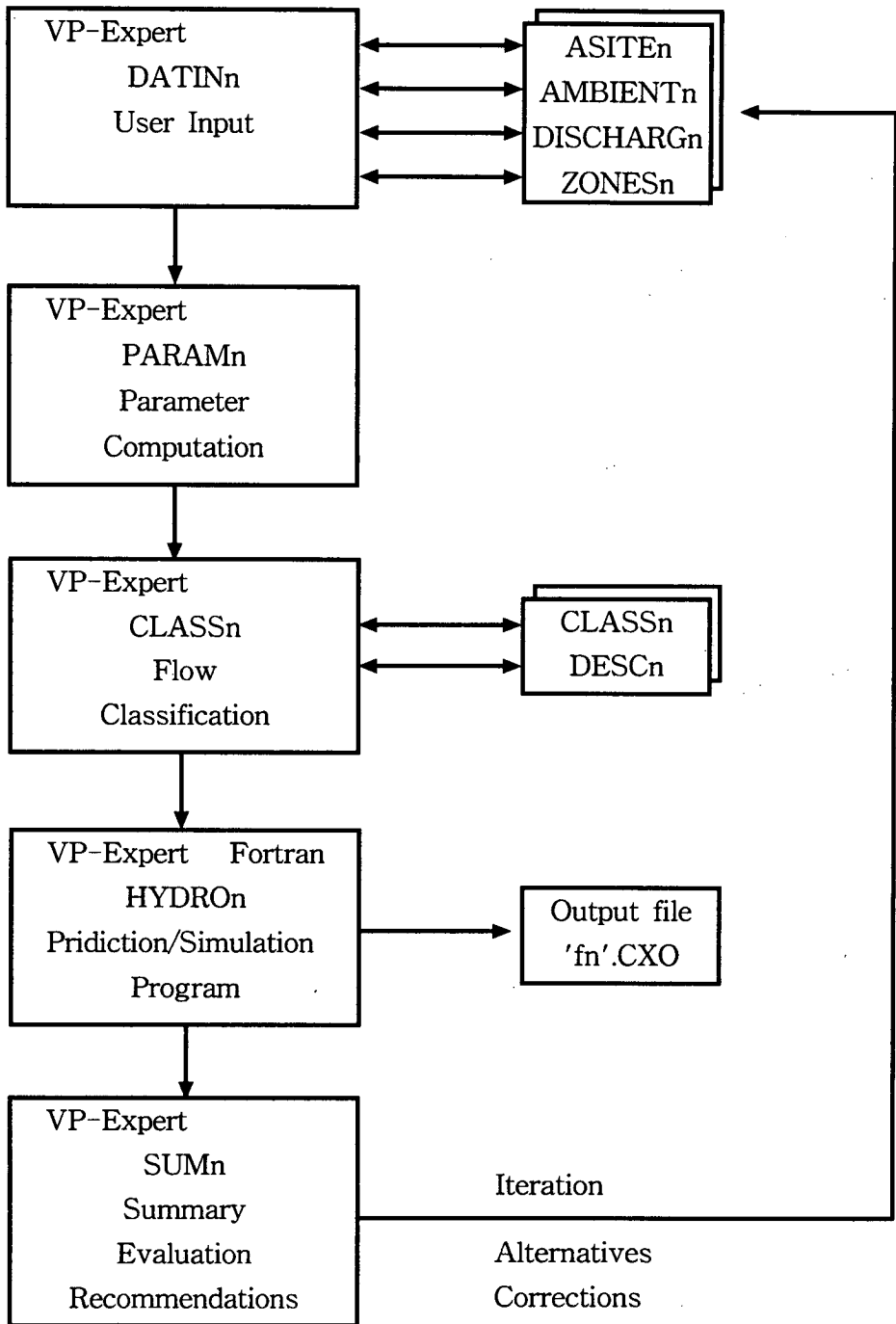
라. 확산에 영향을 미치는 인자

다중확산관으로부터 방출된 하수가 확산하는 데 영향을 미치는 주요인자는 자유수면의 위치(방류수심), 주변수의 밀도성층, 방류속도, 주변수의 흐름 등이다.

자유수면 즉 공기와 물의 경계에서는 부력제트의 상향운동을 가로막는다. 그리고 방류지점의 수표면은 제트의 운동에너지로 인하여 약간의 상승이 일어나고 일정한 층을 이루면서 횡적으로 확산 및 이송이 일어난다. 주변수의 밀도성층은 방류되는 물질이 상승하는 과정에서 주변수와 밀도가 동일해지면 내부흐름(internal current)의 모습으로 확산과 이송이 발생하게 한다. 이는 하수확산관을 심해에 설치할 때 중요한 설계요소이나, 천해에 위치하는 온배수확산관에서는 밀도차가 상대적으로 작기 때문에 중요하지는 않다. 방류속도는 방류초기 운동량에 관계되는 것으로 유속이 크면 방류초기 혼합과정에서 운동량에 의한 영향이 크게 나타나 하수가 방류구로부터 먼거리까지 부력효과 및 주변수의 유동의 영향을 거의 받지 않고 이동하게 된다. 그러나, 유속이 작으면 방류시 바로 주변수의 흐름과 부력효과에 의하여 제트의 방향이 바뀌게 된다. 한편, 주변수의 유속은 강할수록 혼합효과를 증가시켜 희석효과를 좋게 하여 강한 유속으로 인하여 방출된 하수가 멀리까지 확산하게 한다. 제트의 영향이 확산현상을 주로 지배하는 지역을 근해역(near-field), 주변수의 유동과 부력효과가 확산현상을 주로 지배하는 지역을 원해역(far-field)이라고 한다. 근해역과 원해역사이에 있는 영역을 천이해역(transient-field)이라고 한다.

마. 근해역 흐름의 분류

이 모형은 근해역에서 확산환경에 따른 희석효과를 검토하는 것으로 계산과정은 기하학적인 형태와 방류 주변환경에서의 흐름들을 동수학적인 특성에 따라 흐름을 분류하고 해석적인 방법에 의해 해석한다([그림 4]). 흐름



[그림 4] CORMIX2 모형의 계산흐름도(Jirka and Hinton, 1992)

의 분류는 2차원 또는 3차원 변수들에 기초한 길이규모([표 1])을 사용하여 혼합과정을 이용한다. 이에 따라 흐름현상은 포괄적으로 31개로 분류된다. 이러한 분류는 주변수의 성층화에 따른 변화를 포함하지 않은 것으로 [그림 5]와 같은 4개의 주변수 밀도 성층화 현상을 100여개의 흐름으로 분류된다. 이와 같은 흐름의 분류가 끝나면, 분류된 흐름에 대한 해석적인 결과를 산출하게 된다. 흐름 분류는 크게 다음과 같은 3개의 영역으로 분류할 수 있다.

- a. 선형 성층화 영역에서 내부포획(internal trapping)이 발생하는 흐름 (MS, [그림 6])
 - b. 균일한 밀도분포의 주변수에서의 양의 부력흐름 (MU, [그림 7])
 - c. 균일한 밀도 분포의 주변수에서의 음의 부력흐름 (MNU, [그림 8])
- 흐름에 대한 자세한 분류는 다음의 12개 단계를 거쳐 결정된다.
- 1) Richardson 수에 의한 주변수 밀도분포의 특성의 분석
 - 2) 밀도분포가 A 또는 D(밀도의 급격한 점프가 없는 경우)라면 단계 4)로 간다.
 - 3) 대용 선형경사 ϵ^* ([그림 5])에 의해 저층 부력분포를 근사하고 길이규모 l_m' 과 l_b' 을 계산한다.
 - 4) [그림 6]의 윗부분에 표시된 기준을 사용해서 선형 성층역에서 가능한 흐름 포획을 검토한다. 주변 밀도 성층화가 중요한 요소가 아니라면, 단계 10)으로 간다.
 - 5) 성층이 중요하고, 포획이 일어날 수 있다. 만약 계단식 밀도분포가 아니라면 단계 8)로 간다.
 - 6) 밀도성층 형태가 C라면, 실질적인 밀도경사 ϵ 에 근거를 둔 l_m' 과 l_b' 을 사용하여 내부흐름 포획에 대하여 검토한다. 포획이 밀도약층 아래에서 일어난다면, 단계 10)으로 간다.
 - 7) 포획이 밀도약층에서 일어난다. 평균 저층 밀도를 사용하여 단계 10)을 수행한다.
 - 8) 선형 성층에서 바닥의 영향을 검토한다. 이는 주로 음의 부력인 경우에

[표 1] CORMIX2 모형에서 흐름분류를 위해 사용된 길이규모(Jirka and Hinton, 1992)

Jet/plume transition length scale(L_M)

definition: $L_M = M_0^{3/4} / J_0^{1/2}$

interpretation: For combined buoyant jet flow, the distance at which the transition from jet to plume behavior takes place in stagnant uniform ambient.

Jet/crossflow length scale (L_m)

definition: $L_m = M_0^{1/2} / U_a$

interpretation: In the presence of a crossflow, the distance of the transverse(i.e. across ambient flow) jet penetration beyond which the jet is strongly deflected (advected) by the cross flow. For a strictly co-flowing discharge ($\theta=0$, $\sigma=0$), the length of the region beyond which the flow is simply advected.

Plume/crossflow length scale(L_b)

definition: $L_b = J_0 / U_a^3$

interpretation: the vertically upward or downward flotation distance beyond which a plume becomes strongly advected by crossflow.

Jet/stratification length scale(L_m')

definition: $L_m' = M_0^{1/4} / \epsilon^{1/4}$

interpretation: In a stagnant linearly stratified ambient, the distance at which a jet becomes strongly affected by the stratification, leading to terminal layer formation with horizontally spreading flows.

Plume/stratification length scale(L_b')

definition: $L_b' = J_0^{1/4} / \epsilon^{3/8}$

interpretation: In a stagnant linearly stratified ambient, the distance at which a plume becomes strongly affected by the stratification, leading to terminal layer formation with horizontally spreading flows.

Notes: $M_0 = U_0 Q_0$, kinematic momentum flux
 $J_0 = g'_0 Q_0$, kinematic buoyancy flux
 $Q_0 = U_0 a_0$, source discharge volume flux
 $a_0 =$ port area
 $U_a =$ ambient velocity
 $U_0 =$ port discharge velocity
 $\epsilon =$ ambient buoyancy gradient
 $g'_0 =$ discharge buoyancy = $g(\rho_a - \rho_0) / \rho_a$

[표 1] 계속

Slot jet/plume transition length scale (ℓ_m)

definition: $\ell_m = m_0 / j_0$

interpretation: For combined buoyant jet flow, the distance at which the transition from jet to plume behavior takes place in stagnant uniform ambient.

Slot jet/crossflow length scale(ℓ_m)

definition: $\ell_m = m_0 / U_a^2$

interpretation: In the presence of a crossflow, the distance of the transverse (i.e. across ambient flow) jet penetration beyond which the jet is strongly deflected (advected) by the cross flow. For a strictly co-flowing discharge ($\theta=0, \sigma=0$), the length of the region beyond which the flow is simply advected.

Slot jet/stratification length scale(ℓ_m')

definition: $\ell_m' = m_0^{1/3} / \epsilon^{1/3}$

interpretation: In a stagnant linearly stratified ambient, the distance at which a jet becomes strongly affected by the stratification, leading to terminal layer formation with horizontally spreading flows.

Slot plume/stratification length scale(ℓ_b')

definition: $\ell_b' = j_0^{1/3} / \epsilon^{1/2}$

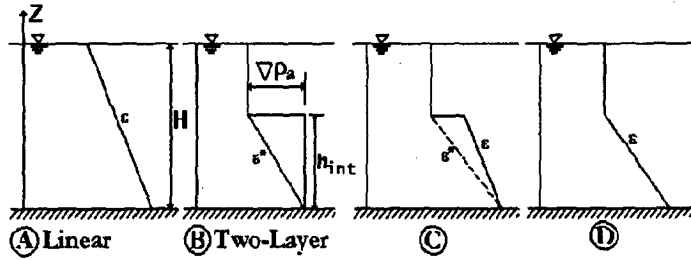
interpretation: In a stagnant linearly stratified ambient, the distance at which a plume becomes strongly affected by the stratification, leading to terminal layer formation with horizontally spreading flows.

Crossflow/stratification length scale (ℓ_b)

definition: $\ell_b = U_a / \epsilon^{1/2}$

interpretation: The vertically upward or downward floatation distance beyond which a plume becomes strongly advected by crossflow.

Notes: $m_0 = U_0 q_0$, kinematic momentum flux per lt
 $j_0 = g'_0 q_0$, kinematic buoyancy flux per lt
 $q_0 = U_0 n a_0 / L_D$, source discharge volume flux
 a_0 = port area
 U_a = ambient velocity
 U_0 = port discharge velocity
 ϵ = ambient buoyancy gradient
 $g'_0 = \text{discharge buoyancy} = g(\rho_a - \rho_0) / \rho_a$
 n = total number of nozzles
 L_D = overall diffuser length



[그림 5] 주변수 밀도 성층화에 대한 근사(Jirka and Doneker, 1991)

발생한다. 단계 12)로 간다.

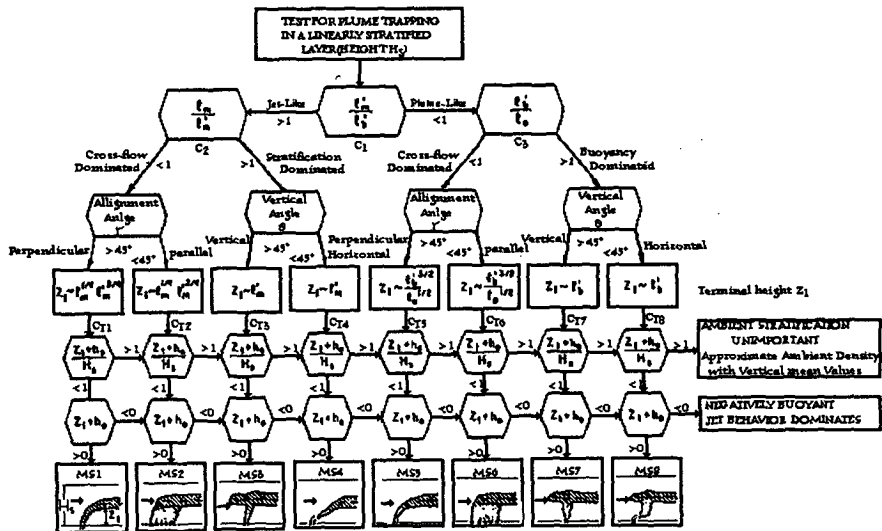
9) 선형 성층화층에서 흐름(MS 흐름) 분류를 마친다.

10) 음의 부력상태인 경우 12)로 간다.

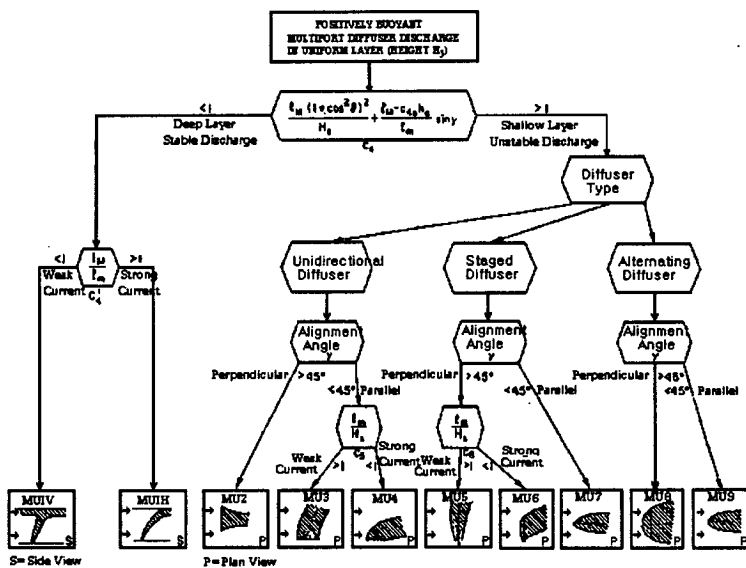
11) 균일 밀도층에서 양의 부력을 받는 흐름(MU 흐름) 분류를 마친다.

12) 음의 부력을 받는 경우에 대한 흐름(MNU 흐름) 분류를 마친다.

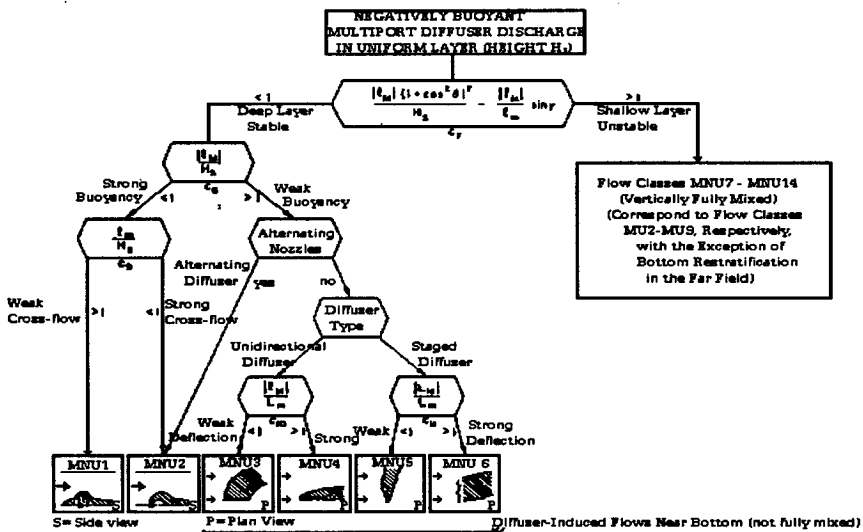
[그림 6] ~ [그림 8]에 사용된 변수 및 상수들의 자세한 값과 분류된 각 흐름에 대한 설명은 Jirka and Akar(1991)에 기술되어 있다.



[그림 6] MS 흐름의 분류(Jirka and Akar, 1991)



[그림 7] MU 흐름의 분류(Jirka and Akar, 1991)



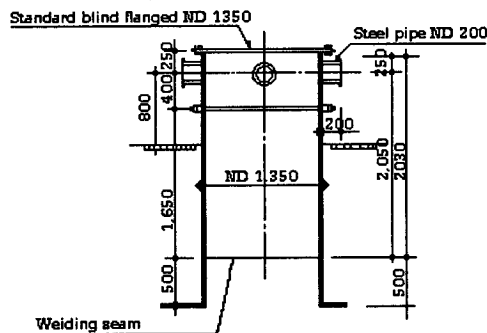
[그림 8] MNU 흐름의 분류(Jirka and Akar, 1991)

3. 해양 방류에 의한 수질변화 분석

위에 기술한 CORMIX2 모형을 사용하여 마산시와 창원시의 하수를 방류하기 위해 설치한 수중 다중방류관을 통한 하수 방류로 예상되는 근해역 수질변화를 대표적인 수질지표인 COD에 대해 실시하였다.

가. 해양방류 현황

마산시와 창원시의 도시하수 및 공장폐수를 차집하여 덕동에 위치한 하수종말처리장에서 1차 침전 처리후 파이프라인을 통해 마산만 입구에서 수중방류하고 있다. 처리된 하수는 공칭직경 2,000 mm인 방류관을 통하여 해안으로부터 680 m 지점(수심 13 m)까지 이동한 후에 총길이 217 m인 다중방류관을 통하여 방류된다([그림 1]). 다중방류관은 해안선과 거의 평행(15도 차이)한 방향으로 총 20개의 Riser가 10 m 간격으로 설치되어 있으며, 각 Riser에는 4개의 포트가 달려있다([그림 9]). 하수종말처리장 시설은 계획시 2단계로 계획되었으며, 계획시 추정 하수량은 1단계 완료시(1990년) 249,855 m³/day, 2단계 완료시(2001년) 365,260 m³/day이다(마산시, 1988). 이에 따라 하수종말처리장이 1993년 11월에 1단계 공사가 완료되어 1995년 현재 200,000 m³/day의 하수를 1차처리후 방류하고 있다(마산시, 1995). 계획 단계별 및 현재의 방류수량 및 COD 농도는 다음과 같다.



[그림 9] 다중확산관에 설치된 Riser의 형상

[표 2] 방류수량과 COD농도

구 분	방류수량 (m ³ /day)	COD 농도 (mg/l)	
		처리전	처리후
1단계 준공시 추정치	249,855	300	175
2단계 준공시 추정치	430,900	280	40
현재(1995년)	365,260	34.4	26.1

[표 2]에서 현재(1995년)의 방류수량이 1단계 준공시보다 수량이 작고, COD 농도가 낮은 이유는 마산시과 창원시에서 발생한 하수가 완전하게 하수차집관거로 유입되어 하수종말처리장에서 처리된 후에 방류되지 않고, 오염된 하수의 대부분이 마산만으로 직접 유입되고 있기 때문이다.

나. 계산결과

위와 같은 1단계 준공시, 2단계 준공시, 현재에 대하여 CORMIX2 모형을 사용하여 처리장에서 처리된 하수가 다중확산관을 통한 해양방류시 초기 확산과정에서 주변해수의 수질에 미치는 영향을 대조기와 소조기의 창, 낙조류시에 대하여 평가하였다. 평가시 주변해수의 조류크기 및 방향은 방류구 부근에서 1983년에 관측한 자료(한국해양연구소, 1992)를 조화분석하여 얻은 반일주조의 조류타원(M₂와 S₂)의 진폭과 방향을 기초로하여 결정하였다. 대조기 조류크기는 M₂와 S₂의 조류타원 장축의 합, 소조기 조류크기는 M₂와 S₂의 조류타원 장축의 차, 흐름방향은 M₂ 분조류의 방향을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 결정된 소조기 대표 유속은 3.5 cm/sec, 대조기 대표 유속은 15.5 cm/sec이다.

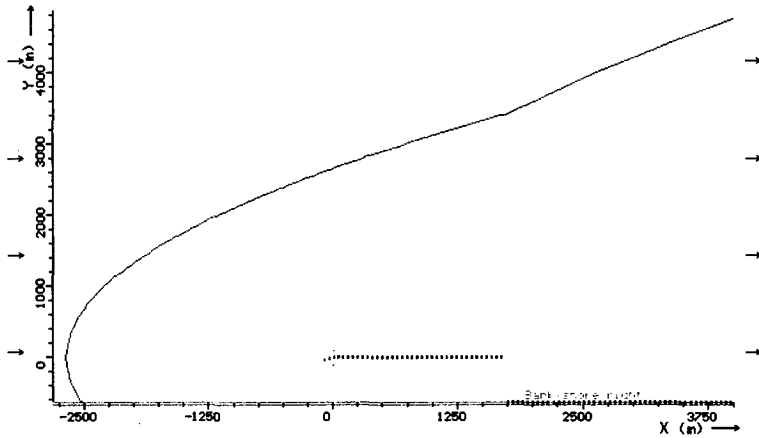
[표 3]은 현재 설치되어 있는 다중확산관을 통하여 3가지 조건의 하수가 방류될 경우에 발생하는 수면에서의 최고 농도와 희석율을 계산하여 정리한 것이다. 표에서 희석율이 높으면, 방류된 하수의 농도가 급격히 감소하여 주변해수에 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다. 수면에서 농도를 보면, 현재

(1995년)는 하수방류로 수면에서 COD 농도가 최고 0.3 mg/l 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 이는 마산시와 창원시의 하수를 완전하게 수집하지 못하기 때문이다. 모든 하수를 완벽하게 수집하여 처리할 경우에는 1단계 준공시에 대한 추정 하수가 해양으로 방류될 것으로 예상되며, 이 경우에는 최고 2.3 mg/l의 COD 농도가 증가하였다. 한편, 2단계 준공시에는 1.5 mg/l를 증가하였다. 조석 조건별로 보면, 창조시와 낙조시의 차는 거의 없었으며, 소조기가 대조기에 비하여 수면에서 수질에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이는 대조기에는 강한 조류로 인하여 방류된 하수가 주변해수와 비교적 활발한 혼합을 겪으나, 소조기에는 약한 조류로 주변해수와 혼합이 거의 발생하지 않기 때문이다. 이는 강한 유속의 흐름이 있는 곳에 방류관을 설치하면, 하수 방류로 인한 해수면에서 COD 농도 증가가 초기의 강한 희석작용으로 저감됨을 의미한다.

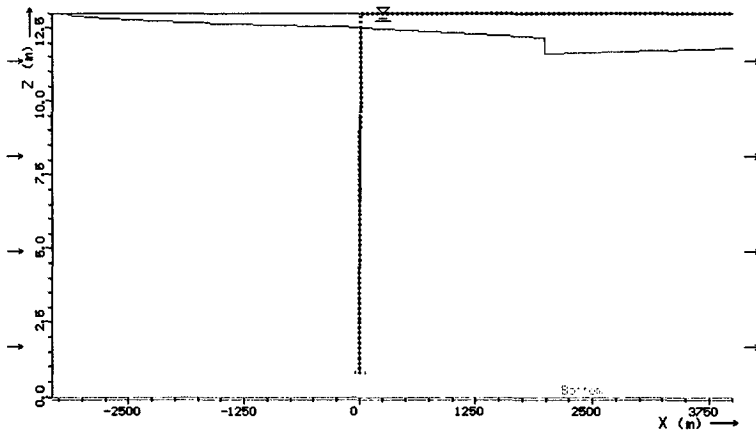
[그림 10]은 1995년 현재 소조기 낙조시 방출하수 플룸의 분포도이다. 그림을 보면, 약한 조류로 인하여 수중에 방류된 하수가 수면으로 바로 떠오르고 조류의 흐름방향으로 이동하면서 수심방향과 수평방향으로 점차 확산하는 모습을 보였다. 1단계 준공시와 2단계 준공시의 확산형태는 현재와 동일하다.

[표 3] 수면도달시 희석률 및 COD 농도($\gamma = 15^\circ$)

조석조건	설계조건	수면도달시 희석률	수면도달시 COD 농도 (mg/l)
소조기 (0.035 m/sec)	1단계 준공시	77.6	2.26
	2단계 준공시	62.6	0.64
	현재(1995)	87.9	0.30
대조기 (0.155 m/sec)	1단계 준공시	109.1	1.60
	2단계 준공시	74.9	0.53
	현재(1995)	136.0	0.19



(a) 수평분포

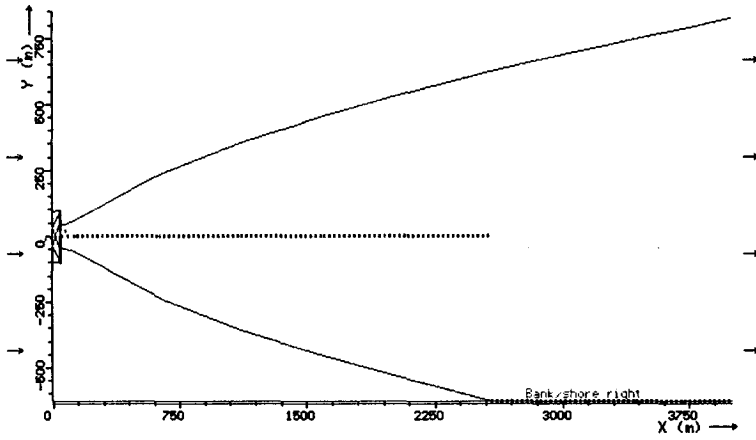


(b) 연직분포

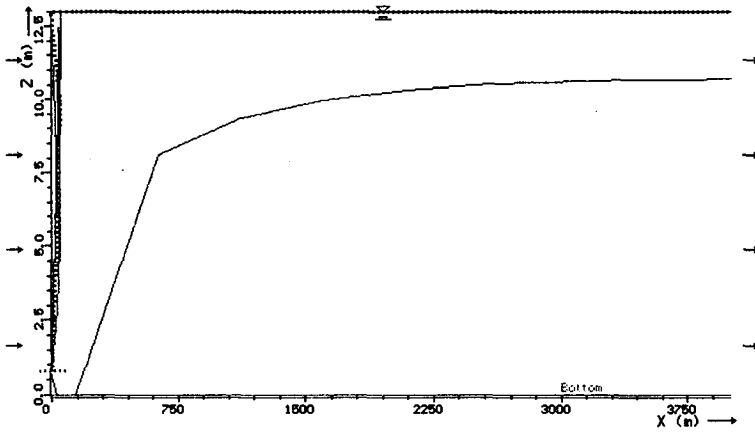
[그림 10] 현재 하수플룸의 분포도(소조기 낙조시)

[그림 11]은 1995년 현재 대조기 낙조시 방출하수 플룸의 분포도이다. 그림을 보면, 소조기에 비하여 강한 조류로 인하여 수중에 방류된 하수가 확산하면서 수면으로 떠오르고 수면부근에서도 유속이 약한 소조기에 비하여 두꺼운 확산층을 이루며 확산하는 모습을 보였다. 수평확산은 소조기에 비하여 확산플룸의 폭이 감소하였다. 소조기에 비하여 연직확산이 활발함에 따라 확산층을 따른 BOD농도 감소도 소조기에 비하여 급격하게 크게 일어났다([그림 12]와 [그림 13]). 그림의 기호 설명에서 15와 90은 확산관축과 주변해수가 흐름방향사이의 각도(γ)이다. 방류구 반경 3,000 m 범위에서 소조기의 농도가 대조기 농도보다 2배이상 높게 나타났다. 이상과 같은 결과를 보면, 유속이 강한 지점으로 방류위치를 선정하는 것이 하수 방류에 의한 초기 농도상승을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 추후에 설치될 2단계 공사후 방류시에는 주변수의 유속이 강한 지점에 다중확산관을 설치하여 방류하여야 하수방류로 인해 방류구 주변해수의 COD 농도가 급격히 상승하는 현상을 방지할 수 있을 것이다.

현재 설치된 방류시스템은 흐름에 대하여 거의 같은 방향($\gamma = 15$ 도)으로 설치되어 있다. 따라서, [그림 10] ~ [그림 11]과 같이 확산기의 축방향과 하수 플룸의 확산축이 거의 일치함에 따라 각 노즐을 통해 방류된 하수가 서로 간섭하는 현상이 발생되었다. 따라서, 방류관의 설치각도에 따른 영향을 검토하기 위하여, 흐름과 직각방향($\gamma = 90$ 도)으로 설치하는 안에 대하여 계산하였다.

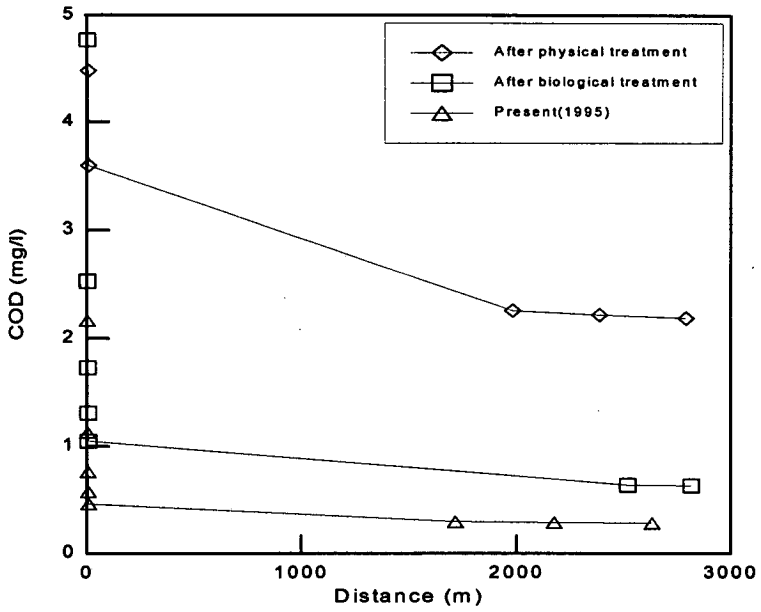


(a) 수평분포

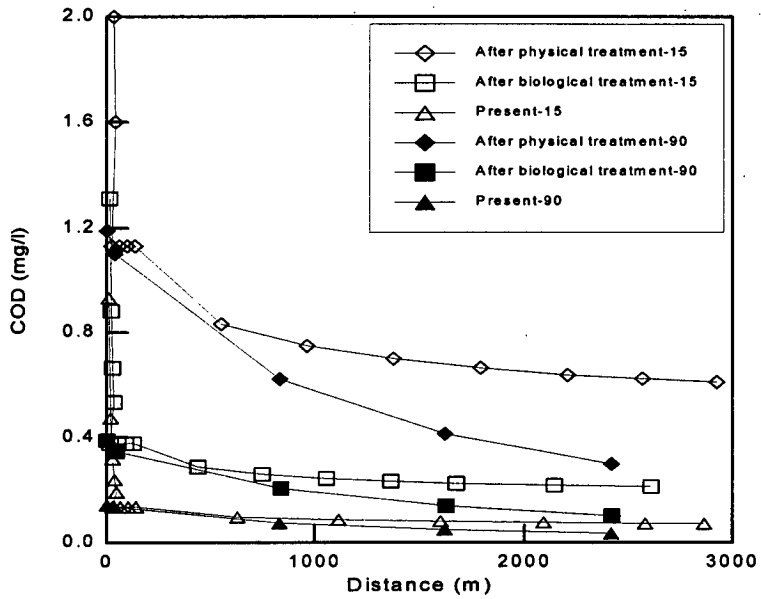


(b) 연직분포

그림 11 현재 하수 플룸의 분포도(대조기 낙조시)



[그림 12] 확산축을 따른 COD 농도의 변화(소조기)



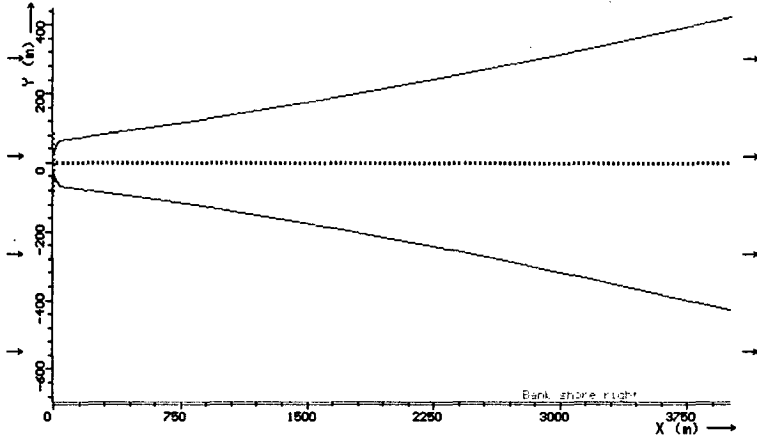
[그림 13] 확산축을 따른 COD 농도의 변화(대조기)

확산관의 방향이 흐름에 직각되어 설치된 경우에 소조기에 대한 결과는 현재 거의 흐름방향에 평행하게 설치된 다중확산관을 통해 방류하는 경우와 거의 차이가 없었으며, 대조기에는 현재의 약 70%로 COD 농도가 감소하였다([표 4]). 소조기에 차이가 나지 않은 이유는 주변해수의 약한 유속으로 인하여 확산관을 통해 방류된 하수가 서로 간섭하지 않기 때문이다. 이 결과로부터 주변 유속이 강한 곳에 확산관을 설치할 때, 확산관의 설치방향이 하수 확산에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 흐름방향에 직각방향으로 설치한 경우에 대한 하수 플룸의 분포도는 [그림 14]와 같다.

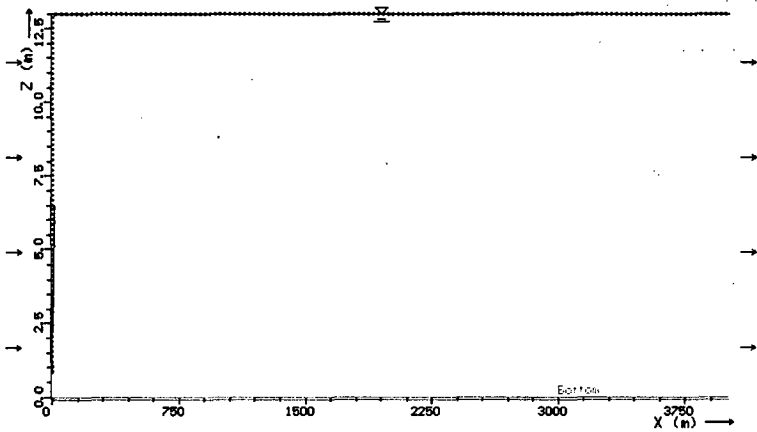
[표 4] 수면도달시 회석률 및 COD 농도 ($\gamma = 90^\circ$)

조석조건	설계조건	수면도달시 회석률	수면도달시 COD 농도(mg / l)
Neap (0.035 m/sec)	1단계 준공시(1990)	77.6	2.26
	2단계 준공시(2001)	62.6	0.64
	현재(1995)	87.9	0.30
Spring (0.155 m/sec)	1단계 준공시(1990)	157.1	1.11
	2단계 준공시(2001)	114.3	0.35
	현재(1995)	190.6	0.14

이상과 같은 계산결과에 의하면, 해양방류는 일부 하수만 차집되어 1차 처리후 방류되는 1995년 현재 최고 0.3 mg/l의 COD 농도를 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나, 1단계 설계시 예상했던 하수가 모두 차집되어 1차 처리후 방류된다면, 최고 2.3 mg/l의 COD 농도 상승을 가져올 것으로 예상된다. 이는 방류 이전에 방류수역의 COD 농도가 년중 1.5 ~ 4 mg/l(마산시, 1992)임을 감안하면, 해양방류로 인하여 최대 약 6 mg/l 까지 COD 농도가 증가할 수 있음을 의미한다. 이는 현재 수질환경기준에 의하면, 2 ~ 3급수(2급수 2 mg/l이하, 3급수 4 mg/l이하)의 수질을 보여 공업용수와 일부 어족의 양식, 산란에 적합한 수질이었던 것이 용수와 양식에 활용할 수 없는



(a) 수평분포



(b) 연직분포

그림 14 확산관 설치방향 변경시 플룸 분포도
(대조기 낙조시)

수질로 변화될 가능성이 있다는 것이다. 또한, 2차처리 시설이 준공되는 경우에도 해양방류로 인하여 최대 1.1 mg/l의 COD 농도를 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서, 2차처리 시설이 완공될 경우에 해양방류지점 인근해역의 수질은 수산생물이 서식할 수 없는 3급수 또는 그 보다 나쁜 상태로 될 것이다.

현재의 방류 위치는 기존의 수질이 2 ~ 3 급수에 이르는 지역에 방류하는 것으로 해양방류로 인한 새로운 수질오염 문제를 야기시킬 가능성이 있다. 이는 단지 마산만내의 수질오염문제를 해양방류구 인근해역으로 옮겨 놓은 것에 불과하다. 따라서, 심각한 마산만내 수질 오염문제를 해결하기 위해서는 방류이전의 해수수질이 비교적 양호하고 주변수의 유속이 강한 지점을 찾아 방류구를 이전하는 방법을 장기적으로 도모해야 할 것이다.

CORMIX2 모형에 의해 계산한 현재 결과는 방류구 주변의 지형적인 변화, 주변해수 흐름분포, COD 의 생화적인 반응 등에 대한 정확한 고려없이 수행된 결과로 방류구 주변의 1차적인 초기 확산과정을 평가하는 데는 문제가 없으나, 만내 수질에 미치는 영향을 정확하게 평가하는 데는 제약이 있다. 따라서, 해양방류로 인한 수질변화를 정확히 평가하기 위해서는 CORMIX2 모형과 수질모형의 연계 운영을 통한 정밀 평가작업이 있어야 할 것이다.

(참고문헌)

마산시, 1988. 마산만 정화사업 기본 및 실시설계 보고서(기본설계편).

마산시, 1992. 마산만 준설에 따른 환경오염 모니터링.

마산시, 1995. 마산만 해양환경 종합 모니터링.

한국해양연구소, 1992. 진해만 해양관측자료집(I) -'82 -'83년도 조류, 조석
및 기상 관측자료 -.

Akar, P. J. and Jirka, G. H., 1990. CORMIX2: An expert system for
hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic
submerged multiport diffuser discharges, Tech. Report, DeFrees
Hydraulics Laboratory, Cornell University, Ithaca, N.Y.

Jirka, G. H., 1982. Multiport diffusers for heated disposal : A summary,
J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 108, No. 12.

Jirka, G. H. and Akar, P. J., 1991. Hydrodynamic classification of
submerged multiport-diffuser discharges, J. of Hydraulic Eng., ASCE,
117(9), pp. 1113-1128.

Jirka, G. H. and Doneker, R. L., 1991. Hydrodynamic classification of
submerged single-port discharges, J. of Hydraulic Eng., ASCE,
117(9), pp. 1095-1111.

Jirka, G. H. and Hinton, S. W., 1992. User's guide for the CORMIX.

부록 C. 진해·마산만 개발여건 및 수질환경개선방안

1. 진해만의 개발 여건

진해만은 거제도-통영시-고성군-마산시-진해시-가덕도로 이어지는 해안선에 둘러싸여 있고, 거제대교가 있는 견내랑에 좁은 개구부가 있으나 이를 통한 조량이 상대적으로 미약하여 가덕도와 거제도 사이의 가덕 수로측만이 개방되어 있고, 나머지는 거의 육지와 섬으로 막혀있는 폐쇄성 해역이다. 또한 이 해역은 연안 오염 특별 관리 해역으로 지정되어 있고, 마산만과 같은 일부해역이나 항만시설이 입지하고 있는 해역을 제외하고는 해수욕장 해역에서의 관광 및 여가선용과 수산생물에 적합한 수질인 II등급 수역으로 분류되어 있다.

이처럼 진해만은 외해로부터 차폐되어있어 비교적 정온한 수역이어서 배후도시나 내륙연계 교통시설만 지원된다면 항만의 개발이나 해면의 매립에 의한 부지조성이 용이한 지역이다. 진해만내 연안에 위치한 항만을 보아도 무역항인 진해, 마산, 고현항이 있고, 1종어항인 광암항이 있으며, 70년대에는 고성 당동만 일대 해역에 대규모의 안정항 개발 계획이 수립과 함께 구체적인 실시설계까지 수행된 적도 있다.

또한 최근에는 진해만의 입구 부근 가덕도 북서측 해안 일대에 21세기 해양한국을 지향하는 컨테이너화물 처리 위주의 대규모 부산신항 개발 계획이 수립되어 지난 1997년 11월 기공식을 거행한바 있고, 마산항도 부족한 항만시설과 함께 마산시의 도시용지 부족을 함께 해결할 수 있는 광역개발기본계획을 수립하고 개발사업 착수를 눈앞에 두고 있다.

금후로도 이 해역은 자연적으로 갖추고 있는 양호한 여건 때문에 항만시설의 확장 또는 신규개발이나 이들 항만과 연계하여 파생, 개발되는 주거, 위락등 도시용지와 산업기지등이 개별업체는 물론 지방자치단체들에 의하여서도 해안매립을 통한 개발러시가 지속될 것으로 예상된다.

○ 항별 부두시설 현황

항 별	항내수역 면적 (백만 km ²)	부 두 시 설 (DWT, 선석)							하역능력 (만톤/년)	
		2만	1만	8천	6천	5천	3천	1천		계
고현항	12.8		1					1	2	53.1
마산항	12.4	13		2	1	1	3	3	23	834.0
진해항	3.52	2						5	7	351.6

이중 최근에 신규로 계획을 수립한 부산신항과 마산항 광역개발 계획을 보면 다음표에서와 같이 부산신항의 경우 33선석의 부두와 함께 512만평의 부지를 매립 조성하고, 마산항은 23선석의 부두를 추가하고, 78만평의 부지를 해안을 매립하여 조성하는 계획을 수립하였다.

○ 신규항만 부두시설 계획 현황

사 업 명	부 두 시 설 (DWT, 선석)							하역능력	부지조성 (만평)
	5만	4만	3만	2만	5천	3천	계		
마산항 광역개발			3	11		9	23	1,129.3 만톤/년	78
부산신항 개발	15	1		15	2		33	456.3 만TEU/년 1,006.5 만톤/년	512

이들 항만시설의 개발은 필연적으로 이와 연계되어 파생되는 산업을 유인하게 되므로서 국토개발과 경제성장의 기반시설 제공이라는 긍정적인 효과와 함께 해양을 위시한 자연환경의 훼손과 악화라는 부정적 영향을 불러 올

수밖에 없다.

여기서는 해양수질에 영향을 미치는 인자와 이들로 인하여 오염되는 해수의 수질정화대책 등에 대하여 검토해 보기로 한다.

2. 해양수질 오염원

해양환경에 부정적인 영향을 미치는 주요 인자는 해안매립에 의한 수면적 및 개펄의 감소와 지형변화에 따른 저서생물, 해조류 및 어류 등의 서식지 감소로 생태계 및 해수순환계에 미치는 영향과 개발되는 시설이나 조성된 부지를 이용하는 과정에서 해양에 방류되는 오·폐수에 의한 영향을 들 수 있다.

가. 공사중의 영향

(1) 부유물질의 농도 증가

해상공사에 수반되는 오타발생 및 확산에 의한 부유물질 농도증가 현상은 해저를 준설·매립하거나, 호안·방파제 등과 같은 구조물의 공사용 재료를 해중에 투하함에 따른 저질의 부상 및 공사용재료가 함유하고 있는 토사의 부유에 의한 부유물질의 증가가 있고, 강우시 육상의 절토부가 씻겨 유출되거나, 작업장 및 육상 건설장비의 주행에 따른 토사류가 우수배수와 함께 해역으로 유입함에 따른 부유사의 증가에 연유한다.

해수의 탁도가 증가되면 광투과량이 감소되고, 저서 및 수중생물의 호흡을 방해하게 되어 이들 생물이 사멸하는 등 해양 생태계에 큰 영향을 미치게 된다.

(2) 폐유·폐기물 유출

육상에서는 공사용 장비의 운전 및 정비과정에서 발생하는 폐유, 폐오일이

우배수를 통하여 유출되거나, 공사 종사자로부터 발생하는 생활폐기물 및 분뇨가 있다. 해상에서도 공사용 장비에서 발생하는 폐오일, Bilge 및 연료 Sludge와 해상장비 종사원들로 부터의 생활폐기물이 발생한다. 일반적으로 해상 공사중에 발생하는 폐기물로는 준설공사로 인한 준설토와 그 오탍·부유물질의 영향이 가장 크다.

나. 공사로 인한 지형변화의 영향

해저를 준설하거나 해안을 매립하여 지형을 변화시키면 저서생물의 주 서식지인 개펄이 감소되고, 해당수역의 저서생물은 사멸하게 되므로서 이에 연계되는 해양동식물의 서식환경 변화로 해양생태계에도 영향을 미친다. 또한 이들 지형의 변화는 수면적의 감소와 함께 부근 해역의 유속, 유향, 해수소통량등 유황을 결정적으로 변화시켜 정체 수역이 발생하는 등의 영향으로 해수 순환에 의한 자정능력을 떨어뜨리거나, 부분적인 퇴적·세굴을 유발시켜 해저 및 해안지형의 변화를 유발하고 개발지역 인근에 있는 기존 시설물에 위해로운 영향을 미치기도 한다.

부산 신항 개발사업의 환경영향평가서에서 검토된 바에 따르면 부산 신항 개발 사업으로 인한 부산신항 개발구역 이외 해역의 유황변화는 무시할 수 있는 수준인 것으로 판단하고 있다.

다. 개발시설 및 부지를 이용함에 따른 영향

(1) 생활하수

개발된 항만시설의 운영 종사원, 시설의 이용자 및 조성된 부지의 토지 이용여하에 따른 주거 또는 근무 인구에 의하여 발생·배출되는 하수와 해안역에 있는 기존 도시 등의 주거 및 활동인구에서 발생하는 생활하수는 일반적으로 해양수질에 미치는 영향이 가장큰 오염원이다. 마산시가 마산만 정화

사업을 시행하기 위하여 조사한 자료에 따르면 다음표에서와 같이 마산만에 도달하는 수질오염 부하량의 55.7%를 생활하수가, 29.1%를 공장폐수가 차지하고 있어, 대도시 인접해역에서는 생활하수 및 공장폐수가 수질오염의 주요오염원임을 알 수 있다.

마산만의 COD오염 부하량(1986년)

오염원별	생활하수	공장폐수	축산폐수	토지이용	해적퇴적물	기 타	계
COD (kg/일)	15,453	8,075	1,710	470	1,824	184	27,716
점유율 (%)	55.7	29.1	6.2	1.7	6.6	0.7	100

(자료) 마산만 정화사업 기본설계 보고서(마산시 1988. 11)에서 발췌 재구성

(2) 공장폐수

공업단지나 산업기지가 해안에 입지하는 경우는 기업측에서 볼 때 원료 및 제품의 내륙수송비 절감으로 제품의 원가 절감효과를 거둘수 있어 최상의 입지가 될 것이나, 해양환경보전 측면에서 보면 이들 공장에서 배출하는 각종 오·폐수는 생활하수 보다 중금속등 유독성 물질을 다량 함유하고 있고, 배출하는 오염물질의 종류나 양도 업종별로 큰 차이가 있으며, 동일 업종에서도 생산 공정 여하에 따라 다르기 때문에 처리가 쉽지 않고, 이러한 공장폐수가 해양으로 직접 배출될 시는 오염된 수질이 해수의 자정 능력만으로 정화되기를 기대하기는 곤란하며, 어·패류의 중금속 오염등 해양생태계에 악영향을 미치고, 이는 곧바로 우리 인체에 영향이 전파되어 심각한 문제를 유발한다.

(3) 축산폐수

국민소득 향상에 따른 식생활 양식의 변화로 육류소비가 늘면서 축산업이 성장하여 왔고, 이에 따라 가금류의 수가 증가하여 이들의 배설물과 축사의 세정수는 악취를 발생하고, 해충의 서식환경을 제공하여 주변환경을 악화시키며, 강우시 해양으로 직접 배출되면 해수를 오염시킨다.

축산폐수는 고농도의 유기성 폐수여서 폐수량의 규모에 비하여 오염부하량은 크나 유기물질인 관계로 해양에 도달하는 오염부하량의 유달율은 다음 표에서와 같이 작은편이다.

오염원별 발생부하량의 유달율

(단위 : %)

오염원별	생활하수	공장폐수	축산폐수	토 지	해저퇴적물	기타
유 달 율	20 ~ 70	50 ~ 80	5 ~ 10	1 ~ 5	100	90

(자료) 마산만 정화사업 기본설계 보고서(마산시 1988. 11)에서 발췌

(4) 토 지

전, 담, 임야, 목장, 주거지등 토지이용 형태에 따라 강우시 우수가 해양으로 배출될 때 토사류 등의 부유물질, 유기물질, 영농에 사용되는 비료나 각종 약품, 가금류의 배설물, 생활잡배수 기타 폐기물을 유출시켜 수질을 오염시킨다. 특히, 농토로 부터의 배수는 화학비료에 함유된 잉여 질소나 인등 영양염류가 연안해역에 배출되므로써 최근 빈발하고 있는 적조현상의 원인이 되기도 하고, 또한 쓰레기 매립장의 경우는 침출수 관리가 부실하게 되면 유해 중금속의 발생 오염원으로 되어 토양과 연안해역에 중금속 오염을 유발시키기도 한다.

(5) 해저퇴적물

해저퇴적물은 육지로부터 유입되는 오염물질과 수산양식장의 잉여·잔존 사

료등이 토사류와 함께 섞여 퇴적되어 있는 것으로 유기물 함량이 많고, 영양염류 함량 또한 많기 때문에 저층수의 용존 산소를 소모하여 빈산소 내지 무산소 상태를 유발시키므로써 혐기성 미생물 및 균류가 성장·번식하여 수질이 악화되고, 악취발생으로 주변 환경을 오염시킨다. 해저 퇴적물이 발생시키는 오염은 다른 오염원에 비하여 유입되는 과정이 없기 때문에 앞의 표(오염원별 발생부하량의 유달율)에서 알 수 있는바와 같이 오염부하량 전량이 해수를 오염시키는 특성이 있다.

(6) 선박폐수

선박으로부터 발생하는 오염은 통상 운항시에는 Ballast수, Bilge, 선창세정수, 선원의 생활하수 등이 있고, 선박의 충돌, 좌초사고의 경우에는 연료유, 유조선의 화물유, Sludge등 기타 유해물질의 유출이 있다. 특히 유류의 누출은 해면에 유막을 형성하고, 바람, 조류, 파랑 등에 의하여 영향범위가 급속히 넓어지는 관계로 해양에 미치는 영향이 커서 유조선의 경우에는 이중선체 구조를 갖도록 하는 국제적인 규제가 있기도 하다.

라. 수질 정화 대책

(1) 생활하수

일반가정, 식음료 영업활동, 업무활동 및 항만시설의 운영과정에서 배출되는 생활하수는 전술한 바와 같이 해수오염에 가장 큰 영향을 미치는 오염원이다. 마산만의 경우 마산만 정화사업의 일환으로 시행한 해저 퇴적오니의 준설공사의 효과를 검토해 보면 현재 다음표에서와 같이 동 사업 시행전보다 수질이 더 악화되어 있는 것으로 나타나고 있어 생활하수와 공장폐수의 처리가 선행되지 않는 수질개선은 불가능함을 알 수 있다.

마산만의 COD기준 수질 현황 및 예측치 비교

(단위 : mg/l)

해역별	수질환경 기준등급	마산만 정화사업		마산항철강 중계기지	비고
		1986년현황	1991년 예측	1996년 현황	
마산만	Ⅲ등급	3.0~6.6	1.0~1.5	3.0~10.5	
울구만	Ⅱ등급	2.8~3.0	1.2	2.7~8.0	
진해만	Ⅱ~Ⅰ등급	1.9~2.1	2.0~2.2	-	

(자료) 마산만 정화사업 기본설계보고서(마산시 1988. 11),

마산항 철강중계기지 건설사업 사후환경영향 조사 보고서

(포항종합제철 1997. 1)자료를 발췌하여 재구성

따라서, 생활하수와 공장폐수의 관리는 수질관리를 위하여 최우선적으로 해결하여야 될 과제를 알 수 있다.

생활하수는 정부의 예산을 투입하여 시급히 하수처리장을 건설하고, 적정 수준까지 정화시킨후 해수 소통이 활발한 해역에 방류시켜야 하고, 하수발생 원으로부터 하수처리장까지는 일반 우배수와 분리하여 차집할 수 있는 관거를 통하여 압송하고, 압송관로가 길 경우에는 관로중간에 가압 중계펌프장을 설치한다.

하수처리장에서의 처리는 현재 대부분이 재원의 한계성 때문에 우선 급한 대로 1차(침전)처리만으로 만족하고 있으나, 최소한 2차(활성오니)처리까지는 시행한 후 방류하여야 수질오염 상태를 다소나마 개선할 수 있을 것이고, 곧 3차(고도)처리하는 정도까지 발전시켜야 할 것이다.

현재 부산신항의 경우는 항만시설 및 관련단지에서 발생하는 하수를 별도의 하수처리장을 건설하여, 3차 고도처리까지 시행한 후 해양방류하는 계획을 수립해 두고 있다.

앞으로 진해만내에서 대규모의 부지조성을 동반하는 개발사업에서는 자체 사업 계획에 개발지역에서 발생하는 하수를 차집하여 자체처리하는 하수처

리장 시설계획을 포함시키도록 유도하고, 현재 도시지역의 부족한 처리시설은 중앙정부 및 지방자치단체에서 시급히 투자하여 적정규모의 처리시설을 갖추어야하고, 오염부하량 발생을 억제하는 차원에서 지속적인 주민 계몽운동도 필요하다.

(2) 공장폐수

공장폐수는 배출물질의 종류나 양등이 매우 다양한 특성상 생활하수와 같이 일률적으로 통합하여 집단 처리하는 데는 문제가 있다. 따라서 공장폐수의 경우는 오염물질을 배출하는 개별 공장의 자체적인 1차처리가 매우 중요하다. 이 경우 규모가 영세하고, 배출물질이 유사하여 처리방법을 공유할 수 있는 업체들은 집단화하여 처리토록 하므로써 처리효과와 경제성을 함께 높일 필요가 있다. 이런 집단화 시설의 경우에는 정부의 재정지원이나 금융상의 혜택을 주어 처리시설 설치를 적극적으로 유도하는 것이 바람직하다.

개별 처리장에서 1차 처리된 오수는 하수처리장까지 압송하여 2차또는 3차까지 고도처리하여 배출하여야 하고, 환경관리 기관은 이러한 처리과정을 지도, 관리, 감독하는 철저한 감시체제를 운영하여야 한다.

단계별 공장폐수관리 체제를 요약하면 다음과 같다.

공장폐수 관리 체제

배출업체	지방자치단체	환경부(지역관리청)
<ul style="list-style-type: none"> · 배출물질 및 특성 파악 · 적정처리시설 설치 · 배출·처리시설 유지관리 	<ul style="list-style-type: none"> · 배출업소별 관리·감시 · 하수관로 및 처리장의 건설과 유지관리 	<ul style="list-style-type: none"> · 해역의 종합 환경관리 · 해역환경 Monitoring 및 관리, 예측, 경보 체계 구축 · 배출·처리시설 등에 대한 기술지도, 감독

(가) 처리기준 설정

공장폐수의 처리기준은 공공수역의 수질보전 및 개선을 전제로 하지만 건

전한 경제 발전을 유도하는데도 목적이 있다. 따라서 처리기준으로 당해수역의 오염정도, 폐수처리의 경제적 여건을 고려하여 다음의 원칙에 따라 설정함이 바람직하다.

- 공장폐수는 배출 업체 자체적으로 1차 전처리후 배출
- 전처리된 공장폐수와 도시의 생활하수는 통합하여 종말처리
- 배출량이 일정규모 이하인 소규모 영세공장은 처리시설 설치 의무를 완화하고 집단화하여 처리토록 유도
- 배출량이 일정규모 이상인 대규모 공장은 해역별 총량규제 원칙에서 개별 배출기준을 일반의 경우보다 엄격하게 조정

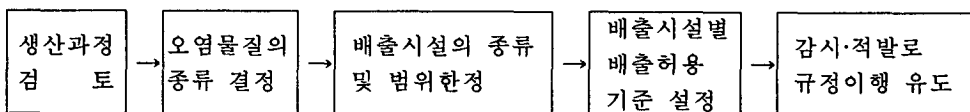
(나) 산업공정 개선

공장폐수를 원천적으로 저감시키는 방안으로는 폐수의 양을 줄이는 방법으로 다음에 예거한 여러 가지 기술적 대책을 강구하여 영향을 저감시킬 수 있다.

- 열 교환기의 개선에 의한 냉각수 증발방지등 생산공정의 개선 또는 변경에 의한 용수 소요량 절감
- 제조 과정에서 발생하는 폐수를 냉각수, 세정수등과 분리하여 처리하고, 이의 재순환, 재이용에 의한 용수 소요량 절감
- 원료의 개선, 이용가능한 물질의 재사용, 설비의 적정설계 및 운전방법의 개선 등에 의한 폐수 발생량 절감

(다) 감시제도 개선

오염물질 배출 규제는 다음 순서에 따라 이행, 실천되며, 이 과정에 대해서는 배출업체 자체감시와 정부기관에서 행하는 단속에 의하여 규제할 수 있다.



정부기관의 감시·단속업무를 수행하는데는 다음 사항을 유념하여야 한다.

■ 감시·단속 업무처리 지침

- 배출허용기준과의 부합여부
- 자체 감시기록의 구비여부 및 신뢰성, 정확성 확인
- 설치된 설비의 허가 기준 부합여부
- 폐수의 양과 배출물의 종류가 허용기준에 부합되는지 여부

■ 폐수검사 방법 개선

- 주기적으로 일정 시간대에 일정 시간동안, 일정한 양의 폐수시료채취
- 시료검사 기기 및 방법의 일률성 유지
- 검사요원의 검사기술 향상을 위한 주기적인 교육
- 시료검사·분석결과의 통계처리

■ 감시체제의 일원화

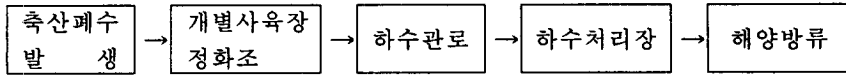
- 수질 검사기관의 단일 운영체제 확립으로 감시제도 운영의 일관성 유지

(3) 축산폐수

축산폐수를 처리하는데 있어 가장 큰 문제는 축사에서 폐액 수집은 가능하나, 목장 등의 넓은 사육장의 경우에는 한 곳에서 집중적으로 오염이 발생하는 것이 아니라 넓게 분산되어 발생하고, 강우에 의하여 일시에 배출되므로 폐수의 전량 수집이 거의 불가능하다는 점이다.

또한 축산폐수는 고농도의 유기성 폐수여서 폐수량의 규모에 비하여 오염 부하량이 커서 일반적인 처리방법만으로는 부족하나, 기업의 영세성으로 처리시설 투자가 곤란한 실정이다. 따라서 축산폐수를 효과적으로 처리하기 위해서는 소규모로 분산되어 있는 축산단지나 목장을 대단위 집단화하고, 처

리시설을 공동으로 건설하여 여기서 발생하는 폐수를 집단으로 수집, 1차처리 후 하수종말처리장으로 배송하여 통합처리하는 것이 바람직하다.



또한 가축 배설물은 경작지의 작물찌꺼기와 섞어 퇴비화하여 이를 경작지에 살포하여 천연비료로 활용하므로 토양의 산성화 방지와 작물의 생산력을 증대시킬 수도 있으므로 이에 대한 연구를 통하여 자원의 유효한 활용을 선행하고, 최종적으로 하수처리 하는 방안을 강구하는 것이 축산폐기물이나 폐수의 발생을 줄이는 좋은 방법이 될 것이다.

(4) 토지 (非點 오염원)

다양한 용도의 토지이용에 따라 발생하는 토양오염과 우수에 의한 지표면 오염물질의 유출 및 침출수의 해양유입에 의한 수질 오염은 발생원이 한곳에 집중되어 있지 않고 넓게 분산되어 있으며 강우에 의하여 배출된다는 특성이 있다. 이들은 발생원별로 오염발생을 규제하는 방안을 강구하여야 하며, 지역별로 구분하여 관리방책을 검토하면 다음과 같다.

■ 도시지역의 비점 오염원 관리

- 자동차의 배기가스 배출량 규제
- 저유황유 사용으로 유황산화물 발생 억제
- 각종 공사장에서 발생하는 오수 유출 억제
- 우수와 오수의 혼합방지를 위한 우배수로 분리
- 쓰레기 오물투기 행위 규제
- 도로면 정비와 거리청소 및 오물수거

■ 농촌지역의 오염관리

- 생활 잡배수 및 가축배설물을 혼합처리할 수 있는 소규모 간이 처리시설 설치
- 관개효율 증대로 수자원 사용량 절감에 의한 오염부하량 저감
- 경작지의 화학비료사용량 적정화 유도로 유출비료에 의한 수질오염 저감
- 유해성 농약의 사용과 자연환경 및 인체에 미치는 영향에 대한 주민계몽 및 사용억제
- 농약사용 횟수, 사용시기, 사용적량의 기준설정 및 사용상 효율증진 방안 교육
- 가축배설물과 작물찌꺼기를 혼합한 천연비료 사용유도로 경작지 생산력 증대 및 환경오염 저감

■ 자연녹지의 우수유출 관리

- 하천상류유역의 개발 등 토지전용억제로 인위적인 오염부하량 부가 규제
- 개발억지로 토양침식을 예방하여 하상, 저수지, 해안역에 대한 침전물 퇴적 최소화 관리
- 산림녹화사업 전개로 지표면의 침식, 토사유출 억제

■ 매립지의 침출수 관리

- 매립지 위치를 지하수의 대수층으로부터 멀리 떨어진 곳으로 선정
- 매립지 내부 주변에 불투수성 차수막층을 두어 침출수 누출방지
- 침출수의 차집 및 처리시설 설치 운영

(5) 해저퇴적물 (저질오니)

전술한 마산만의 COD 오염 부하량 표에 의하면 해저 퇴적물에서 용출되는 오염물질로 인한 영향은 6.6%인 것으로 조사되어있다. 마산만의 경우를 다른 항만 또는 해역에도 일반화시켜 적용할 수는 없으나, 대도시 연변의 해

역에서는 장구한 시간 동안 침적되어온 토사류의 부유물질과 함께 각종 오·폐수의 영향으로 저층 표면에는 상당한 두께의 오염 퇴적층이 존재할 것이고, 특히 해수가 정체현상을 보이는 수역은 더욱 심할 것이다. 이 퇴적물에서 유출되는 오염물질은 100% 수질오염에 기여하므로 그 영향이 적지않다. 해저퇴적물은 준설, 복토, 수중폭기 방법에 의하여 처리하므로써 저층수의 저산소 현상 해소와 유화 수소 등의 가스발생으로 인한 악취발생을 해소시켜 수질환경을 개선시킬 수 있다.

■ 복토

- 양질의 토사를 해저 유기오니 표면에 적정두께로 피복하여 오염물질의 용출 속도를 저감
- 유기성 오니만이 퇴적되어 있고, 가까운 위치에서 경제적으로 양질의 토사를 구할 수 있는 경우에 적용가능
- 수심이 얕아지는 부작용이 있어 적정수심유지가 필요한 해역에는 부적합

■ 수중폭기

- 빈산소화된 저층수에 공기를 취입하여 직접 산소를 공급하므로써 해수의 자정작용 촉진
- 저층수에 용존 산소 농도를 증가시켜 호기성 상태를 유지시키므로써 수질을 개선하고, 악취발생 방지
- 침전된 미립 퇴적오니를 재부상시켜 수질을 악화시킬 수 있는 위험이 있음

■ 준설·매립

- 퇴적오니층을 특수설계된 오니전용 펌프준설선을 동원하여 고함니율로 준설하여 매립장에 매립, 관리
- 준설오니는 운반, 매립시 악취등 2차공해 유발을 방지도록 조치
- 매립지에서는 오니가 외부로 누출되지 않도록 각종 관리 시설 설치(오탁

확산 방지막, 수류경사판, 침전조, 여수토)

- 매립후 우수에 의거 유해물질이 용출되어 누출되지 않도록 양질의 토사로 매립지 표면 피복
- 매립오니의 안정이 필요한 경우에는 탈수고화 또는 고화제를 혼합하여 고화시키거나 소각로에서 소각하여 감량시키고 잔여 소각회를 매립 처분
- 해안 매립장 시설배치 개념도
- 해안 매립장 시설배치 개념도

(주) 수류경사판 : 혼탁수의 흐름을 저층으로 유도하여 침강을 촉진

오타환산방지막 : 오타확산을 억제

■ 선박폐기물 및 유류 유출

선박 폐기물인 기관실 Bilge, Bilge 유분 및 폐오일 등은 전량 수거하여 육상의 일정장소에 저장한 후 폐유처리 전문 업체에 위탁처리하고, 선박의 해난사고에 의한 유류 유출은, 진해만의 경우 신설되는 부산 신항과 고현, 마산, 진해항을 출입하는 선박을 대상으로 CCTV와 Radar등 첨단 설비를 갖춘 종합 해상관제 시스템(VTS)을 구축하여 관제하므로서 항로 이탈에 의한 좌초 및 선박의 충돌 등 해난사고에 의한 유류 유출 사고를 예방하고, 일단 유출된 유류는 Oil Fence를 설치하고, 회수, 처리제 살포, 흡착제를 사용하여 제거하는 방법을 동원하여 처리할 수 있으나 Oil Skimmer에 의한 기계적 회수방법을 채용하여 기름을 회수하고 이를 일괄하여 처리하는 것이 효과적이다.

기타 분뇨, 준설토등 유해물질을 포함하지 않는 유기물 및 수용성 무기물, 폐수처리 Sludge등 각종 폐기물의 해양투기는 해수순환이 양호한 원해역에 투기토록 통제하고, 투기후 오염물질의 이동, 분해, 확산 및 생태계에 대한 영향등은 지속적인 관리, 감시와 조사, 연구가 필요하다.

마. 오염 부하량 저감방안

■ 총량규제

폐쇄성 해역인 진해만의 경우는 해수교환율이 높지 않기 때문에 오염된 해수의 외양확산에 의한 단기간내의 자연정화를 기대하기는 곤란하다. 또한 부산신항 개발사업 환경영향평가서(해양수산부 1997. 7)에 수록된 조사자료에 의하면 진해만 입구인 가덕수로 인근해역에서 COD, 총부유물질, 총질소, 인산염-인이 검출된 양으로 볼 때 Ⅲ등급 수질인 것으로 밝혀져 Ⅱ등급해역으로 지정되어 있는 기준을 이미 초과하고 있다.

따라서 진해만 해안전역의 오염원으로부터 배출되는 오염물질의 양을 배출 업소별로 규제하는 것만으로 해양수질을 목표치(해역별로 Ⅰ등급 ~ Ⅲ등급) 이내로 억제하기는 곤란하므로 오염부하량의 총량 규제 개념도입이 불가피하다.

총량규제는 일정규모이상의 대규모 오염물질 배출업소에는 관련법규에서 정하는 기준보다 엄격한 기준으로 대폭줄여서 배출량을 최소화하고, 배출량 허용기준은 해역의 오염현황 및 도입할 처리시설의 처리능력 수준을 고려하여 정하고, 소규모 영세업소는 집단화하여 처리시설을 공동으로 설치, 통합처리 하므로써 경제성과 효율성을 동시에 거양토록 유도해 나가야 할 것이다.

■ 기타건의

- 환경관리시설은 건설비용이 막대하기 때문에 개별기업이 투자하기에는 부담이 큰 점이 있으므로 일정한 기준을 정하여 정부에서 재정지원이나 금융상의 혜택을 주는 정책수립이 바람직하다.
- 진해만의 해역별, 지방자치단체별(행정구역 기준), 대규모 개발사업의 주체별 등 제반 오염원에 대한 오염부하량의 분담율을 조사하여 그 분담율에 따라 하수처리를 부담하고, 주민 등의 의식개혁 계몽운동을 벌이는 노력이 필요하다.

- 오염원 관리에 총량규제 개념이 도입되면 제도적인 뒷받침과 함께 경제적 이고도 효율적인 처리기술, 처리설비 관련기술의 개발 또는 도입이 촉진되어야 한다.
- 해양환경 현황은 자동측정 시스템을 도입하여 상시 관측하고, 예측모델을 수립하여 예보 시스템을 가동함이 바람직하다.

바. 환경친화적 개발

(1) 환경기반 시설 정비

앞으로의 해안역 개발은 환경보호와 서로 대립하는 것이 아니라 공생하는 개념으로 바꾸어 양호한 자연환경을 창조하여 생물이 살기 좋고, 인간에게 정감과 안락함을 주며, 환경관리가 충실한 개발이 되어야 한다.

환경친화적 해안개발을 위해서는 다음같은 환경기반시설의 정비와 건설이 먼저 추진되어야 한다.

구 분	내 용
육지도시환경개선	<ul style="list-style-type: none"> • 폐기물 최종처리장, 분뇨처리장, 하수처리장, 선박폐유저장 및 처리시설, 수산물위판장폐수처리장 • 쓰레기등 폐기물 반입처리장, 건설발생토의 재활용시설 • 임해공단 공동 폐수처리장 • 축산폐수 공동처리장
해역환경기반시설	<ul style="list-style-type: none"> • 환경보전림, 완충녹지대등 자연환경 조성 • 친수성녹지, 전망시설, 친수형산책로 조성 • 오염토제거, 쓰레기·기름제거시설 등 환경피해감시시설 • 물리적 해수교환시설(도류제, 해수 순환형 방파제등)개발
해역환경관리	<ul style="list-style-type: none"> • 해안역개발 계획의 조정, 해역환경감시·분석·개선방법과 기술개발 • 해역환경 조사 및 예측시스템 개발, 예보 기법 개발

(2) 개발방향

항만공간은 그간 일반인의 접근을 허용하지 않는 보세구역 또는 보안시설

로 관리되어 도시민들의 욕구와는 달리 폐쇄적 공간이었으나, 금후로는 선진 해양국가를 지향하여 세계적인 추세에 따라 종합물류기지, 국제금융 및 관광·친수공간 등으로 기능을 확대해 나가야 한다. 따라서 앞으로 새롭게 개발되거나 대규모로 확충되는 항만은 계획 단계에서부터 이러한 복합적이고도 환경친화적인 개념이 도입되어야 하고, 기존시설이 노후화 되었거나, 선박의 대형화 추세로 기능이 쇠퇴한 항만구역은 적극적으로 일반인에게 개방하여 시민 친화적인 생활공간 및 관광리조트 등 친수성의 환경 친화적 공간으로 재개발 되어야 한다.

(3) 유치기능 및 시설

환경친화적 공간으로 재개발되거나, 새롭게 개발되는 해안역에는 다음과 같은 기능과 시설의 유치를 고려해 볼 수 있다. 이들 시설은 가능한 한 민자유치를 통하여 건설하고, 창의를 유도하고, 공간 이용상의 효율을 높이며, 지역민의 정서에 부합되도록 사업제안을 받아 추진하는 것이 바람직하다.

기 능	시 설
해상교통시설	국내선 및 국제선 여객터미널
문화위락지역	테마파크, 마리나, 리조트, 전시관, 해수욕장, 스포츠센터
국제관련기능	국제무역센터, 금융기관, 컨벤션센터, 정보단지
주 거 지 역	관광숙박시설, 쇼핑센터, 주거 및 복지시설
공원녹지공간	해양공원, 산책로, 해안녹지
공공업무기능	해양관련 정부기관 및 국제기구 청사