



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.


저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

2009년 하계 황해투기해역에서의  
해양환경 변화에 관한 연구

The background features a large, faint watermark of the Jeju National University logo. The logo is circular, containing the text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' around the perimeter and 'JEJU 1952' in the center. The central part of the logo is a stylized 'J' shape composed of blue, green, and grey wavy lines.

제주대학교 대학원

해양학과

고혁준

2010년 8월

# 2009년 하계 황해투기해역에서의 해양환경 변화에 관한 연구

지도교수 최 영 찬

고 혁 준

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2010년 8월

고혁준의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

제주대학교 대학원

2010년 8월

The Characteristics of Environmental Changes in  
Ocean Dumping Area at Yellow Sea in summer 2009

Hyuk-Jun Go

(Supervised by professor Young-Chan Choi)

A thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirement for the degree of Master of Science

August, 2010

Department of Oceanography  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 목 차

|  |     |
|--|-----|
| List of Figures .....                    | iii |
| List of Tables .....                     | v   |
| Abstract .....                           | vi  |
| <br>                                     |     |
| I. 서론 .....                              | 1   |
| <br>                                     |     |
| II. 재료 및 방법 .....                        | 5   |
| 2.1. 조사방법 .....                          | 5   |
| 2.2. 해수시료 분석방법 .....                     | 8   |
| 2.3. 해저퇴적물시료 분석방법 .....                  | 9   |
| <br>                                     |     |
| III. 결과 및 고찰 .....                       | 10  |
| 3.1. 연구해역의 해수 특성 .....                   | 10  |
| 3.1.1. 물리적 환경특성 .....                    | 10  |
| 3.1.2. pH .....                          | 16  |
| 3.1.3. 부유물질(SS) 및 휘발성부유물질(VSS) .....     | 16  |
| 3.1.4. 화학적산소요구량(COD) .....               | 17  |
| 3.1.5. 용존산소(DO) 및 용존산소포화율 .....          | 17  |
| 3.1.6. 엽록소 a(Chlorophyll a) .....        | 18  |
| 3.1.7. 무기영양염류의 분포 특성 및 영양상태 평가 .....     | 21  |
| 3.1.8. 해수 중 미량금속 분포 .....                | 31  |
| <br>                                     |     |
| 3.2. 주변해역과 투기해역의 표층퇴적물 분포특성 .....        | 33  |
| 3.2.1. 표층퇴적물 함수율, 강열감량, COD 함량과 분포 ..... | 33  |
| 3.2.2. 표층퇴적물 금속원소의 함량과 분포 .....          | 36  |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.3. 주변해역과 투기해역 농도의 연변화 ..... | 44 |
| IV. 결론 .....                  | 48 |
| 참고문헌 .....                    | 50 |
| 감사의 글 .....                   | 54 |
| Appendix .....                | 55 |



## List of Figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1. Station maps of the study area. Rectangle represents the dumping area and Station 4 represent a rest zone. ....   | 6  |
| Fig. 2. The horizontal distribution of temperature in the study area in July 2009. ....   | 13 |
| Fig. 3. The vertical section of temperature in the study area in July 2009. ....  | 13 |
| Fig. 4. The horizontal distribution of salinity in the study area in July 2009. ....  | 14 |
| Fig. 5. The vertical section of salinity in the study area in July 2009. ....   | 14 |
| Fig. 6. The vertical distribution of temperature and salinity in the study area in July 2009. ....  | 15 |
| Fig. 7. T-S diagram in the study area in July 2009. ....  | 15 |
| Fig. 8. The distribution chart of Seawater environmental variables in the study area in July 2009(arrange the station in depth order). ....                               | 20 |
| Fig. 9. The horizontal distribution of TIN in the study area in July 2009. ....   | 25 |
| Fig. 10. The vertical section of TIN in the study area in July 2009. ....   | 25 |
| Fig. 11. The horizontal distribution of Phosphate in the study area in July 2009. ....  | 26 |
| Fig. 12. The vertical section of Phosphate in the study area in July 2009. ....   | 26 |
| Fig. 13. The horizontal distribution of Silicate in the study area in July 2009. ....   | 27 |
| Fig. 14. The vertical section of Silicate in the study area in July 2009. ....  | 27 |
| Fig. 15. Variation of seawater environmental variables in the around and dumping area.(reference: Park et al., 1996.07; Shin, 2001.08~2005.08; this study, 2009.07). .... | 28 |
| Fig. 16. The distribution chart of Seawater environmental variables in the study area in July 2009(arrange the station in depth order). ....                              | 29 |
| Fig. 17. The N/P ratio compare with the Redfield ratio. ....  | 29 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 18. Relationships between AOU and phosphate, nitrate. ....  | 30 |
| Fig. 19. The distribution chart of water content, ignition loss and CODs .....   | 35 |
| Fig. 20. The horizontal distribution of water content, ignition loss, CODs in the<br>study area in July 2009. ....   | 35 |
| Fig. 21. The horizontal distribution of trace metals in the study area in July<br>2009. ....   | 40 |
| Fig. 22. The distribution chart of trace metals in the study area in July<br>2009(arrange the station in depth order). ....  | 41 |
| Fig. 23. Variation of seawater environmental variables and nutrients concentration<br>in the bottom layer(below 50m in water depth) in the around<br>area(reference: Park et al., 1996.07; Korea coast guard R&D center,<br>2000.02~2009.05; this study, 2009.07). ....  | 45 |
| Fig. 24. Variation of seawater environmental variables and nutrients concentration<br>in the bottom layer(below 50m in water depth) in the dumping<br>area(reference: Park et al., 1996.07; Korea coast guard R&D center,<br>2000.02~2009.05; this study, 2009.07). .... | 46 |
| Fig. 25. Variation of sediments concentration in the study area(reference: Kim et<br>al., 1991.11; Korea coast guard R&D center, 2005.08, 2008.08; this study,<br>2009.07). ....   | 47 |



## List of Tables

|  |    |
|--|----|
| Table 1. The annual amount disposal waste into the Yellow Sea.(1991~2008). ....                      | 4  |
| Table 2. Location of study area in Yellow Sea of Korea. ....   | 7  |
| Table 3. A scheme for trophic state classification proposed by Wasmund et al.(2001). ....            | 30 |
| Table 4. Correlation matrix of Sediment environmental variables in the study area in July 2009. .... | 42 |
| Table 5. Guidelines for classifying sediments. ....  | 43 |



## Abstract

This thesis is focused on the impacts of waste dumping on water and sediment quality in the dumping area of the Yellow Sea from 1988. The environmental variables and parameters of the dumping and reference areas in the Yellow Sea were measured during July 2009 and analyzed.

In the study area, density stratification depended greatly on temperature rather than salinity. Yellow Sea Bottom Cold Water were found below 7°C at the depth of 30m in all the observation points. The vertical distributions of salinity showed a sudden drop of 0.5~1.5psu at the 20m depth. It seemed to be influenced by an increase in summer precipitation and also a southward shift of the Yellow River.

The chemical environment of the study area showed that deeper water has low pH, high SS and COD, low DO and an accumulation of nutrients in the bottom layer. Most notably, phosphate values at the bottom were higher than the reference area. The reason for the increase appears to be due to the disposal of livestock, sludge, excreta from 2002, rapid consumption of nitrogen and slow biogeochemical circulation. The data also suggests a eutrophic state is occurring at the bottom layer.

Sediment COD values exceeded 20mgO<sub>2</sub>/g-dry, Japan Fisheries Environmental Standard, at stations 3 and 5. The concentration of Cr exceeded ERL(effect range-low) of the NOAA at station 3 and 4. It seems to be influenced by leather process wastes.

The correlation coefficients among the water content and Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Zn concentration in the study area were very high. So, they are staying as dissolved matter.

The average concentration of TIN and phosphates at the bottom layer below the thermocline had increased from 3.7µM to 9.8µM and from 0.5µM to 1.1µM, which correspond to 2.6, 2.2 times accumulation in the dumping area before

1988.

Continued disposal of waste into the Yellow Sea has impacted the northwest reference area(st.1) as a result of organic oxidation and heavy metal diffusion. In addition, at the station 3, the concentration of Cr exceeded the ERL(effect range-low) of the NOAA. Therefore, station 3 seems to need a rest zone appointment.



## I. 서론

폐기물의 해양투기는 국가의 국토이용 전략 중의 하나로서 구미 각국을 비롯한 선진국들은 해양을 폐기물 처리의 최종 처리장소로 오래 전부터 이용하여 왔다. 국제적으로 1970년대 이전까지는 폐기물의 해양투기가 해양환경에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 인식되어 왔으나, 1970년을 전후로 폐기물의 해양투기가 해양환경에 영향을 줄 수 있다는 점에 주목하여 해양투기를 규제하기 위한 국제적 분위기가 조성됨에 따라 1972년 런던협약과 이들 당사국들의 준수를 강화시키기 위한 1996 의정서를 채택하는 등 해양환경보호를 위한 각국의 노력은 꾸준히 추진되어 왔다. 그러나 우리나라는 1978년 이후, 분노와 당밀폐액의 해양배출이 소량씩 이루어져 1988년부터는 3곳의 지정 배출해역을 선정하여 육상에서 처리가 곤란한 폐기물 중 해양배출처리기준에 적합한 폐기물만을 배출하도록 허용하고 있다(이 등, 2006).

포항 동방 125km지점에 면적 3,700km<sup>2</sup>의 '동해병' 해역과 울산 남동방 63km 지점에 면적 1,616km<sup>2</sup>의 '동해정' 해역 그리고 군산 서방 200km 지점에 면적 3,165km<sup>2</sup>의 '서해병' 해역으로 나누어 배출되고 있다. 서해와 동해의 지정해역에 배출된 폐기물의 양은 1988년 55만톤에서 2004년까지 계속 증가하여 990만톤이었다가 2008년에는 650만톤으로 감소하는 추세이다(해양투기종합관리시스템 홈페이지).

해양배출되는 폐기물이 해마다 증가된 이유로는 1997년 도입되어 2003년 전면 시행된 하수오니 등 유기성 오니의 육상 직매립 금지(환경부), 그리고 2002년부터 시행된 축산폐수를 해양배출업자에게 전량 위탁처리하는 경우 축산농가의 폐수처리시설 설치 의무를 면제해 주는 오수분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률 개정(환경부) 등으로 인하여 육상에서의 폐기물 매립 및 재활용 등이 어려워졌기 때문이다. 현재 폐기물 해양배출 비용이 매립, 소각, 재활용 등의 비용에 비하여 훨씬 저렴하게 책정된 것도 큰 이유가 된다. 또한 지방자치단체의 하수종말처리장 처리시설의 부족과 육상 폐기물의 재활용이 미흡한 것도 해양에 폐기물 투기가 늘어나는 이유로 지적되고 있다(이 등, 2006).

폐기물 배출해역 중 서해병 해역은 황해의 중앙부에 위치한 해역으로 겨울철에 형성된 황해저층냉수괴 및 황해난류수, 한국남해연안수, 중국대륙연안수, 양자강회석수 등이 복합적으로 영향을 미치며 특히 동계에 형성된 황해 저층냉수괴에 의하여 저층의 평균수온은 6.8~7.0℃를 유지하며 평균수심이 80m로 매우 얇고 반폐쇄성 해역의 형태로 물리적 순환이 원활하지 않다(박 등, 1998) 황해의 중심해역은 매년 동계기간 동안 수직적으로 혼합되며, 하계와 추계에는 성층이 형성되어 영양염류가 축적되는 순환을 반복하고 있다(Son et al., 1989). 물의 체류시간도 5~6년으로 비교적 길어 오염물질이 그대로 해저로 퇴적되어 해양환경에 많은 변화가 예상되는 해역이다(홍 등, 2001). 이러한 서해병 해역에 배출되는 폐기물 종류로는 분뇨, 축산폐수를 포함하는 액상류와 폐수처리오니와 하수처리오니를 포함하는 오니류가 주로 배출되고 있다(Table 1.). 슬러지에 함유된 중금속을 비롯한 유해성분은 용존 및 입자성으로 해수중에 존재하기도 하며, 대부분 응집 및 침강현상으로 해저에 퇴적된다. 슬러지 유래의 해수 중에 또는 퇴적물에 존재하는 중금속과 유해성분은 해양생물에 직·간접적으로 영향을 미치게 되는데, 오염성분의 물리·화학적 성질과 생물체의 조직특성 또는 서식 환경에 따라 다양한 생물 농축계수를 나타내게 되기도 한다(김, 2003). 또한 저층으로 침강, 퇴적된 유기물이 분해, 무기화에 의한 영양염 용출로 인하여 해역의 부영양화를 일으킬 수 있으며, 수질 및 저서 생태계에도 영향을 끼치고 있다(김, 2007).

이러한 해역의 환경변화가 중요하며, 황해 해양투기해역에 관한 연구는 해양투기해역의 해양화학환경에 관한 연구(박 등, 1998)와 황해 폐기물 배출해역 퇴적물의 중금속 및 유기탄소 분포특성, 1991(김 등, 2001), 투기되는 하수슬러지의 중금속 화학형태 연구에 따른 생태위해성 평가(김, 2003) 그리고 2005년 한국폐기물배출해역 오염도 조사에 관한 연구(이 등, 2006) 등이 이루어졌으며, 해양경찰청에서 1997년부터 배출해역에 대한 수질조사를 표·저층 매해 1회 이상 실시하고 있다. 그러나 배출해역에서의 연구가 대부분이며 주변해역으로 미치는 영향에 관한 연구로서 해양수질과 퇴적물을 함께 한 연구와 자료는 부족한 편이다.

본 연구에서는 1988년 해양투기가 시작된 후 20년이 지난 황해에 투기로 인한 주변해역과 투기해역 및 휴식년 구역의 해수질 특성과 영양상태에 따른 질소, 인의 생지화학적 순환관계 및 중금속 농도영향을 알아보고, 표층 퇴적물의 유기

물 및 중금속 농도를 파악하여 오염도를 평가하며, 해양환경에 미치는 영향정도  
와 주변해역으로 영향을 미치고 있는지 알아보고자 한다.



Table 1. The annual amount disposal waste into the Yellow Sea(1991~2008).

| 년도   | 액상류   |          |        |                   | 유기성 오니류        |                      |                |                | 원료<br>동식<br>물폐<br>기물 | 수산<br>물가<br>공간<br>재물 | 총계<br>(천m <sup>3</sup> ) |
|------|-------|----------|--------|-------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
|      | 분뇨    | 가축<br>분뇨 | 폐수     | 음식물류<br>폐기물<br>폐수 | 분뇨<br>처리<br>오니 | 가축<br>분뇨<br>처리<br>오니 | 폐수<br>처리<br>오니 | 하수<br>처리<br>오니 |                      |                      |                          |
| 1991 | 0     | 0        | 982    | 0                 | 0              | 0                    | 0              | 0              | 0                    | 0                    | 982                      |
| 1992 | 0     | 0        | 978    | 0                 | 0              | 0                    | 11             | 0              | 0                    | 0                    | 989                      |
| 1993 | 0     | 0        | 716    | 0                 | 0              | 0                    | 10             | 0              | 0                    | 0                    | 726                      |
| 1994 | 0     | 0        | 795    | 0                 | 0              | 0                    | 73             | 0              | 0                    | 0                    | 868                      |
| 1995 | 0     | 0        | 914    | 0                 | 0              | 0                    | 126            | 9              | 0                    | 0                    | 1,049                    |
| 1996 | 209   | 0        | 1,204  | 0                 | 0              | 0                    | 116            | 85             | 0                    | 0                    | 1,614                    |
| 1997 | 306   | 0        | 1,380  | 0                 | 0              | 0                    | 214            | 93             | 20                   | 0                    | 2,013                    |
| 1998 | 291   | 44       | 1,455  | 0                 | 0              | 0                    | 357            | 282            | 0                    | 0                    | 2,429                    |
| 1999 | 296   | 148      | 1,071  | 0                 | 0              | 0                    | 423            | 442            | 0                    | 0                    | 2,380                    |
| 2000 | 262   | 126      | 928    | 0                 | 0              | 0                    | 467            | 640            | 0                    | 0                    | 2,423                    |
| 2001 | 189   | 112      | 846    | 0                 | 2              | 0                    | 483            | 758            | 0                    | 0                    | 2,390                    |
| 2002 | 211   | 159      | 673    | 0                 | 3              | 0                    | 561            | 808            | 9                    | 0                    | 2,424                    |
| 2003 | 197   | 358      | 507    | 0                 | 9              | 8                    | 575            | 744            | 8                    | 0                    | 2,406                    |
| 2004 | 189   | 356      | 266    | 245               | 10             | 7                    | 522            | 798            | 4                    | 0                    | 2,397                    |
| 2005 | 139   | 256      | 161    | 503               | 10             | 10                   | 443            | 856            | 0                    | 6                    | 2,384                    |
| 2006 | 133   | 278      | 148    | 484               | 11             | 8                    | 349            | 749            | 0                    | 0                    | 2,160                    |
| 2007 | 177   | 207      | 94     | 483               | 9              | 5                    | 273            | 676            | 0                    | 0.1                  | 1,924                    |
| 2008 | 206   | 153      | 103    | 354               | 7              | 7                    | 219            | 539            | 0                    | 0.1                  | 1,588                    |
| 합계   | 2,805 | 2,197    | 13,221 | 2,069             | 61             | 45                   | 5,222          | 7,479          | 41                   | 6.2                  | 33,146                   |

※ 자료 : 해양투기종합관리시스템 홈페이지



## II. 재료 및 방법

### 2.1. 조사방법

본 연구조사는 2009년 7월 17일부터 7월 26일간에 걸쳐 제주대학교 실습선 아라호를 이용하여 군산 서방 200km지점에 해양투기해역(휴식년 구역포함)과 주변해역을 조사하기 위해 북위  $35^{\circ} 17' \sim 36^{\circ} 22'$ , 동경  $124^{\circ} 03' \sim 124^{\circ} 48'$ 에 위치한 황해중앙해역에서 10개 정점을 조사하였다(Fig. 1, Table 2). 해수는 반돈채수기를 이용하여 수층별 농도변화를 파악하고자 표층(수심 1m이하), 10m, 30m, 50m, 저층(바닥에서 1m 위)시료를 10개 정점에서 채수하였으며, 표층퇴적물 시료는 그랩 채니기를 이용하여 9개 정점(St. 1~St. 9)에서 채취하였다.

해수의 영양염 분석을 위한 시료는 염산(10% HCl)처리된 HDPE sample bottle에 넣은 후  $-20^{\circ}\text{C}$  이하에서 보관하여 실험실에 옮긴 후 분석하였다. 중금속 분석을 위한 시료는 현장에서 즉시  $0.45\mu\text{m}$ 인 멤브레인 여과지로 여과한 후 진한 질산으로 pH를 1.5~2.0정도로 맞춘 다음 HDPE sample bottle에 넣은 후  $-4^{\circ}\text{C}$  이하에서 보관되어 실험실에 옮긴 후 분석하였다. 해저퇴적물 시료는 HDPE sample bottle에 공기가 차 있는 공간을 최소화하여 넣었으며 바로 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.



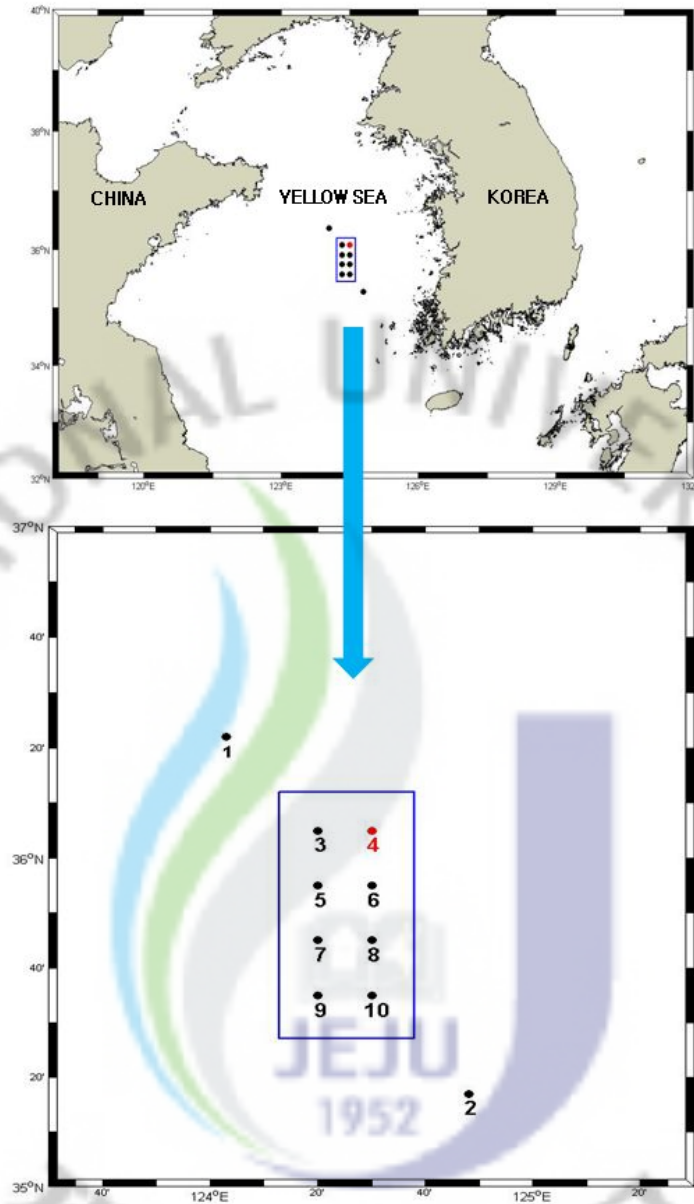


Fig. 1. Station maps of the study area. Rectangle represents the dumping area and Station 4 represent a rest zone.

Table 2. Location of study area in Yellow Sea of Korea.

| 조사해역             | 조사정점   | 위 도     | 경 도      | 수심(m) |
|------------------|--------|---------|----------|-------|
| 주변해역             | ST. 1  | 36° 22' | 124° 03' | 75    |
| 주변해역             | ST. 2  | 35° 17' | 124° 48' | 87    |
| 투기해역             | ST. 3  | 36° 05' | 124° 20' | 79    |
| 투기해역<br>(휴식년 구역) | ST. 4  | 36° 05' | 124° 30' | 82    |
| 투기해역             | ST. 5  | 35° 55' | 124° 20' | 79    |
| 투기해역             | ST. 6  | 35° 55' | 124° 30' | 83    |
| 투기해역             | ST. 7  | 35° 45' | 124° 20' | 80    |
| 투기해역             | ST. 8  | 35° 45' | 124° 30' | 82    |
| 투기해역             | ST. 9  | 35° 35' | 124° 20' | 82    |
| 투기해역             | ST. 10 | 35° 35' | 124° 30' | 85    |

## 2.2. 해수시료 분석방법

### 수온, 염분 및 pH

수온과 염분은 현장에서 CTD(SBE 19)를 이용하여 측정하였으며, pH는 pH meter(YSI 63 model)를 이용하여 측정하였다.

### 무기영양염류(Nutrients)

무기영양염류의 측정은 Standard Methods(1989), Solorzano(1969)의 방법에 따라 UV/VIS 분광광도계(Beckman DU730)를 이용하여 흡광도를 측정하였다. 암모니아 질소( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ), 아질산 질소( $\text{NO}_2^--\text{N}$ ), 질산 질소( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )는 각각 Phenol hypochlorite method, NED method, cadmium reduction method에 준하여 분석하였으며, 인산 인( $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ )은 Ascorbic acid method에 준하여 분석하였다. 그리고 규산 규소( $\text{SiO}_2-\text{Si}$ )는 Heteropoly blue method로 분석하였다. 총무기 질소(TIN)는 암모니아 질소, 아질산 질소, 질산 질소를 합으로 나타내었다.

### 부유물질(SS ; Suspended Solids)

선상에서 시수 1~2 l 를 미리 무게를 잰 여과지에 여과하여 105~110°C에서 항량으로 건조 후 여과지 무게를 달아 여과전 후의 무게차를 산출하는 상압가열 건조법에 의하여 구하였다.

### 휘발성부유물질(VSS ; Volatile Suspended Solids)

부유물질을 측정할 여과지를 전기로(550±50°C)에서 15분간 회화 후 건조 후와 강열 후의 무게차로 농도를 구하였다.

### 화학적산소요구량(COD ; Chemical Oxygen Demand)

시료를 알칼리성으로 만든 후 과망간산칼륨 과잉량을 넣고 수욕에서 60분간 가열반응 시킨 후, 요오드화칼륨 및 황산을 넣어 소비되고 남은 과망간산칼륨에 의하여 유리된 요오드의 양으로부터 산소의 양을 측정하였다.

### 용존산소(DO ; Dissolved Oxygen)

현장에서 DO를 측정할 수 있는 AAQ1182(ALEC Electronics)를 이용하여 측

정하였다.

#### **엽록소 a(Chlorophyll a)**

시료를 여과지로 여과하여 90% Aceton 10ml를 첨가하고 20시간 냉암소에 보관 후 3,000~4,000rpm에서 원심분리시켜 각각의 파장에서의 흡광도를 SCOR/UNESCO식으로 계산하였다(Strickland and Parsons, 1972).

#### **중금속 항목**

해양환경공정시험법에 준한 방법으로 전처리 한 시료를 용매추출 한 후 ICP-OES(Varian)로 분석하였다.

### **2.3. 헤저퇴적물시료 분석방법**

#### **함수율**

해양환경공정시험법에 준한 방법으로 헤저퇴적물의 건조 전 무게와 건조 후 무게 차이로 구하였다.

#### **강열감량(Ignition Loss)**

해양환경공정시험법에 준한 방법으로 건조기에서 전처리 한 헤저퇴적물 시료를 고온(550℃)으로 2시간동안 가열한 후 그 무게차이로 구하였다.

#### **화학적산소요구량(COD ; Chemical Oxygen Demand)**

해양환경공정시험법에 준한 방법으로 퇴적물내 유기물을 강산화제(과망간산칼륨)로 산화시킬 때, 소모되는 산소량으로 구하였다.

#### **중금속 항목**

해양환경공정시험법에 준한 방법으로 전처리 한 건조시료를 산으로 용해시킨 후 ICP-MS로 분석하였다.

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 3.1. 연구해역의 해수 특성

##### 3.1.1. 물리적 환경특성

황해중부해역은 지리적으로 중위도 온대역에 위치한 까닭에 황해저층냉수, 한국남해연안수, 양자강회석수 등 복합적인 영향을 받고 있어 해수의 물리적 특성이 계절적으로 심한 변화를 나타낸다. 즉, 여름철에는 약 400 ly/day 정도에 이르는 태양 복사열에 의해 해수 표층이 가열됨에 따라 표층수와 저층수간 수온차가 크게 나타남으로써 해수의 수직혼합이 제한되나 가을로 접어들면서 차가운 대기와 강한 북서계절풍의 영향으로 해수의 수온이 급격히 냉각되면서 수온약층이 깨지기 시작하여 겨울에 접어들면서 표층수와 저층수간의 수직혼합이 활발하게 이루어지는 것으로 보고되고 있다(이, 1992). 그리고 밀도의 수직분포 변화는 매년 주기적으로 나타나 화학종 분포 및 순환 그리고 해양생태계에 커다란 영향을 미치게 된다. 특히 유기입자의 침강, 분해 및 무기영양염류의 재생산이 일어나는 저층수괴에서는 과도한 외부오염물질의 부하와 생화학적 제거작용의 불균형이 심화될 경우 화학종의 농축현상이 나타날 수 있다(박 등, 1998).

조사해역의 표층수온 분포(Fig. 2)는 23.1~24.1°C(평균 23.7°C)로 연구해역 남동쪽에 위치한 정점 2로 갈수록 수온이 낮아지고 있었으며, 10m의 수온분포도 22.9~24.0°C(평균 23.6°C)로 표층과 유사한 분포를 보이고 있었으며, 대부분 22°C 이상의 온도를 보이고 있는데 이는 태양복사열이 영향이라 사료된다. 20m에서는 12.2~22.7°C(평균 17.5°C)로 정점 1, 3, 5를 잇는 해역은 14°C이하로 10m의 같은 정점의 수온과 10°C정도의 큰 차이를 보이며 수온약층이 형성되며, 정점 8, 9, 10으로 갈수록 수온이 22.7°C까지 높아지는 분포를 보이고 있었다. 30m에서는 8.5~10.9°C(평균 9.4°C)로 투기해역 정점 6, 8을 중심으로 냉수괴가 분포하고 있었다. 40m에서는 7.1~10.0°C(평균 8.1°C)로 30m의 분포와 유사한 분포를 보이고

있으며 정점 4, 5, 6을 중심으로 주변해역인 정점 1, 2의 바깥방향으로 냉수괴가 영향을 미치고 있었다. 50~70m에서도 6.3~9.3°C(평균 7.1°C)로 40m에서와 비슷한 분포양상을 보이고 있었다.

모든 연구해역에서 표층과 저층간의 수온차이가 뚜렷하게 나타났으며, 각 정점별 수심 1m간격으로 처리된 수온의 수직분포(Fig. 6)를 보면 15~30m사이에서 뚜렷한 수온약층이 형성되어 있었으며, 30m층에서는 황해냉수가 분포하고 있었다. 박(1998) 등의 7월 수온자료는 10.0~23.2°C(평균 17.1°C)로 냉수괴가 분포하는 수심은 40m였으며, 저층수온은 10°C정도의 분포를 보였고, 신(2008)의 2001~2005년 8월의 수온자료 7.7~27.2°C였다. 시간이 지날수록 저층의 수온은 낮아지고 있었으며, 동계에 대기의 기온차이로 인한 것으로 보인다.

조사해역의 표층염분 농도(Fig. 4)는 31.4~32.1 psu(평균 31.8 psu)로 정점 1에서 가장 낮았고 북서쪽으로 갈수록 조금씩 낮아지고 있었으며, 10m에서도 31.5~32.2 psu(평균 31.9 psu)로 표층과 비슷한 분포를 보이고 있었는데 이는 남하하는 상대적 저염분의 해수가 영향을 미치고 있는 것으로 보인다. 20m에서는 31.4~32.8 psu(평균 31.8 psu)로 주변해역 정점 1, 2에서 투기해역으로 염분이 감소하는 분포를 보이고 있었으며, 정점간 염분차가 1.2 psu로 수층중에서 가장 큰 차이를 보이고 있었다. 30m에서는 32.2~33.0 psu(평균 32.5 psu)로 정점 10을 중심으로 주변해역으로 원형모양으로 염분이 높아지는 분포를 보이고 있었다. 40m에서는 32.5~32.9 psu(평균 32.6 psu)로 정점 1에서 2의 남동쪽방향으로 농도가 높아지는 분포를 보이고 있었으며, 50~70m에서는 32.6~32.9 psu(평균 32.7 psu)로 연구해역 내 동쪽으로 갈수록 염분이 높아지는 분포를 보였는데, 고염의 황해냉수가 남동쪽으로 영향을 미치는 것으로 보인다.

주변해역과 투기해역의 염분농도는 전체적으로는 황해중심수역에서의 수괴특성과 유사하였으며, 냉수괴가 분포하는 30m이하에서는 32.3 psu이상의 상대적 고염수가 분포하고 있었다. 또한 각 정점별 수심 1m간격으로 처리된 염분의 수직분포(Fig. 6)를 보면 모든 정점 0~15m사이에는 염분농도가 일정하거나 약간의 상승을 보이다가 수온약층인 20m층에서 급격하게 낮아지는 역전현상이 모든 정점에서 관측되고 있었다. 이는 하계에 강수량 증가와 남하하는 고온저염의 황해세력이 황해중앙해역에서 혼합에 의한 현상으로 사료된다. 박(1998) 등의 7월

염분자료 31.5~34.4 psu(평균 32.7 psu)보다는 비슷하거나 낮은 분포를 보였으며, 신(2008)의 2001~2005년 8월의 염분자료 31.7~32.9 psu와는 유사한 분포를 보이고 있었다.

본 연구해역에서 7월의 수괴 분포특성(Fig. 7.)은 표층~10m에서는 수온 20℃ 이상, 염분 32.5 psu이하를 보였다. 20m에서는 분산되어 있는 것으로 보아 서로 다른 수괴들의 혼합과정을 나타내고 있었으며, 30m~저층에서는 12℃ 이하 32psu 이상인 황해냉수가 분포하고 있었다.





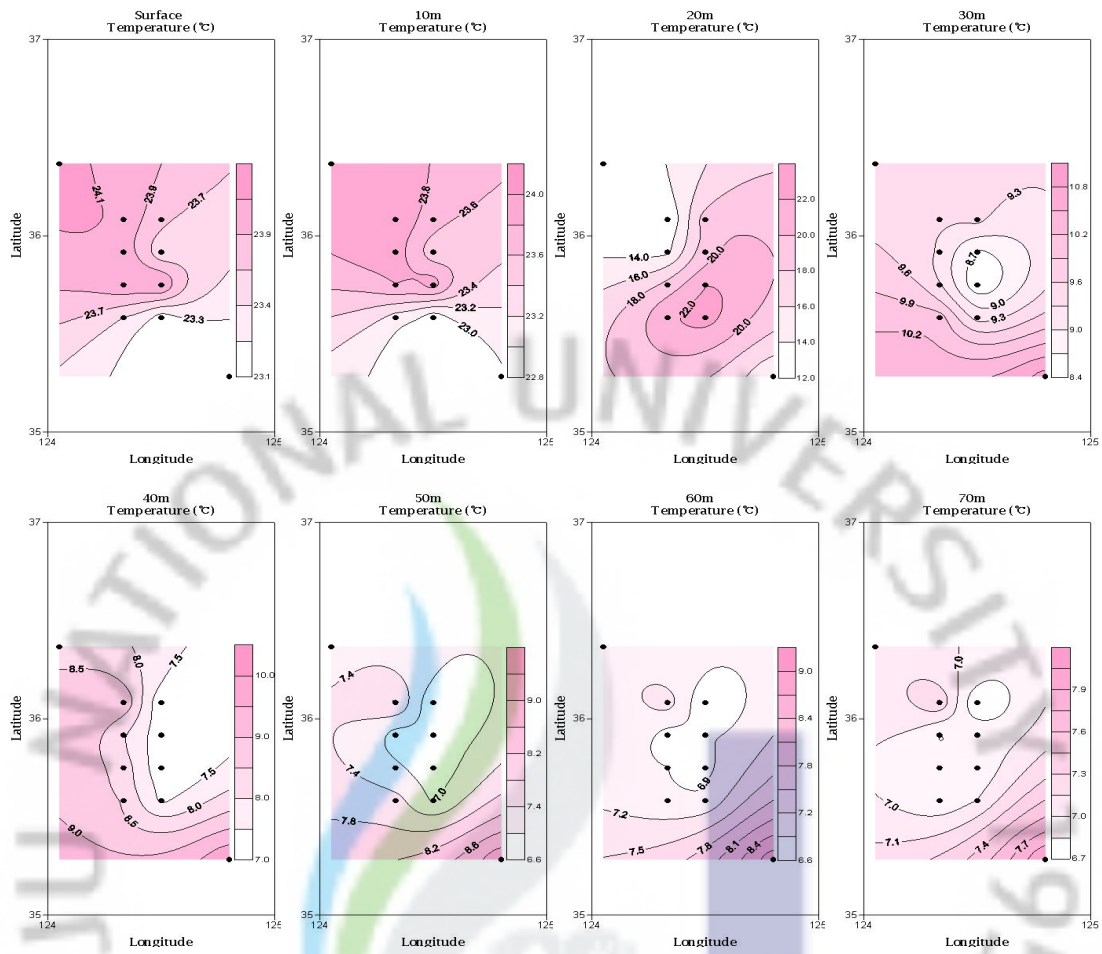


Fig. 2. The horizontal distribution of temperature in the study area in July 2009.

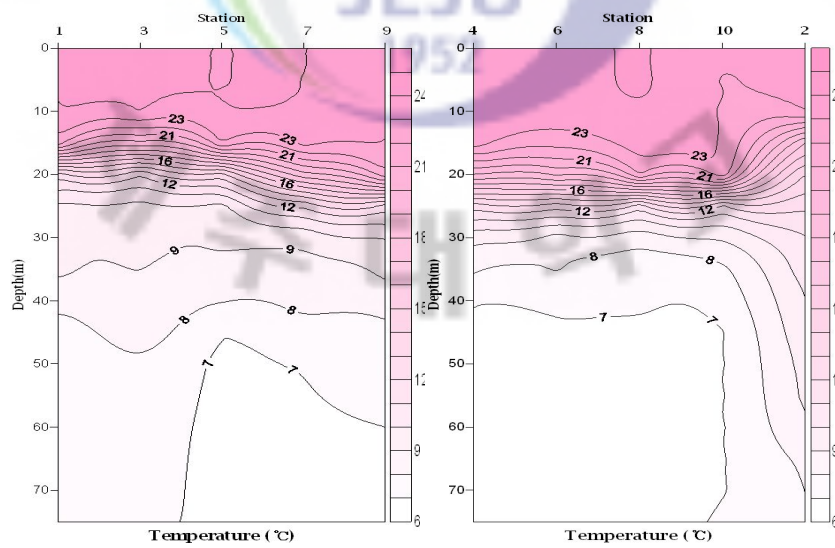


Fig. 3. The vertical section of temperature in the study area in July 2009.



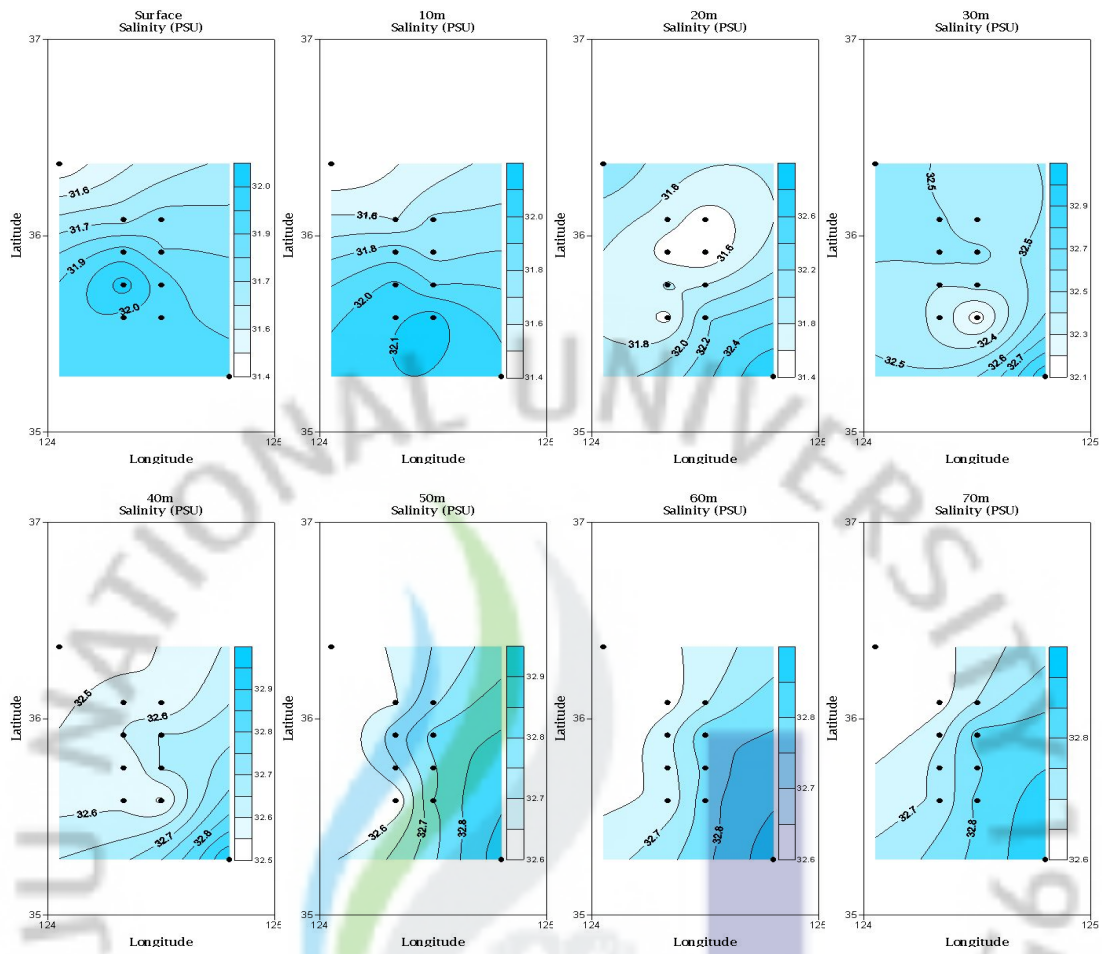


Fig. 4. The horizontal distribution of salinity in the study area in July 2009.

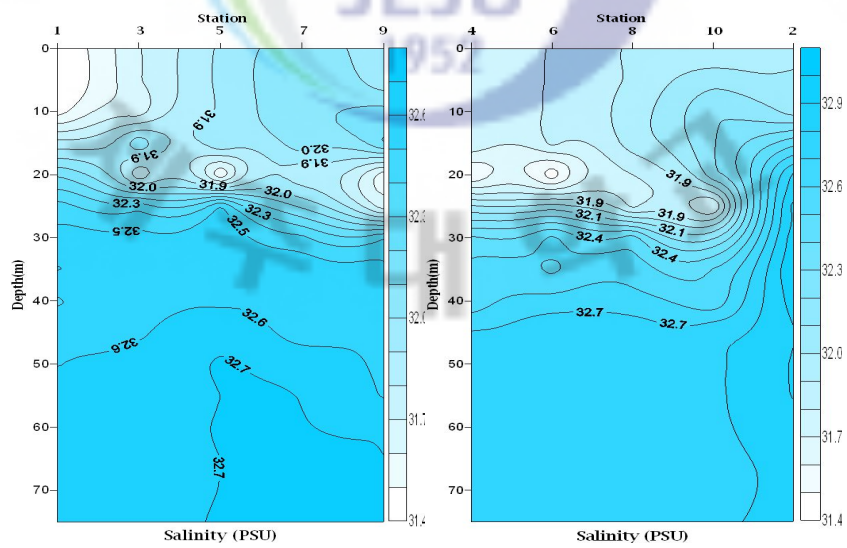


Fig. 5. The vertical section of salinity in the study area in July 2009.

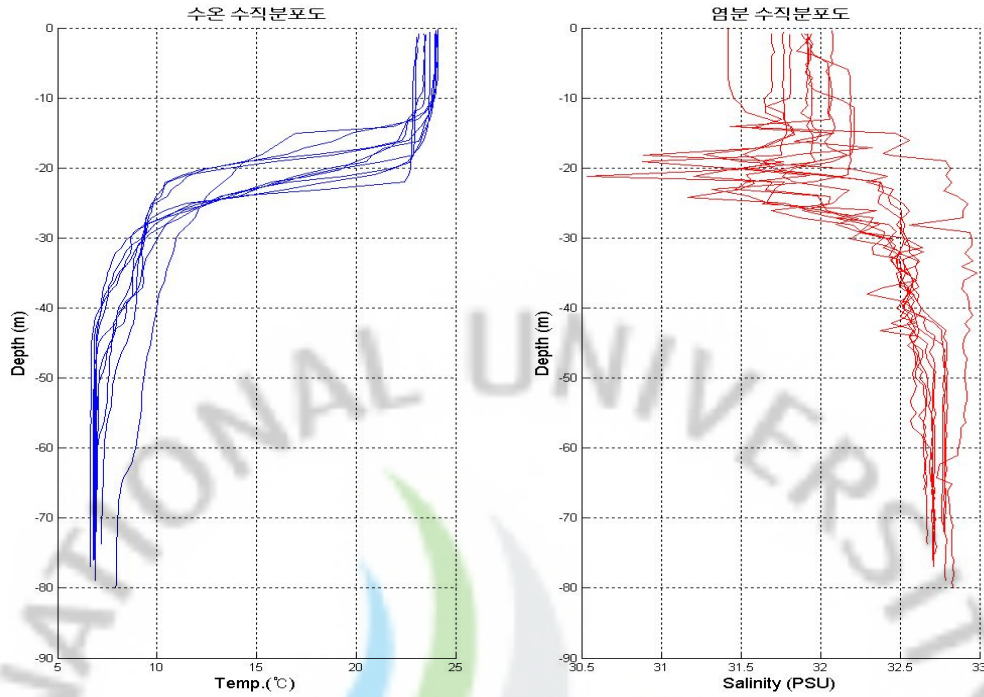


Fig. 6. The vertical distribution of temperature and salinity in the study area in July 2009.

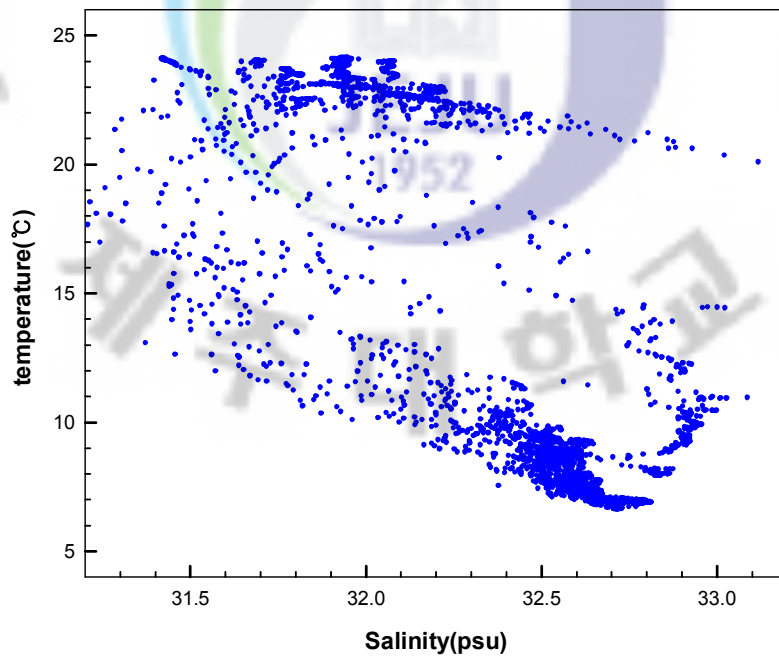


Fig. 7. T-S diagram in the study area in July 2009.

### 3.1.2. pH

일반적으로 안정된 해수(염분 35 psu 부근)의 pH는 8.1~8.2의 범위를 보이며 염분과 pH는 정의 상관관계를 갖는다. 대양의 경우 생물호흡과 분해활동이 활발하게 일어나는 800m부근의 수심에서 pH가 감소되기도 하나 그 이심에서는 다시 증가한다. 하지만 유기물의 과도한 유입으로 인하여 저산소 수괴를 이루고 있는 발트해나 흑해의 저층에서는 7.8부근의 낮은 pH를 보이기도 한다(Goyet et al., 1991; Millero and Sohn, 1992). 따라서 대양에 비하여 수심이 매우 얇은 연구해역에서의 pH저하는 해양투기에 따른 유기물 유입이 저층에 지화학적 영향을 미치고 있다고 볼 수 있다. 주변해역에서 pH범위는 7.74~8.05(평균 7.86), 투기해역에서의 pH범위는 7.75~8.23(평균 8.00)이었다. 주변해역과 투기해역에서의 pH변화를 보면 저층으로 갈수록 pH는 감소하고 있었으며, 표·저층간의 pH차이는 주변해역에서는 0.3, 투기해역에서는 0.5정도로 주변해역보다는 투기해역에서 약간 큰 차이를 보이고 있었다. 정점 1, 4, 9, 10의 저층에서는 해양수질 환경기준 II등급에 해당하는 값으로 이것은 유기물 산화에 따른 CO<sub>2</sub>의 증가에 의한 것이라 사료되며, 또한 pH의 감소는 탄산염 입자의 해수화학적 용해를 증가시키고 CO<sub>2</sub>분압을 높여 해양의 CO<sub>2</sub>흡수 능력을 저해할 수 있다.

박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역의 pH는 7.98~8.21(평균 8.11), 투기해역은 7.85~8.21(평균 8.08)이었으며, 신(2008)의 2001~2005년 8월에 투기해역의 pH는 7.85~8.23이었다. 이번 조사의 투기해역에서 pH가 더욱 큰 폭의 변화를 보였다.

### 3.1.3. 부유물질(SS) 및 휘발성부유물질(VSS)

주변해역에서 SS는 2.6~5.2mg/ℓ(평균 3.7mg/ℓ), 투기해역에서는 2.9~19.4mg/ℓ(평균 7.4mg/ℓ)였다. 거의 모든 정점에서 저층으로 갈수록 농도는 높아지고 있었으며 특히 투기해역에서의 부유물질 농도는 주변해역에 비해 매우 높게 나타나고 있었다(Fig. 8). 이는 연구해역이 비교적 수심이 얇아 해수교란에 의해 저층 퇴적물로부터 재부유되는 부유물질의 양이 많기 때문이라 사료되고(신, 2008), 저

층에 폐기물의 침전으로 부유물질의 증가는 저서생물 생육에 많은 지장을 줄 수 있다. 박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역의 SS는 21.5~63.0mg/ℓ (평균 39.3mg/ℓ), 투기해역은 27.5~69.5mg/ℓ (평균 40.9mg/ℓ)였으며, 신(2008)의 2001~2005년 8월에 투기해역의 SS는 0.36~3.53mg/ℓ (평균 2.3mg/ℓ)으로 1996년의 자료보다는 낮은 분포를 보였고, 2001~2005년의 자료보다는 높은 분포를 보이며 조사시기와 기상, 조석상황 등에 따라 큰 차이의 분포를 보이고 있었다.

주변해역에서 VSS는 0.6~4.4mg/ℓ (평균 2.7mg/ℓ), 투기해역에서는 1.2~11.6 mg/ℓ (평균 4.1mg/ℓ)이었다. 투기해역에서 저층의 휘발성부유물질 농도는 부유물질 농도에 비해 매우 낮았다(Fig. 8).

#### 3.1.4. 화학적산소요구량(COD)

주변해역에서 COD 농도는 0.24~1.82mg/ℓ (평균 0.88mg/ℓ), 투기해역에서는 0.12~3.41mg/ℓ (평균 1.23mg/ℓ)이었다. 거의 모든 정점에서 저층으로 갈수록 농도는 높아지고 있었으며, 특히 투기해역에서의 COD 농도는 주변해역에 비해 다소 높게 나타나고 있었으며(Fig. 8), 투기해역 정점 3, 4(휴식년구역), 5, 7, 10의 저층은 해양수질 환경기준 III등급, 나머지 투기해역의 저층에서는 I~II 등급을 나타내었다. 이는 해양투기에 따른 유기물 유입으로 인한 영향으로 보이며, 주변해역 정점 1은 저층으로 갈수록 농도가 높아져 환경기준 II 등급으로 투기해역 정점과 유사한 농도를 보이고 있었다. 박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역의 COD는 0.52~2.16mg/ℓ (평균 1.16mg/ℓ), 투기해역에서는 0.08~1.80mg/ℓ (평균 1.11mg/ℓ)였으며, 신(2008)의 2001~2005년 8월에 투기해역의 COD는 1.10~1.48 mg/ℓ (평균 1.34mg/ℓ)였다. 이번 조사의 투기해역에서는 1996년 자료보다는 높은 분포를 보였고, 2001~2005년의 자료보다는 낮은 분포를 보이고 있었다.

#### 3.1.5. 용존산소(DO) 및 용존산소포화율

주변해역에서 DO(Fig. 8)는 7.4~9.6mg/ℓ (평균 8.5mg/ℓ), 투기해역에서는 7.2~10.7mg/ℓ (평균 8.3mg/ℓ)였다. DO는 거의 모든 정점 수심 30m층에서 증가하

다가, 저층으로 갈수록 감소하였으며 주변해역보다는 투기해역에서 DO는 낮게 분포하고 있었다. 또한 정점 5, 8 저층에서는 해양수질 환경기준 II등급을 나타내고 있었다.

박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역의 DO는 7.0~9.4mg/l (평균 8.1mg/l), 투기해역에서는 6.9~8.3mg/l (평균 7.6mg/l)였으며, 신(2008)의 2001~2005년 8월에 투기해역은 5.9~7.8mg/l (평균 6.8mg/l)로 이번 조사에서 다소 높은 분포를 보이고 있으나 감소폭은 가장 크게 나타났다.

주변해역에서 용존산소 포화도는 80.5~135.0 % (평균 101.3%), 투기해역에서의 용존산소 포화도는 74.3~136.1% (평균 99.1%)였다. 주변해역과 투기해역을 비교하면 표층에서 용존산소 포화도는 투기해역에서 대부분 높게 분포하고 있었으나 저층으로 갈수록 용존산소 포화도 감소는 투기해역에서 더 많은 차이를 보이고 있었다(Fig. 8). 투기해역 저층에서의 용존산소 포화도 감소는 물리적 포화도 보다는 유기물 산화에 인한 것이기 때문에 pH의 감소와 정의 상관관계를 보이고 있었다(박 등, 1998). 따라서 해양투기 유기물의 산화에 따른 용존산소의 소비가 투기해역 저층에서 집중적으로 일어나고 있음을 알 수 있었다(박 등, 1998).

박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역에의 용존산소 포화도는 85.3~115.4% (평균 102.1%), 투기해역에서는 81.5~103.0% (평균 95.8%)였다. 이번 조사에서 큰 폭으로 감소하고 있었다.

### 3.1.6. 엽록소 a(Chlorophyll a)

식물플랑크톤은 기초생산력의 척도로서 생태계에 기초먹이 생물로 중요한 역할을 하며 생태계내의 물리화학적 환경요인의 변동에 따라 종조성이나 출현량에 있어 뚜렷한 변동을 보인다. Chlorophyll a는 식물플랑크톤 중 가장 높은 비율을 나타내는 색소로서 식물플랑크톤의 양변동을 모니터링 할 수 있다. 따라서 Chlorophyll a의 시공간적 변동을 파악하는 것은 생태계내의 물질순환을 밝히기 위한 기초자료로서 매우 중요하다(오 등, 1999).

주변해역에서 Chlorophyll a 농도(Fig. 8)는 0.36~0.90  $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.55  $\mu\text{g}/\text{l}$ ), 투기해역에서의 농도는 0.27~1.39  $\mu\text{g}/\text{l}$  (평균 0.59  $\mu\text{g}/\text{l}$ )였다. 거의 모든 정점



수심 30m부근에서 증가하였다가 저층으로 갈수록 감소하고 있었으며, 이는 유광층인 30m에서 식물플랑크톤의 광합성에 의해 산소농도가 높아진 것으로 생각된다. 또한 주변해역보다는 투기해역에서 Chlorophyll a의 저층농도가 대부분 높게 분포하고 있는데, 이러한 이유는 폐기물 투기로 인한 저층에서 축적된 영양염 공급이 식물성플랑크톤 증식의 영향이라 사료된다.



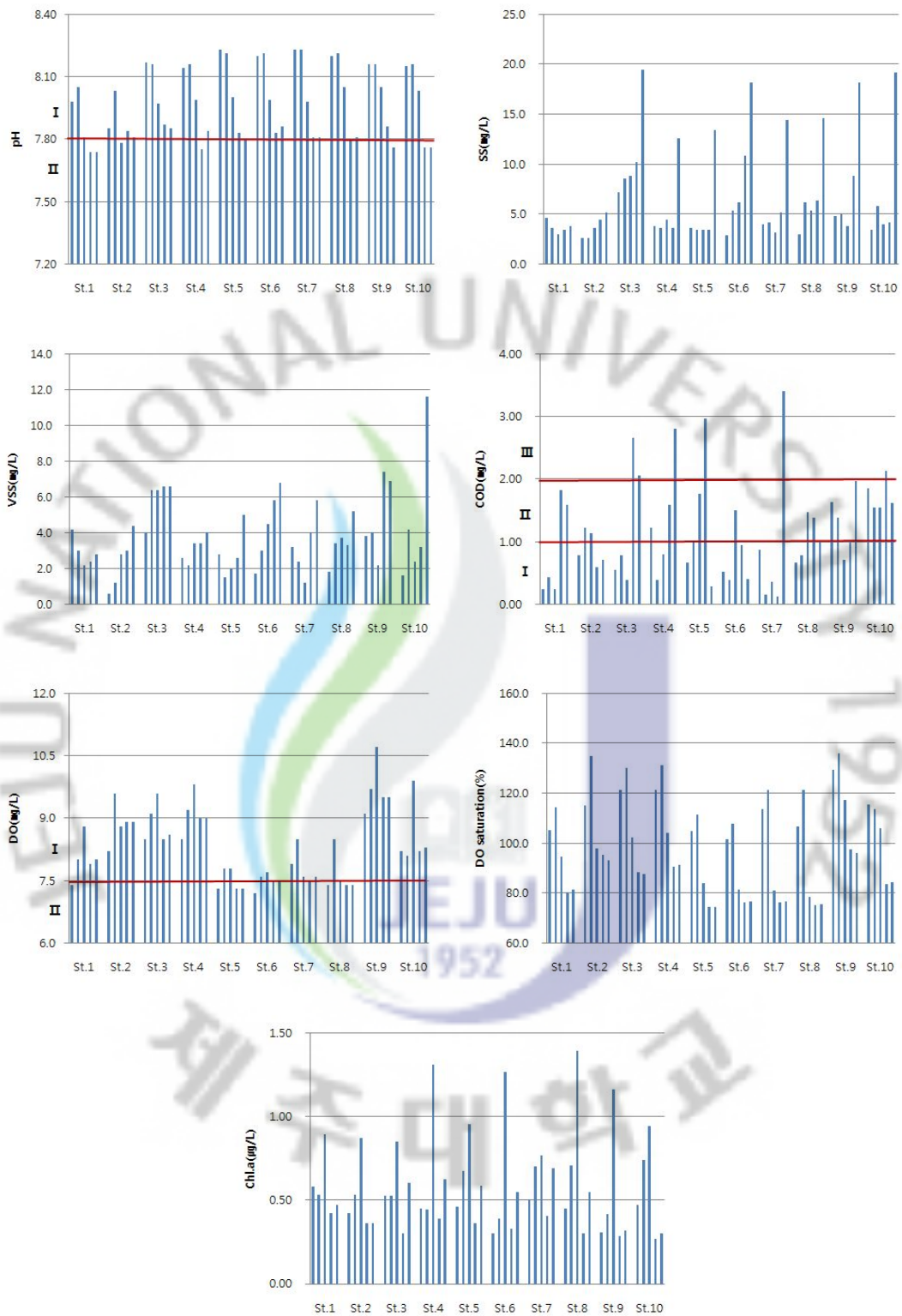


Fig. 8. The distribution chart of Seawater environmental variables in the study area in July 2009(arrange the station in depth order).

### 3.1.7. 무기영양염류의 분포 특성 및 영양상태 평가

해양에서의 영양염 분포는 공급과 소비라는 두 가지 측면에서 고려할 수 있으며, 공급의 측면에서는 육상에서의 풍화에 의한 산물, 유기물의 분해 및 각종 폐수 등이 있으며, 소비의 측면에서는 식물 플랑크톤 및 미소 플랑크톤 또는 박테리아 등 미생물의 광합성에 의한 것들을 들 수 있다. 암모니아질소는 해양식물의 질소계 영양염으로서 쉽게 이용되어 해수중에 낮은 농도로 존재하며 농도변화가 상당히 빠르게 나타난다. 아질산질소는 가장 불안한 불안정한 형태의 무기질소로서 질산화과정(nitrification) 또는 탈질화과정(denitrification) 중 일시적으로 거치는 단계이며, 따라서 TIN(total inorganic nitrogen) 중 가장 비율이 낮게 존재한다. 또한 질산질소는 암모니아나 아질산염에 비해 비교적 안정된 상태로 대부분의 해양에서 무기질소 중 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 알려져 있다(차 등, 1998).

주변해역에서 총무기질소(Fig. 9)는 1.42~8.43 $\mu$ M(평균 5.07 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 0.35~20.06 $\mu$ M(평균 5.59 $\mu$ M)의 분포를 보였다. 수심별 분포를 보면 표층(평균 1.65 $\mu$ M), 10m(평균 2.33 $\mu$ M), 30m(평균 3.31 $\mu$ M)에서는 투기해역 정점 3, 4에서 주변해역 방향으로 농도가 높아지고 있었다. 50m(평균 9.08 $\mu$ M), 저층(평균 11.06 $\mu$ M)에서는 위의 수심층보다 매우 높은 농도를 나타냈으며, 주변해역에서 투기해역 정점 8, 9, 10 방향으로 높아지는 분포를 보이고 있었다.

총무기질소의 수직단면(Fig. 10)에서 수직방향 이동의 제한을 보였고, 표층과 저층과의 농도차도 다소 높게 나타나고 있었으며, 주변해역과 투기해역의 저층에서 각각 평균 8.16 $\mu$ M과 11.79 $\mu$ M로 투기해역에서의 농도가 높았다. 박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역에서의 총무기질소는 0.56~8.43 $\mu$ M(평균 2.30 $\mu$ M), 투기해역에서는 0.38~10.26 $\mu$ M(평균 3.24 $\mu$ M)였으며, 신(2008)의 2001~2005년 8월에 투기해역은 2.43~7.45 $\mu$ M(평균 4.95 $\mu$ M)였다. 이번 조사에서는 지난 자료보다는 높은 농도를 나타내고 있었다.

주변해역에서 인산 인(Fig. 11)은 0.04~0.87 $\mu$ M(평균 0.31 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 0.01~2.16 $\mu$ M(평균 0.57 $\mu$ M)의 분포를 보였다. 수심별 분포



를 보면, 표층(평균  $0.05\mu\text{M}$ )에서는 정점 2( $0.16\mu\text{M}$ )를 제외한 모든 해역에서  $0.1\mu\text{M}$  이하의 비교적 낮은 농도가 분포하고 있었으며, 10m(평균  $0.08\mu\text{M}$ )에서는 표층과 비슷한 농도분포를 보이며, 정점 3, 4, 5를 잇는 등치선이 남서쪽해역으로 갈수록 농도가 높아지는 분포를 보이고 있었다. 30m(평균  $0.20\mu\text{M}$ )에서는 정점 3에서 남쪽해역으로 갈수록 높은 농도를 나타냈으며, 50m(평균  $1.01\mu\text{M}$ )에서는 표층~30m보다 다소 높은 농도를 나타냈으며, 정점 10( $1.86\mu\text{M}$ )에서 북쪽과 남쪽해역으로 갈수록 낮아지는 분포를 보이고 있었다. 또한 투기해역 정점 4, 5, 7은 해양수질 환경기준 II등급, 정점 8, 10은 III등급에 해당하는 농도를 보이고 있었다 (Fig. 15). 저층(평균  $1.25\mu\text{M}$ )에서는 50m와 유사한 농도범위와 공간분포를 보이고 있었으며, 정점 10( $2.16\mu\text{M}$ )에서 가장 높은 농도를 보이고 있었으며, 투기해역 정점 3, 4(휴식년구역), 5, 8, 9는 해양수질 환경기준 II등급, 정점 7, 10은 III등급에 해당하는 농도를 보이고 있었다.

인산 인농도(Fig. 12)의 표·저층 차는 약 10배 이상으로 크게 나타났으며, 주변해역과 투기해역의 저층에서 각각 평균  $0.52\mu\text{M}$ 과  $1.43\mu\text{M}$ 로 투기해역에서의 농도가 높게 나타내었다. 박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역은  $0.01\sim 0.85\mu\text{M}$ (평균  $0.25\mu\text{M}$ ), 투기해역에서는  $0.03\sim 0.88\mu\text{M}$ (평균  $0.28\mu\text{M}$ )였고, 신(2008)의 2001~2005년 8월에 투기해역에서는  $0.05\sim 0.67\mu\text{M}$ (평균  $0.38\mu\text{M}$ )이었다. 이번 조사에서는 지난 지난 1996년 7월 자료보다 매우 높은 분포를 보이고 있었다. 서해병해역의 경우 인의 함량이 높은 분뇨, 축산폐수 등과 각종 오니류가 주로 배출되는데 이러한 폐기물이 저층에 침강, 유입된 유기물의 일부가 분해과정에 의해 재생산되어 축적되었기 때문이라 사료된다.

규소는 가장 풍부한 1차 생산자인 규조류(diatom)의 골격물질에 필요한 영양원소이며, 질산질소나 인산인과 같이 인위적인 공급원에 의해서보다는 대부분이 규산질 광물이나 알루미늄-규산질 광물의 풍화작용에 의해 해양으로 공급된다(차 등, 1998). 주변해역에서 규산 규소(Fig. 13)는  $2.53\sim 16.59\mu\text{M}$ (평균  $9.23\mu\text{M}$ )의 분포를 보였으며, 투기해역에서는  $1.24\sim 15.50\mu\text{M}$ (평균  $6.31\mu\text{M}$ )의 분포를 보였다. 수심별 분포를 보면 표층(평균  $3.65\mu\text{M}$ )에서는 정점 2에서  $8.12\mu\text{M}$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 연구해역내 북쪽으로 갈수록 농도가 낮아지고 있었다. 10m(평균  $3.34\mu\text{M}$ )에서는 표층과 비슷한 농도범위와 공간분포를 보이고 있었으며, 30m(평

균 4.96 $\mu$ M)에서는 주변해역 정점 1(8.45 $\mu$ M)과 2(12.55 $\mu$ M)에서 투기해역 방향으로 농도가 낮아지고 있었다. 50m(평균 10.89 $\mu$ M)에서는 다른 수심층보다 높은 농도를 보이고 있으며, 정점 2(14.81 $\mu$ M)에서 가장 높은 값을 보이며 북쪽해역으로 갈수록 농도가 높아지고 있었다. 저층(평균 11.62 $\mu$ M)에서는 50m와 유사한 농도 범위로 높은 값을 보이고 있었다.

규산 규소농도(Fig. 14)는 표층과 저층과의 차이는 크게 나타나고 있었고, 주변해역과 투기해역의 저층에서 각각 평균 13.11, 11.25 $\mu$ M로 주변해역에서 높은 농도로 분포하고 있었다. 박 등(1998)의 1996년 7월에 주변해역에는 0.74~14.52 $\mu$ M(평균 3.22 $\mu$ M), 투기해역에서는 0.74~14.80 $\mu$ M(평균 3.92 $\mu$ M)이었다. 이번 조사에서는 지난 1996년 7월 자료보다 매우 높은 농도분포를 보였다. 규산규소의 분포는 총무기질소와 인산인의 분포경향과 매우 유사한 특징을 보이고 있었다.

연구해역에서 영양염은 강한 성층으로 인하여 표층으로 공급되지 못하고, 더욱 낮은 수온으로 인한 제한적 생물활동 때문에 영양염 소비 또한 낮아 저층에는 풍부한 영양염을 함유하고 있었다.

해수 중 영양염의 농도와 N/P비는 식물플랑크톤과 일차생산자의 생체 기본구성이 되며, 또한 기본적으로 식물의 성장에 제한을 주고 있는 영양인자로서 C:N:Si:P의 비율은 106:16:16:1이며 N/P비가 16이상인 경우에는 인에 비해 무기질소가 상대적으로 많아 식물플랑크톤의 성장은 인의 용존량에 의해서 지배된다고 볼 수 있으며, 16보다 작은 경우에는 상대적으로 많은 인에 의해 무기질소가 제한을 하고 있다(Redfield, 1958).

주변해역에서 N/P비(Fig. 17)는 8.9~57.3(평균 28.8)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 2.7~223.0(평균 27.1)이었다. 연구해역 표층에서는 상대적으로 많은 질소로 인해 인이 제한인자로 작용하였고, 투기해역 저층에서는 인이 과잉으로 공급되고 있었다. 그래서 질소는 빠르게 소비되고, 인의 생지화학적 순환은 질소에 비해 느리게 작용하는 것으로 보인다.

겉보기 산소소비량(apparent oxygen utilization, AOU)은 영양염의 재생에 관계하는 양으로 수괴에 따라서 재생되는 영양염의 조성이 차이가 있음을 의미하며(Maita and Toya, 1986), 또한 생물학적으로 소모된 산소의 양을 계산하기 위해서 이용한다. 이것은 물 속에 남아있는 산소의 양이 아니라 소비된 산소의 측

정치이고, 표층수에서 산소는 대기와 평형치 또는 포화치라는 것을 전제로 한다. 질산염과 인산염 중의 성분과 생물학적 과정에 따른 용존산소의 변화량을 알면, 광합성이나 유기물의 분해정도를 파악할 수 있다. AOU 값이 (-)일 때에는 광합성, (+)일 때는 유기물 분해를 의미한다(이와 양, 1998).

연구해역의 표층~30m(Fig. 18)까지는 (-), 50m~저층으로는 (+)를 나타내었다. 인산염과 질산염, AOU를 측정한 결과 양호한 양의 상관관계를 나타내었고 직선의 기울기는 생물학적 과정에 따른 인산염, 질산염과 용존산소의 변화량의 비를 나타내는데 AOU가 0ml/L이상인 직선의 기울기 아랫부분에 해당하는 값은 생물학적 과정에 따른 산소소비가 이루어지는 반면 기울기 윗부분에 해당하는 값은 생물학적 과정에 따른 산소소비 이상의 다른 소비가 이루어지는 것으로 보아 인위적인 유입으로 인한 유기물분해가 이루어지고 있다고 보인다.

이번 조사에서 제시한 결과로 해역특성을 대표하는 영양상태를 판단하기에는 무리일 수 있으나 기본적으로 질소와 인의 농도가 기초생산자의 성장 및 현존량에 밀접한 관계가 있기 때문에 7월에 연구해역의 영양상태를 표현하고자 한다. Wasmund et al.(2001)이 제시한 평가 기준을 이용하여 조사해역의 영양상태를 평가하였으며(Table. 3), 연구해역의 무기질소와 인산인, 클로로필-a의 농도는 주변해역에서는 1.42~8.43 $\mu$ M(평균 5.07 $\mu$ M), 0.04~0.87 $\mu$ M(평균 0.31 $\mu$ M), 0.36~0.90  $\mu$ g/L(평균 0.55 $\mu$ g/L)이며, 투기해역에서의 0.35~20.06 $\mu$ M(평균 5.59 $\mu$ M), 0.01~2.16 $\mu$ M(평균 0.57 $\mu$ M), 0.27~1.39 $\mu$ g/L(평균 0.59 $\mu$ g/L)이다. 무기질소는 연구해역 정점 2, 3, 4, 6, 9의 정점 표층에서 빈영양상태를 보이다 수심이 깊어질수록 중영양 상태를 보였으며, 투기해역에서는 정점 5를 제외한 모든 정점의 저층에서 부영양상태를 나타내고 있었다. 인산인은 연구해역 수온약층까지 빈영양을 보이다가 정점 1을 제외한 모든 정점에서 50m이하수심에서 부영양상태를 나타내고 있었다. 클로로필-a는 연구해역 수심 30m에서만 중영양상태를 나타내고 나머지 수심에서는 빈영양상태의 해역특성을 보이고 있었다. 연구해역에서 기준 항목별로 편차를 보였으며, 영양염을 기준으로 표층~30m는 빈영양상태(Oligotrophic), 30~50m는 중영양상태(Mesotrophic), 50m이하의 수심에서는 부영양상태(Eutrophic state)로 추정할 수 있었다.

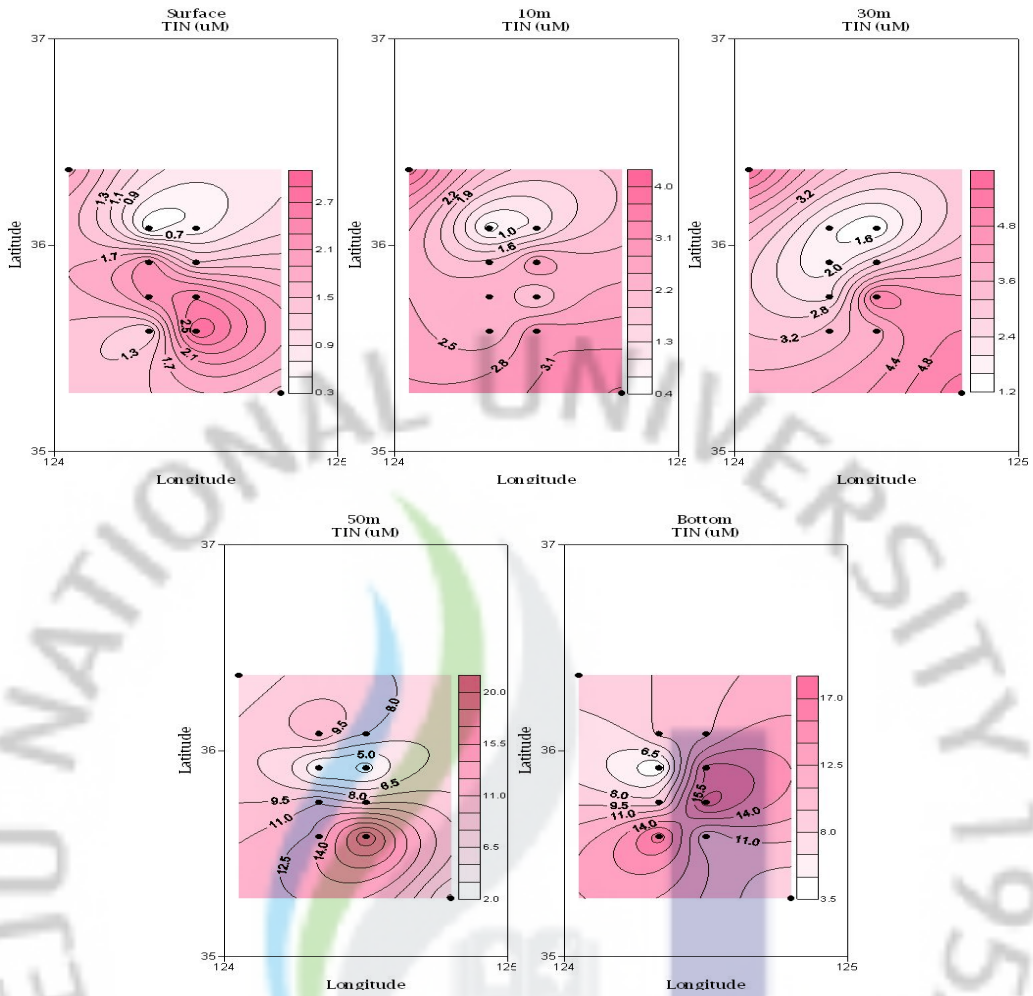


Fig. 9. The horizontal distribution of TIN in the study area in July 2009.

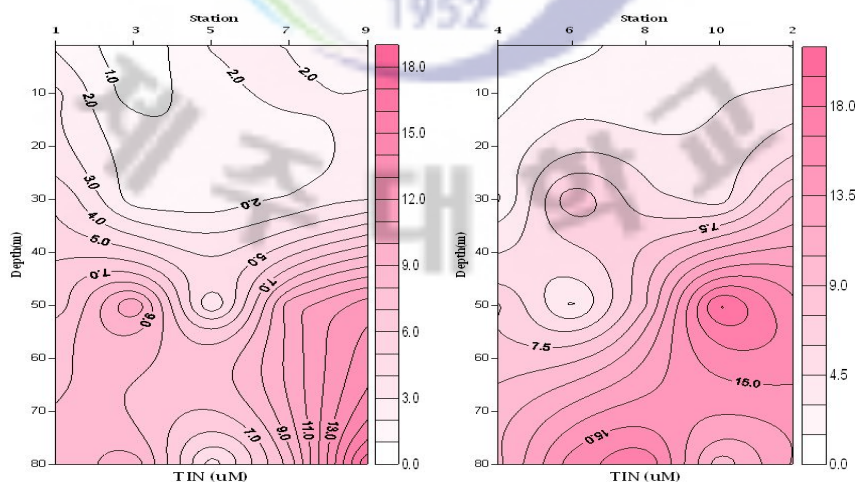


Fig. 10. The vertical section of TIN in the study area in July 2009.



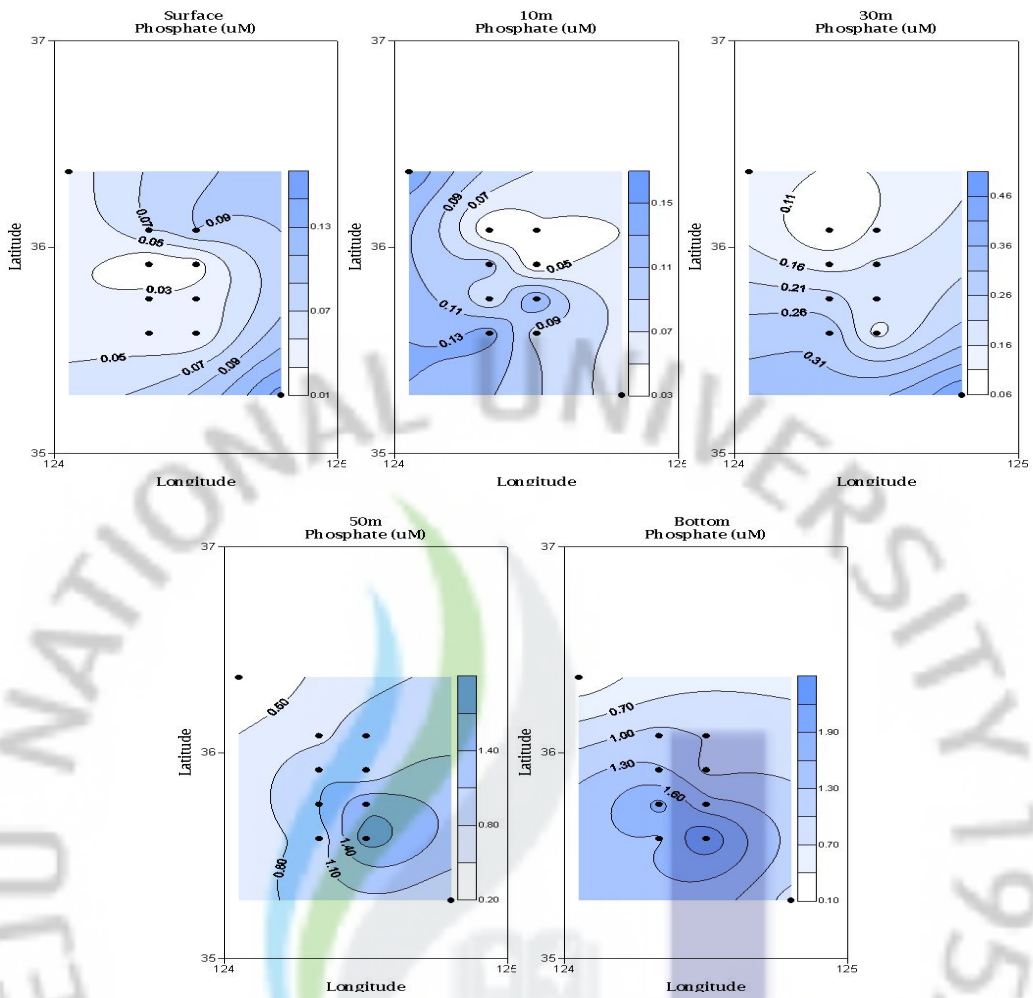


Fig. 11. The horizontal distribution of Phosphate in the study area in July 2009.

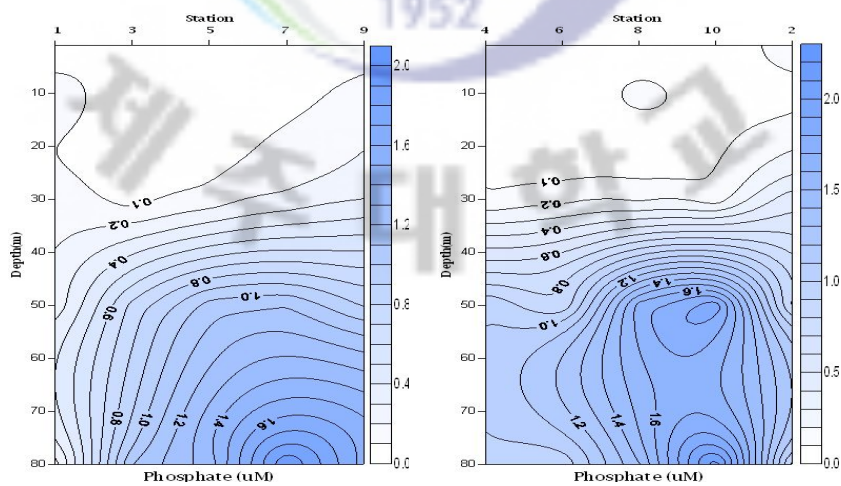


Fig. 12. The vertical section of Phosphate in the study area in July 2009.

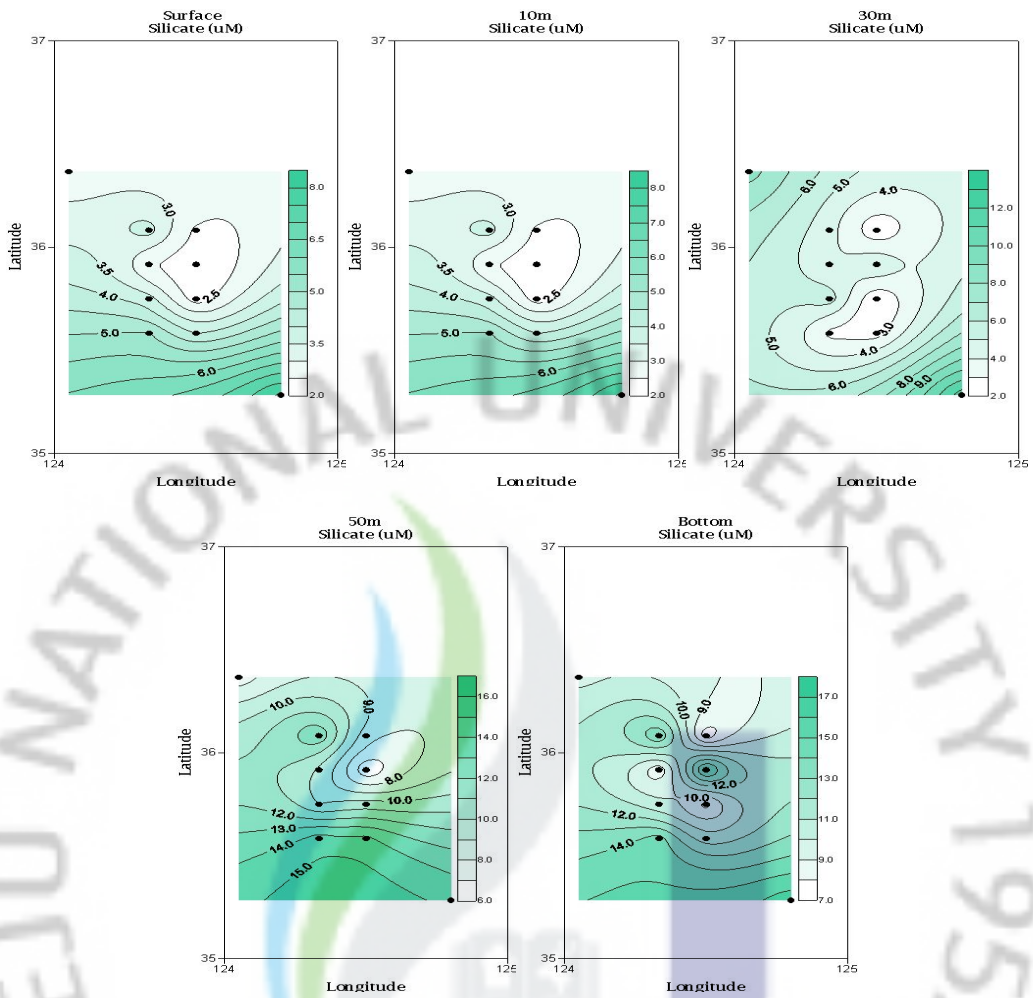


Fig. 13. The horizontal distribution of Silicate in the study area in July 2009.

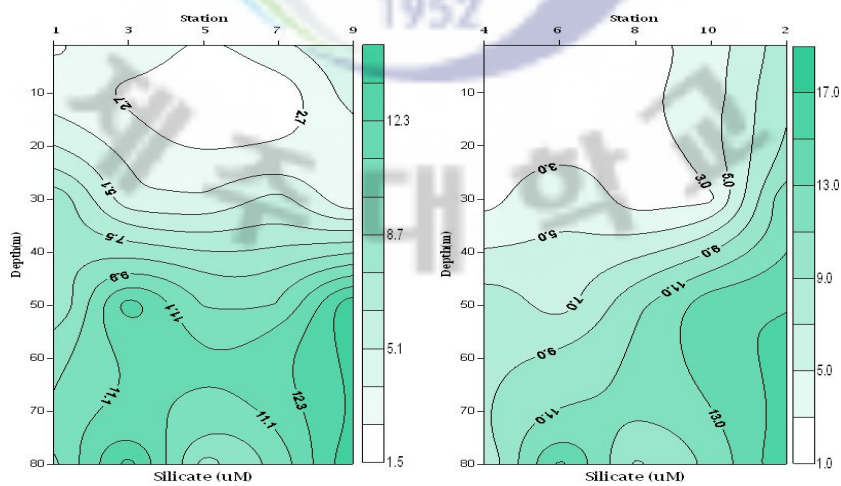


Fig. 14. The vertical section of Silicate in the study area in July 2009.

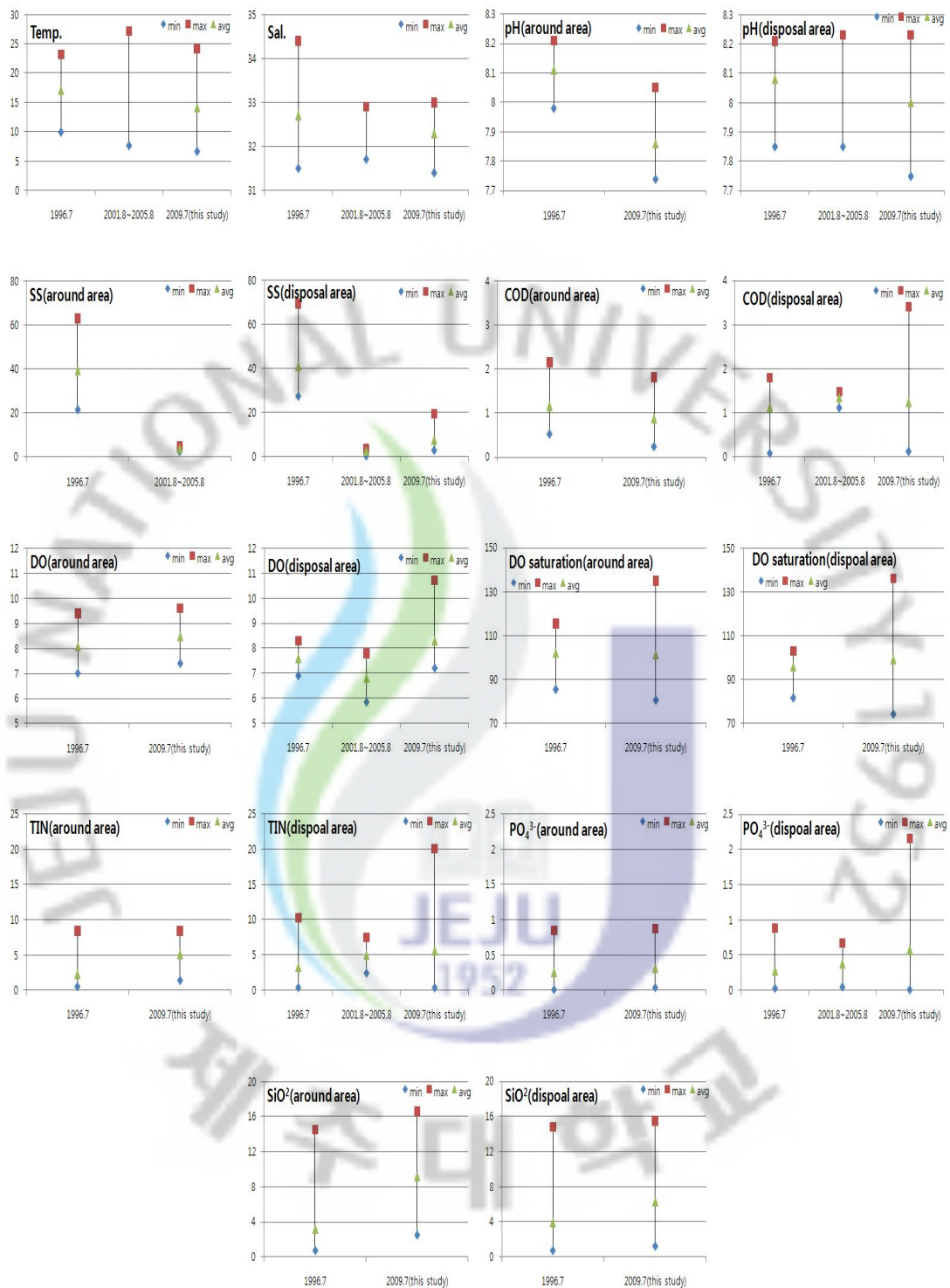


Fig. 15. Variation of seawater environmental variables in the around and dumping area.(reference: Park et al., 1996.07; Shin, 2001.08~2005.08; this study, 2009.07).

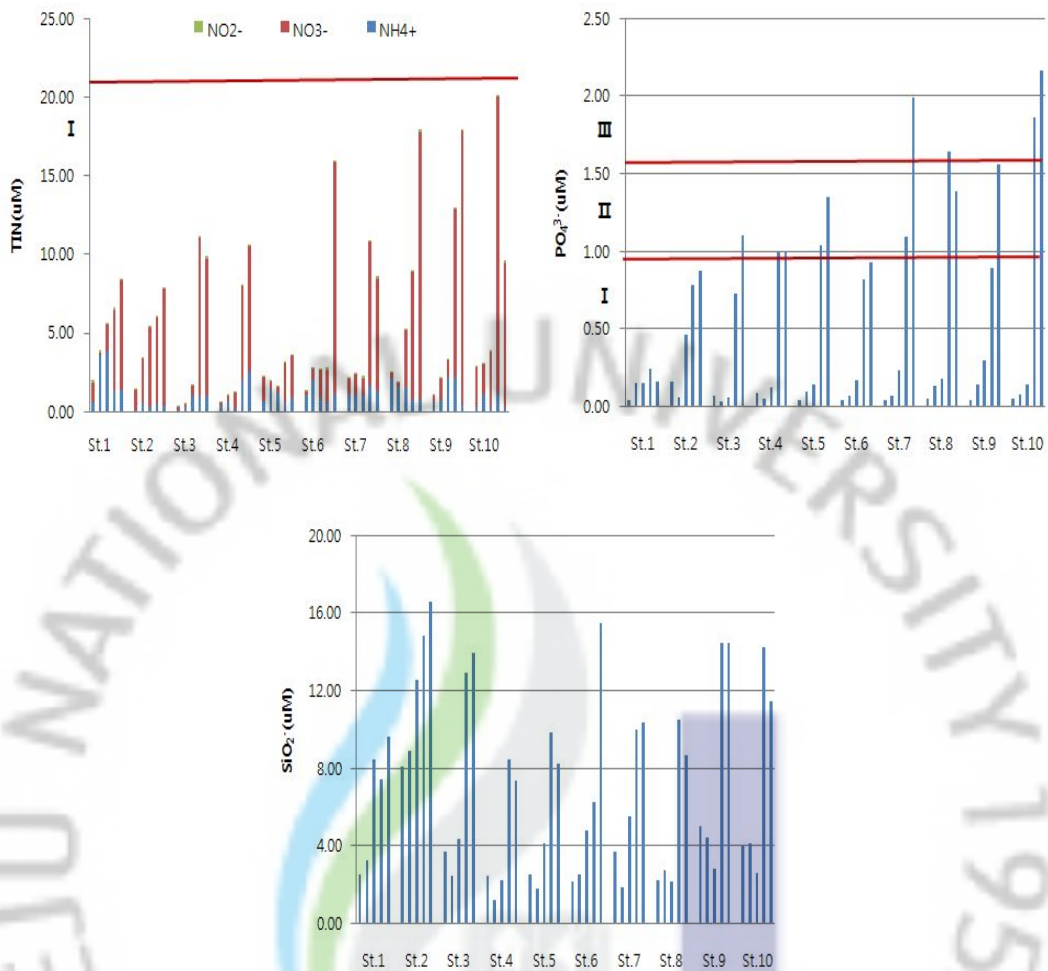


Fig. 16. The distribution chart of nutrients in the study area in July 2009(arrange the station in depth order).

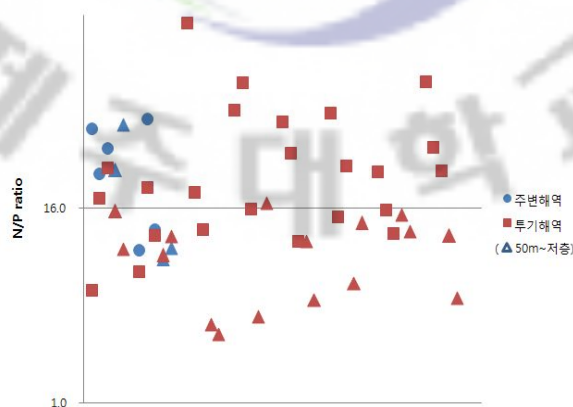


Fig. 17. The N/P ratio compare with the Redfield ratio.



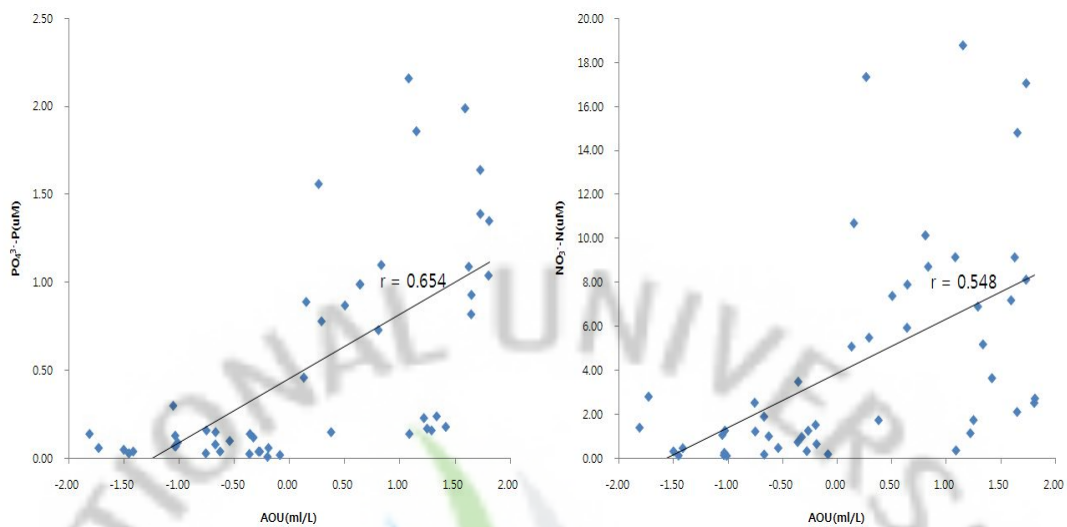


Fig. 18. Relationships between AOU and phosphate, nitrate.

Table 3. A scheme for trophic state classification proposed by Wasmund et al.(2001).

|                                      | TIN<br>μM        | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P<br>μM | Chl.a<br>μg/L   |
|--------------------------------------|------------------|--|-----------------|
| Oligotrophic                         | <2               | <0.2                                   | <0.8            |
| Mesotrophic                          | 2~10             | 0.2~0.8                                | 0.8~4           |
| Eutrophic                            | 10~60            | 0.8~3                                  | 4~10            |
| around<br>this study<br>(July, 2009) | 1.42~8.43(5.07)  | 0.04~0.87(0.31)                        | 0.36~0.90(0.55) |
| disposal<br>area                     | 0.35~20.06(5.59) | 0.01~2.16(0.57)                        | 0.27~1.39(0.59) |

### 3.1.8. 해수 중 미량금속 분포

해수 중에 존재하는 미량금속은 육지로부터 토양과 암석의 풍화, 채광활동, 화산활동 등으로부터 유래하여, 하천, 대기를 통하여 하구나 만으로 유입되며 어떤 금속원소들은 인간활동에 의한 해양투기가 영향을 줄 수 있다. 유입된 미량금속은 물리, 화학, 생물학적 과정 등 많은 변화를 겪는다. 이 과정에서 일부는 해수에 용존하고, 대부분 나머지 미량금속은 체류시간이 경과한 후 침전함으로서 해저퇴적물로 해수에서 제거된다(허, 2000). 폐기물의 해양배출로 유입되는 금속류 중에서 특히 문제가 되는 것은 Ag, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Zn이며, 이들 금속류는 모두 자연적으로 존재하는 물질로서 일정한 농도 이하에서는 독성이 나타나지 않을 뿐만 아니라 Cu, Zn과 같은 금속들은 생물체에게 필수적인 영양소이다. Cu는 소량일 경우 생물체의 생명활동에 필요한 원소이지만 과량일 경우 독성을 발휘하기 때문에 생물에게 독성이 큰 물질로 알려져 있다. 이에 반해 Ag, Cd, Cr, Hg은 필수영양소가 아니면서 그 독성은 매우 강하다. 따라서 상기 금속류들은 자체가 독성이 강하지 않더라도 전체적으로 많은 양이 해양에 유입된다면 커다란 문제를 일으킬 수 있다(장 등, 2007).

주변해역에서 Al 농도는 0.302~0.386 $\mu$ M(평균 0.364 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 0.247~0.435 $\mu$ M(평균 0.382 $\mu$ M)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 농도를 보였다. 일반적으로 Al의 수직농도분포는 대기유입, 심층으로부터의 공급(재부유된 퇴적물입자로부터의 용출), 수주내 제거(생물흡수, 입자물질로 제거) 등에 의해 조절된다(이와 양, 1998). 이번 연구해역의 거의 모든 정점의 표층과 저층에서 농도가 높았으며 몇 정점에서는 30m수층에서 다소 높아지는 분포를 보였다.

주변해역에서 As 농도는 ND~0.209 $\mu$ M(평균 0.118 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 ND~0.267 $\mu$ M(평균 0.139 $\mu$ M)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 농도를 보였다. 정점 2, 3, 5, 7, 9, 10에서 표층은 고갈을 보이고 있었고, 정점 1, 3, 4, 6, 9에서는 중층에서 최대치를 보이고 있었다.

주변해역에서 Cd 농도는 ND~0.002 $\mu$ M(평균 0.002 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 ND~0.009 $\mu$ M(평균 0.002 $\mu$ M)의 분포로 해역간 큰 차이는 없었으

며, 모든 정점에서 아주 낮은 농도를 보이고 있었다. 일반적으로 Cd은 생물학적 순환의 결과로서 표층에서 걸뺏기고 아표층에서 풍부하며 내부순환과정에 의해 주로 조절된다고 알려져 있으나(이와 양, 1998), 지역적으로 큰 차이를 보이는 듯 하였다.

주변해역에서 Cr 농도는 ND~0.036 $\mu$ M(평균 0.014 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 ND~0.026 $\mu$ M(평균 0.013 $\mu$ M)의 분포로 해역간 큰 차이는 없었다. 정점 2, 3, 5, 7, 9, 10 표층에서는 고갈을 보이고 있었고, 수온약층까지 농도가 감소하다가 수온약층이심에서는 농도가 증가하고 있었다.

주변해역에서 Cu 농도는 ND~0.013 $\mu$ M(평균 0.006 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 ND~0.035 $\mu$ M(평균 0.007 $\mu$ M)의 분포로 해역간 큰 차이는 없었으며, 모든 정점에서 아주 낮은 농도를 보이고 있었다.

주변해역에서 Pb 농도는 ND~0.101 $\mu$ M(평균 0.086 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 ND~0.131 $\mu$ M(평균 0.076 $\mu$ M)의 분포로 주변해역에서 약간 높은 농도를 보였으며, 정점 1, 2, 3, 5, 7, 9의 표층~30m수심에서는 다소 높은 농도를 나타내고 있었다. Pb은 대기수송을 통해 해양표층으로 유입되는데 이는 조사선의 운항시 연료연소에 의한 영향이라 생각되며, 이를 제외한 정점에서는 검출이하의 농도를 보였다.

주변해역의 Zn의 농도는 ND~0.010 $\mu$ M(평균 0.005 $\mu$ M)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 ND~0.218 $\mu$ M(평균 0.021 $\mu$ M)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 농도를 보였다. 정점 6 표층에서 0.218 $\mu$ M로 다른 정점에 비해 높은 농도를 보이고 있었다. 정점 1, 3, 7, 9에서는 표층이 저층보다 농도가 높은 반면 정점 2, 4, 5, 6, 8, 10에서는 저층이 표층보다 높은 농도를 보이고 있었다. Zn의 분포는 생물체의 경각과 연관이 있어서 규산염과 유사한 분포를 보이는데(이와 양, 1998), 연구해역에서는 규산염과 상관성이 없었다. 미량금소의 농도는 주변해역과 투기해역, 그리고 투기해역 내 휴식년구역에서 큰 농도차이를 나타내고 있지 않았으며, 해양수질 환경기준 이내의 수질을 보이고 있었다.

### 3.2. 주변해역과 투기해역의 표층퇴적물 분포특성

해양으로 유입된 유기물은 생물에 의한 이동과 해수의 유동에 따라 확산되어 침강하는 동안 분해되고, 일부는 퇴적물로 퇴적된다. 이러한 퇴적물 중 유기물은 해양 저서동물의 이용에 의해 다른 특성의 유기물로 재고정 되기도 하며, 미생물에 의한 산화분해과정을 거치면서 간극수 확산을 통해 무기영양염 형태로 수주 환경으로 용출되 해양 생태계의 일차생산자에 필요한 친생물원소로 거동하는 등 물질순환을 반복한다. 따라서 퇴적물내 유기물 환경을 파악하는 것은 해역의 유기오염 정도의 파악은 물론, 해양환경의 장기적인 변동과정을 추적함에 있어서 매우 중요하다(노, 2006).

연구해역의 퇴적물의 조성은 서편에는 니질과 점토질의 퇴적상이  $124^{\circ} 30' E$  까지 발달하여 있고, 동쪽으로 갈수록 퇴적물의 입도는 점차 조립해지며 연구해역의 동편은 사질로 구성되어 있다(김 등, 2001).

#### 3.2.1. 표층퇴적물 함수율, 강열감량, COD 함량과 분포

퇴적물내의 함수율은 퇴적물의 이화학적 특성을 결정하는 중요한 인자로서 퇴적물에 유기물이 집적되어 보존될 수 있는 정도를 나타낼 수 있다. 주변해역의 함수율은 39.9~64.0%(평균 52.0%)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 51.1~70.0%(평균 59.2%)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 값을 보였다(Fig. 19). 정점 2를 제외한 정점에서는 모두 50%이상의 상대적으로 높은 함수율을 보였고(Fig. 20), 투기해역에서 다소 높은 함수율을 보이고 있는데 이는 유기물 집적에 유리한 환경조건을 갖는 것으로 보인다.

표층퇴적물의 총 유기물량을 나타내는 주변해역에서 강열감량(IL)은 4.86~19.39%(평균 12.1%), 투기해역에서는 9.19~28.80%(평균 15.43%)로 투기해역에서 높은 함량을 보였다. 주변해역인 정점 2(4.86%)를 제외한 정점에서 모두 9.0%이상의 함량을 보였고, 투기해역 남쪽에 위치한 정점 7에서는 28.8%로 가장 높은 함량을 나타냈다. 연구해역 내에서는 함수율이 높고 입도가 세립해지는 연구해역의 서편으로 갈수록 강열감량이 높아지는 분포를 보이고 있었다(Fig. 20).

주변해역 퇴적물 중 화학적산소요구량(CODs)은 6.17~17.13mgO<sub>2</sub>/g-dry(평균 11.65mgO<sub>2</sub>/g-dry)의 분포를 보였으며, 투기해역에서는 12.84~22.88mgO<sub>2</sub>/g-dry(평균 17.38mgO<sub>2</sub>/g-dry)의 분포로 투기해역에서 높은 함량을 보였다. 주변해역 정점 2(6.17mgO<sub>2</sub>/g-dry)를 제외한 정점에서는 모두 12.0mgO<sub>2</sub>/g-dry이상의 상대적으로 높은 값을 보였고, 투기해역 정점 3, 5에서는 일본 수산환경 수질기준인 20mgO<sub>2</sub>/g-dry을 초과하였다. 연구해역 내 서쪽으로 갈수록 증가하였고, 함수율과 유사한 분포를 보이고 있었다.

퇴적물내의 함수율과 CODs는 강한 양의 상관관계( $r=0.958$ ,  $p<0.01$ )를, 강열감량은 높은 상관관계( $r=0.634$ )를 보이고 있었다(Table 4). 함수율이 높을수록 유기물 함량이 높게 나타나고 있는데 이는 높은 함수율이 유기물의 체류 및 보존이 유리한 입자형태의 원인으로 보인다. 주변해역인 정점 1에서는 강열감량이 19.39%, 화학적 산소요구량이 17.13mgO<sub>2</sub>/g-dry로 정점 2에 비해 다소 높은 함량을 보이고 있으며, 투기해역과 유사하거나 높은 분포를 보이고 있었다.

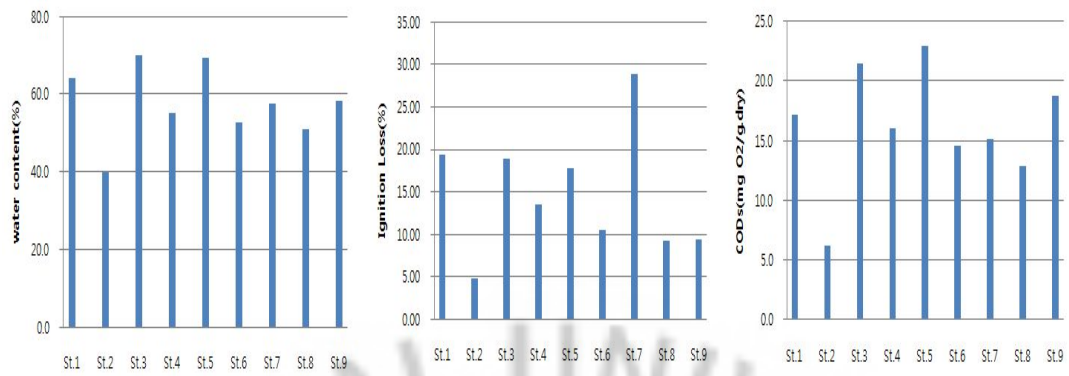


Fig. 19. The distribution chart of water content, ignition loss and CODs.

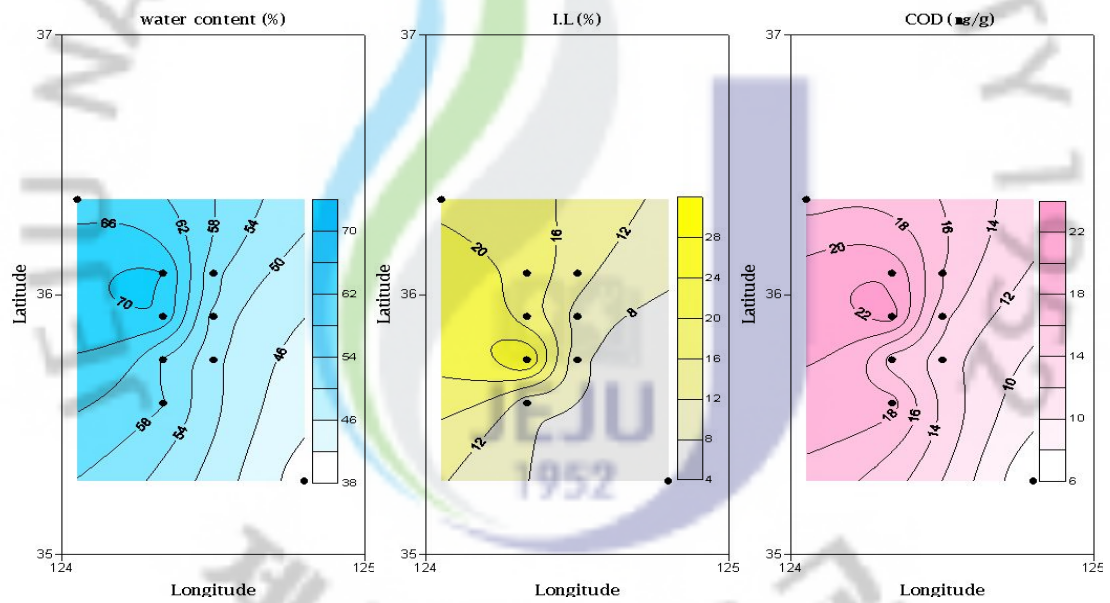


Fig. 20. The horizontal distribution of water content, ignition loss, CODs in the study area in July 2009.



### 3.2.2. 표층퇴적물 금속원소의 함량과 분포

퇴적물 내의 금속원소 함량은 일반적으로 퇴적물의 입도에 따라 크게 변화하는 것으로 알려졌으나(이 등, 1992), 이번 연구에서는 입도와 관련있는 함수율, 금속원소함량간의 관련성과 저질의 오염도를 알아보려고 한다.

Al은 지각물질 중에 가장 폭넓게 분포하는 원소들 중에 하나이며, 이동 중에 풍화나 또는 함량변화가 거의 없고 육지의 하천으로부터 이동시 90%이상의 입자태로 이루어지며, 액상의 이동은 매우 적은 전형적인 대륙기원 원소로 알려져 있다(이, 2003). 연구해역 내 주변해역에서 표층퇴적물 중의 Al의 함량(Fig. 21)은 5.8~6.1%(평균 5.9%)를 나타냈으며, 투기해역에서는 4.9~6.9%(평균 5.7%)의 분포로 해역 간에 차이는 없었다. Al의 공간분포는 정점 3, 4에서 4.9%로 최소값, 정점 6에서 6.9%로 최대값을 나타내고 연구해역 내 남서해역은 높고 북동해역은 낮은 분포를 보이고 있었다.

As의 주변해역에서 함량은 2.6~8.0mg/kg · dw(평균 5.3mg/kg · dw), 투기해역에서는 5.6~7.1mg/kg · dw(평균 6.3mg/kg · dw)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 2.6mg/kg · dw로 최소값, 정점 1에서는 8.0mg/kg · dw로 연구해역 내 북서쪽으로 가면서 함량이 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Cd의 주변해역에서 함량은 0.07~0.16mg/kg · dw(평균 0.12mg/kg · dw), 투기해역에서는 0.08~0.2mg/kg · dw(평균 0.16mg/kg · dw)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 0.07mg/kg · dw로 최소값, 정점 7에서 0.20mg/kg · dw로 최대값을 나타냈으며, 남쪽해역에서 북쪽해역으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Co의 주변해역에서 함량은 8.1~15.0mg/kg · dw(평균 11.6mg/kg · dw), 투기해역에서는 11.4~13.6mg/kg · dw(평균 12.9mg/kg · dw)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 8.1mg/kg · dw로 최소값, 정점 1에서 15.0mg/kg · dw로 최대값을 나타냈으며, 연구해역 내 정점 2에서 북서쪽해역으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Cr은 전이금속 원소로서, 하천을 통한 이동시 90%이상의 입자태로 이동되며 오염에 민감한 원소이다(윤 등, 2001). Cr의 주변해역에서 함량은 43.9~76.2mg/kg

· dw(평균 60.0mg/kg · dw), 투기해역에서는 57.3~84.8mg/kg · dw(평균 73.9mg/kg · dw)의 분포로 투기해역에서 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 43.9mg/kg · dw로 최소값, 정점 4에서 84.8mg/kg · dw로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 북서쪽으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Cu는 오염형 중금속 원소로서 강한 입도의존성을 갖는 원소이다(윤 등, 2001). Cu의 주변해역에서 함량은 11.5~26.9mg/kg · dw(평균 19.2mg/kg · dw), 투기해역에서는 18.4~29.5mg/kg · dw(평균 24.9mg/kg · dw)의 분포로 투기해역에서 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 11.5mg/kg · dw로 최소값, 정점 3에서 29.5mg/kg · dw로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 북서쪽으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Fe의 주변해역에서 농도는 2.2~3.6%(평균 2.9%), 투기해역에서는 2.8~3.5%(평균 3.2%)의 분포로 투기해역에서 약간 높은 농도를 보였다. 정점 2에서 2.2%로 최소값, 정점 1에서 3.6%로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 서쪽으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Hg의 주변해역에서 농도는 0.012~0.023mg/kg · dw(평균 0.018mg/kg · dw), 투기해역에서는 0.014~0.053mg/kg · dw(평균 0.029mg/kg · dw)의 분포로 투기해역에서 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 0.012mg/kg · dw로 최소값, 정점 5에서 0.053mg/kg · dw로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 서쪽으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Mn은 산화환원 환경에 민감한 원소로서 산소가 없는 환원환경의 퇴적물에서 공극수가 용해되어 상층부의 산화환원 경계면으로 이동하여 축적되어진다(Thomsom et al., 1996). Mn의 주변해역에서 함량은 291.5~355.1mg/kg · dw(평균 323.3mg/kg · dw), 투기해역에서는 273.5~353.5mg/kg · dw(평균 308.6mg/kg · dw)의 분포로 주변해역에서 높은 함량을 보였다. 정점 8에서 273.5mg/kg · dw로 최소값, 정점 1에서 355.1mg/kg · dw로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 서쪽으로 갈수록 높아지는 농도를 보이고 있었다. 정점 1에서 상대적으로 높은 Mn의 값은 이 지역 퇴적물 기동내에서의 환원작용에 의하여 활발하게 Mn이 표층으로 이동 축적되어진 결과로 여겨진다(김 등, 2001).

Ni의 주변해역에서 함량은 19.4~35.0mg/kg · dw(평균 27.2mg/kg · dw), 투기해



역에서는 27.3~34.3mg/kg·dw(평균 31.8mg/kg·dw)의 분포로 투기해역에서 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 19.4mg/kg·dw로 최소값, 정점 1에서 35.0mg/kg·dw로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 북서쪽으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Pb은 휘발성 첨가제로 쓰여 주변 하천과 대기를 통해 연안환경으로 유입되는 원소로 알려져 있다(윤 등, 2001). Pb의 주변해역에서 함량은 23.8~26.8mg/kg·dw(평균 25.3mg/kg·dw), 투기해역에서는 21.0~30.1mg/kg·dw(평균 24.8mg/kg·dw)의 분포로 주변해역에서 약간 높은 함량을 보였다. 정점 8에서 21.0mg/kg·dw로 최소값, 정점 9에서 30.1mg/kg·dw로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 서쪽으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

Zn의 주변해역에서 함량은 62.1~105.7mg/kg·dw(평균 83.9mg/kg·dw), 투기해역에서는 79.3~107.7mg/kg·dw(평균 94.5mg/kg·dw)의 분포로 투기해역에서 높은 함량을 보였다. 정점 2에서 62.1mg/kg·dw로 최소값, 정점 9에서 107.7mg/kg·dw로 최대값을 나타내고 있었다. 연구해역 내 서쪽으로 갈수록 높아지는 분포를 보이고 있었다.

퇴적물내의 함수율과 Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Zn은 강한 양의 상관관계를 보이고 있었고(Table 4), Fe은 As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn은 높은 양의 상관관계를 보이고 있었다. 일반적으로 퇴적물의 Cu, Pb, Zn의 농도는 유기탄소와 Fe-Mn의 산화물(혹은 수산화물) 농도에 의해 조절되며, Ni과 Cr은 Fe과 관련이 있다(Balkis and Cagatay, 2001; Youn et al., 1999). Fe의 함량은 퇴적물의 함수율과 산화물(혹은 수산화물)의 조절을 받는다고 추론할 수 있다(이 등, 1992).

주변해역과 투기해역의 중금속 함량은 Al, Mn, Pb을 제외하고는 모든 중금속 항목은 상대적으로 투기해역에서 높은 함량을 나타냈다. 그리고 Cr은 정점 3, 4(휴식연구역)에서 미 해양대기청(NOAA)에서 제시한 기준인 ERL(Effect Range-Low)을 초과하고 있었다(Fig. 22, Table 5). Cr은 도금 및 합금, 페인트 및 플라스틱 안료, 피혁공정에서 발생하는데, Cr이 비교적 많이 함유된 피혁공정에서 발생하는 부산물을 해양에 투기함으로써 비교적 높은 값은 나타내는 것으로 사료된다(신, 2008). 또한 Ni도 정점 2를 제외한 모든 정점에서 ERL(Effect Range-Low) 20.9mg/kg·dw를 초과하고 있었다. Ni은 산업화된 지역의 퇴적물에서 주 오

염물질로 강철이나 다른 합금, 전기도금, 전지에 사용되며, 일반적으로 화석연료에도 Ni이 풍부하게 함유되어 있으며, 기름과 석탄의 연소시에도 상당량의 Ni이 방출되어 대기로부터 퇴적되는 것 중 상당부분에 기여한다. 또한 도시 하수슬러지에도 상당량 Ni이 함유되어 있다. 연구해역에서 Ni의 함량은 다량의 하수슬러지가 투기됨으로써 비교적 높은 값을 보일 가능성이 있으나, 김 등(2001)과 Kim et al.(2009)의 연구에서 주상시료를 분석한 결과 Ni의 농축계수는 거의 일정함을 보였다고 보고하고 있어서 해양투기의 영향이라고 판단하기는 어렵다. Cr과 Ni을 제외한 중금속 농도는 미국 NOAA에서 제시하고 있는 퇴적물 권고기준 ERL (Effect Range-Low)이하의 농도를 보이고 있었다.

그리고 미국 환경보호청(EPA)에서 제시한 중금속 오염기준(Table 5)을 적용해 보면 이번 연구해역의 오염도는 항목별 편차를 보이고 있는데, CODs, Cu, Hg, Pb은 비오염(Nonpolluted), As, Cr, Mn, Ni, Zn은 중간오염(Moderately Polluted), Cu는 심한오염(Heavy Polluted)에 속한 값을 보이고 있었다.

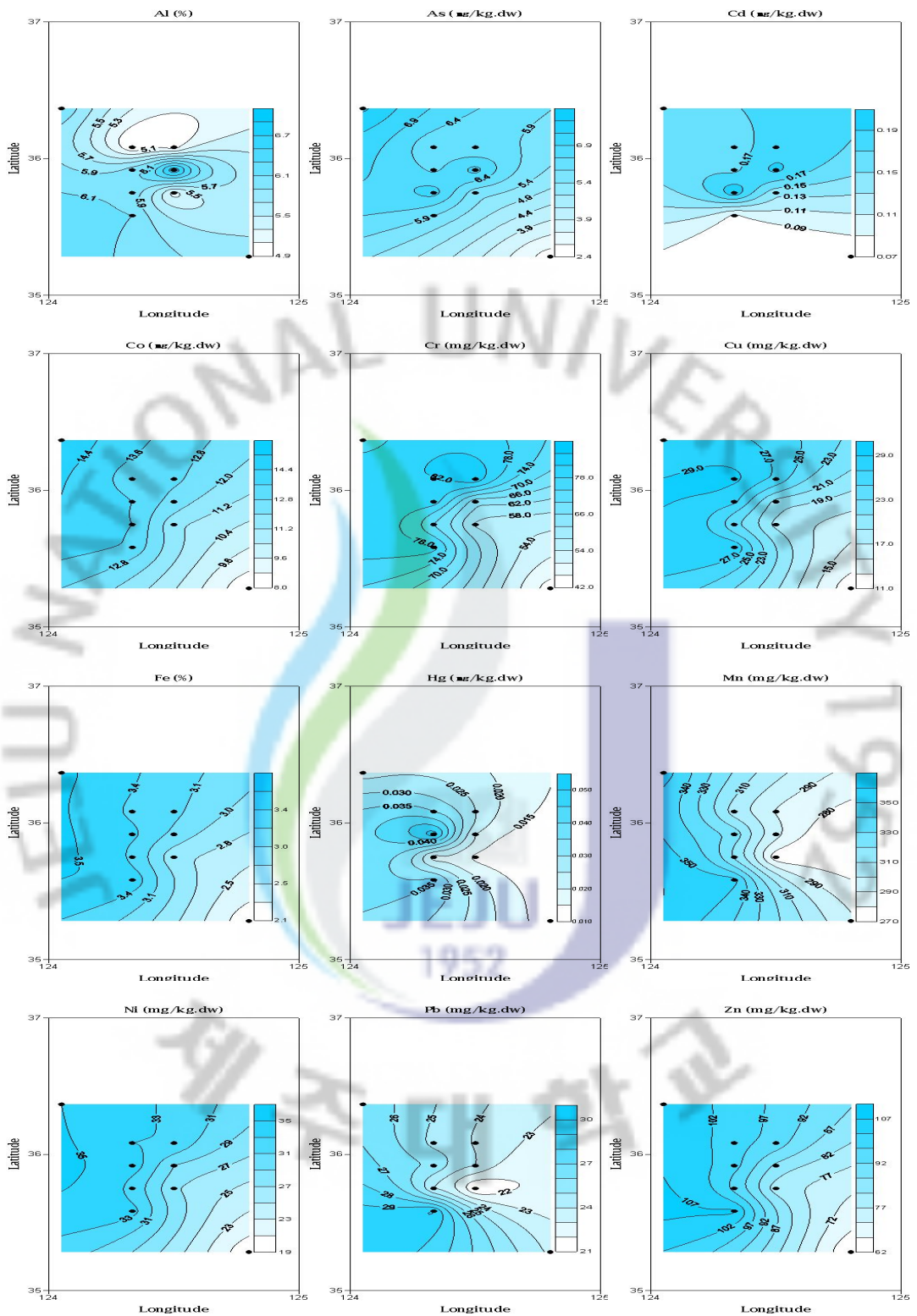


Fig. 21. The horizontal distribution of trace metals in the study area in July 2009.

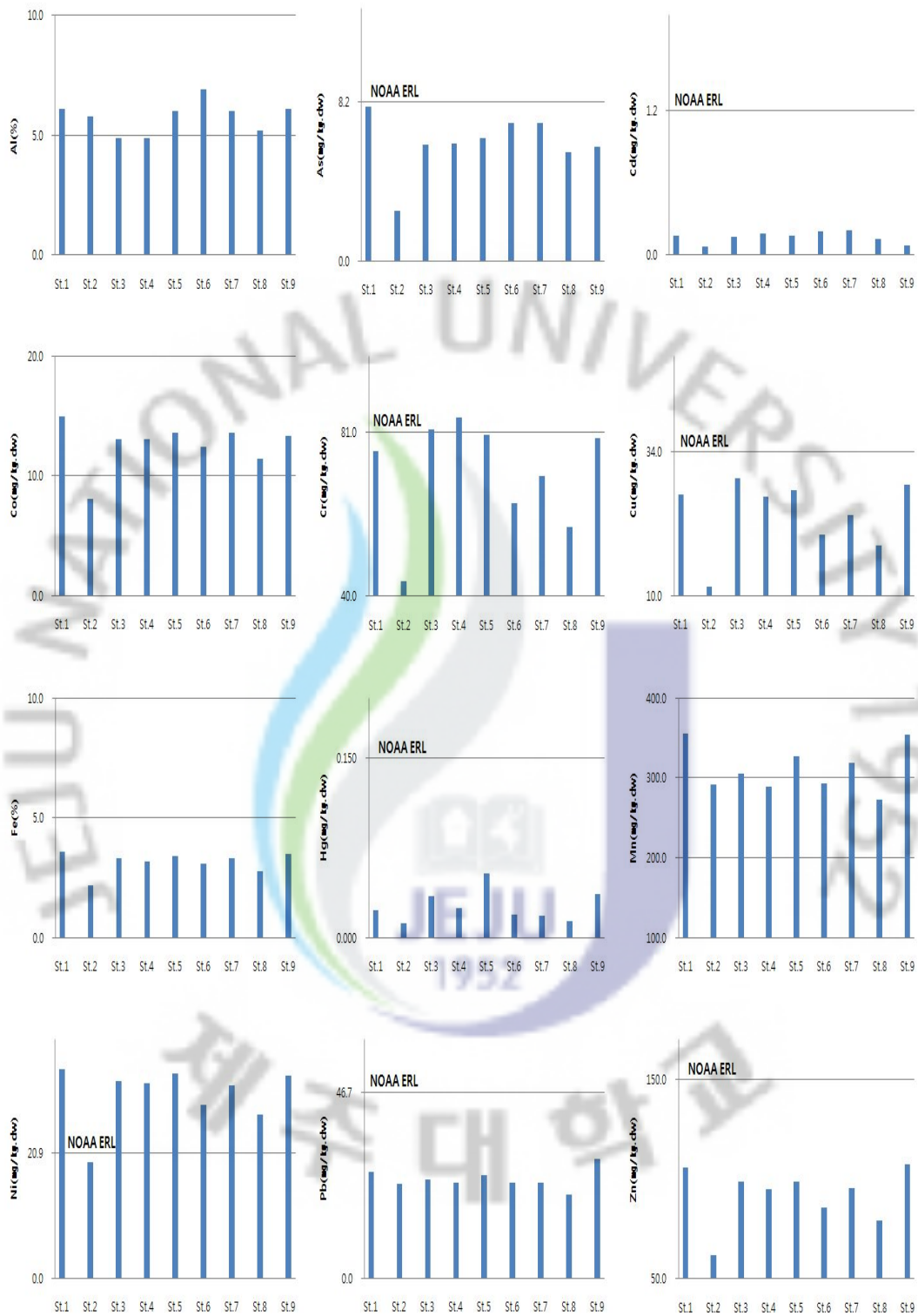


Fig. 22. The distribution chart of trace metals in the study area in July 2009.

Table 4. Correlation matrix of Sediment environmental variables in the study area in July 2009.

|      | WC       | IL      | CODs     | Al    | As       | Cd    | Co       | Cr       | Cu       | Fe       | Hg   | Mn       | Ni       | Pb      | Zn |
|------|----------|---------|----------|-------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|------|----------|----------|---------|----|
| WC   | 1        |         |          |       |          |       |          |          |          |          |      |          |          |         |    |
| IL   | .634     | 1       |          |       |          |       |          |          |          |          |      |          |          |         |    |
| CODs | .958(**) | .493    | 1        |       |          |       |          |          |          |          |      |          |          |         |    |
| Al   | -.105    | -.027   | -.065    | 1     |          |       |          |          |          |          |      |          |          |         |    |
| As   | .645     | .655    | .605     | .311  | 1        |       |          |          |          |          |      |          |          |         |    |
| Cd   | .619     | .712(*) | .531     | .095  | .680(*)  | 1     |          |          |          |          |      |          |          |         |    |
| Co   | .817(**) | .679(*) | .800(**) | .131  | .924(**) | .640  | 1        |          |          |          |      |          |          |         |    |
| Cr   | .831(**) | .501    | .884(**) | -.209 | .615     | .584  | .839(**) | 1        |          |          |      |          |          |         |    |
| Cu   | .896(**) | .531    | .929(**) | -.150 | .654     | .523  | .876(**) | .974(**) | 1        |          |      |          |          |         |    |
| Fe   | .848(**) | .621    | .859(**) | .153  | .849(**) | .577  | .980(**) | .880(**) | .927(**) | 1        |      |          |          |         |    |
| Hg   | .782(*)  | .223    | .874(**) | .007  | .241     | .320  | .500     | .708(*)  | .728(*)  | .621     | 1    |          |          |         |    |
| Mn   | .528     | .360    | .503     | .386  | .455     | .148  | .634     | .494     | .596     | .722(*)  | .485 | 1        |          |         |    |
| Ni   | .873(**) | .627    | .890(**) | .002  | .821(**) | .595  | .972(**) | .932(**) | .957(**) | .984(**) | .644 | .624     | 1        |         |    |
| Pb   | .401     | .054    | .479     | .351  | .227     | -.017 | .459     | .507     | .578     | .605     | .561 | .896(**) | .516     | 1       |    |
| Zn   | .832(**) | .562    | .856(**) | .055  | .762(*)  | .476  | .942(**) | .907(**) | .957(**) | .983(**) | .631 | .747(*)  | .974(**) | .675(*) | 1  |

\* P<0.05

\*\* P<0.01

Table 5. Guidelines for classifying sediments.

| Guidelines | NOAA<br>(mg/kg) |       | EPA<br>(mg/kg) |                        |                |
|------------|-----------------|-------|----------------|------------------------|----------------|
|            | ERL             | ERM   | Nonpolluted    | Moderately<br>Polluted | Heavy Polluted |
| COD        |                 |       | <40,000        | 40,000~80,000          | 80,000         |
| As         | 8.2             | 70    | <3             | 3~8                    | >8             |
| Cd         | 1.2             | 9.6   | -              | -                      | >6             |
| Cr         | 81              | 370   | <25            | 25~75                  | >75            |
| Cu         | 34              | 270   | <25            | 25~50                  | >50            |
| Fe         |                 |       | <17,000        | 17,000~25,000          | >25,000        |
| Hg         | 0.15            | 0.71  | <1.0           | -                      | >1.0           |
| Mn         |                 |       | <300           | 300~500                | >500           |
| Ni         | 20.9            | 51.6  | <20            | 20~50                  | >50            |
| Pb         | 46.7            | 218.0 | <40            | 40~60                  | >60            |
| Zn         | 150             | 410   | <90            | 90~200                 | >200           |

ERM(Effect Range-Median) : 저서생물 50%에 영향을 주는 독성농도

ERL(Effect Range-Low) : 저서생물 10%에 영향을 주는 독성농도



### 3.3. 주변해역과 투기해역 농도의 연변화

지난 1996년 이후 12년 동안 해양경찰청에서 조사한 계절별 일반 수질(pH, DO, COD, SS, Chlorophyll-a)의 저층(수심 약 50m)에서 평균값과 이번 조사평균값과 비교해보았다. COD는 주변해역과 투기해역에서 해양수질 환경기준 II등급 이내로 거의 일정한 농도를 보이고 있었다(Fig. 23, 24). 황해에서 해양투기가 시작되기 전인 1987년(박 등, 1998)에 투기해역 저층에서 총무기질소는 연평균 3.7 $\mu$ M, 인산염인은 1966~71년(국립수산과학원)에 평균 0.5 $\mu$ M이었다. 2005년 이후에는 총무기질소의 농도가 갑자기 높게 증가하고 있는데 이 때에 음식물폐기물량이 증가하고 있었으며, 2006년 이후부터 배출량이 줄어들면서 낮아지는 분포를 보이고 있었다. 이번 조사에서는 투기직전 총무기질소 농도의 약 3배, 인산염인은 약 2배 정도 높은 값을 보이고 있었으며, 영양염의 연간 농도변화를 살펴보면 하계와 동계에 증가하는 경향을 보였고, 매해 농도는 조금씩 증가하고 있었다. 또한 주변해역의 연간 농도변화는 투기해역의 농도변화와 유사한 유형을 보이고 있었다.

지난 연구해역의 표층퇴적물 자료와 농도를 비교해보면 주변해역에 비해 투기해역에서 Cr, Cu, Zn이 높은 함량을 나타내고 있었으며(Fig. 25), 주변해역과 투기해역에서 함량변화는 Cr을 제외하고는 유사하게 나타나고 있었다. 1991년에 비해 2005년에 Cr농도는 약 3배 높은 값을 보이고 있었으며, Cu와 Zn은 2배정도 높은 농도를 보였다. Cr은 2008년부터 감소하는데 ERL초과에 대한 규제강화로 인해 피혁가공 폐기물배출량 축소와 해양오염방지법의 개정으로 배출폐기물검사를 용출법에서 함유량법으로 성분검사를 통한 배출제한으로 인한 영향으로 보인다. Cu, Zn은 2008년에는 1991년에 비해 2.5배 높은 농도를 보이다가 이번 조사 해인 2009년부터 감소하는 경향을 보이고 있었다. Cu, Zn은 NOAA의 ERL기준을 초과하지는 않았지만 2003년부터 배출량이 급증한 가축분뇨와 같이 증가하고 있었다. 가축분뇨는 중금속 함량분포(최 등, 2008)가 Cu, Zn이 상대적으로 높은 농도를 나타내며, 이로 인한 축적된 영향으로 보이며, 이러한 축적은 2005년 이후부터 가축분뇨의 배출량 축소로 인해 2009년에 감소한 것으로 보인다.



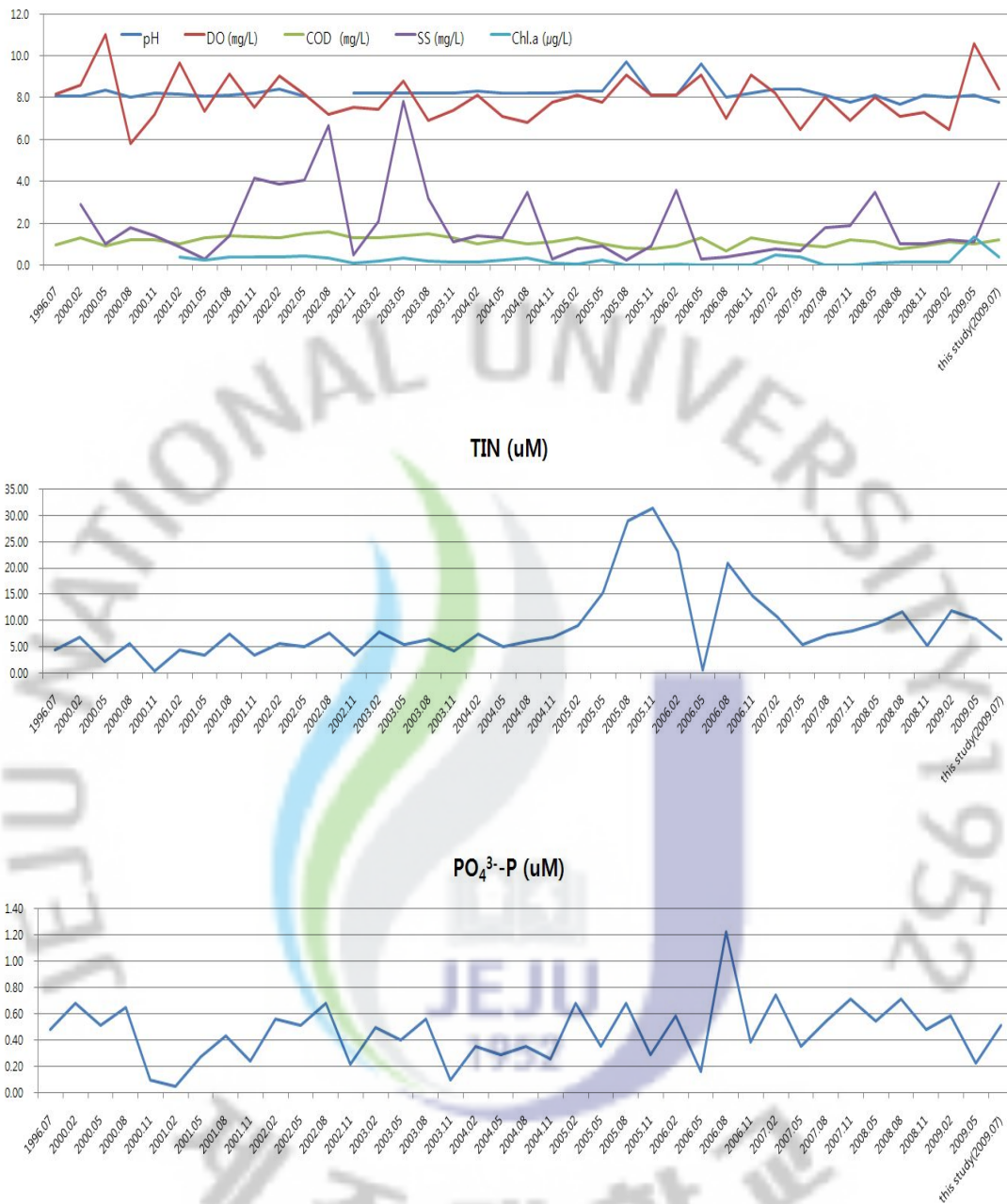


Fig. 23. Variation of seawater environmental variables and nutrients concentration in the bottom layer(below 50m in water depth) in the around area(reference: Park et al., 1996.07; Korea coast guard R&D center, 2000.02~2009.05; this study, 2009.07).

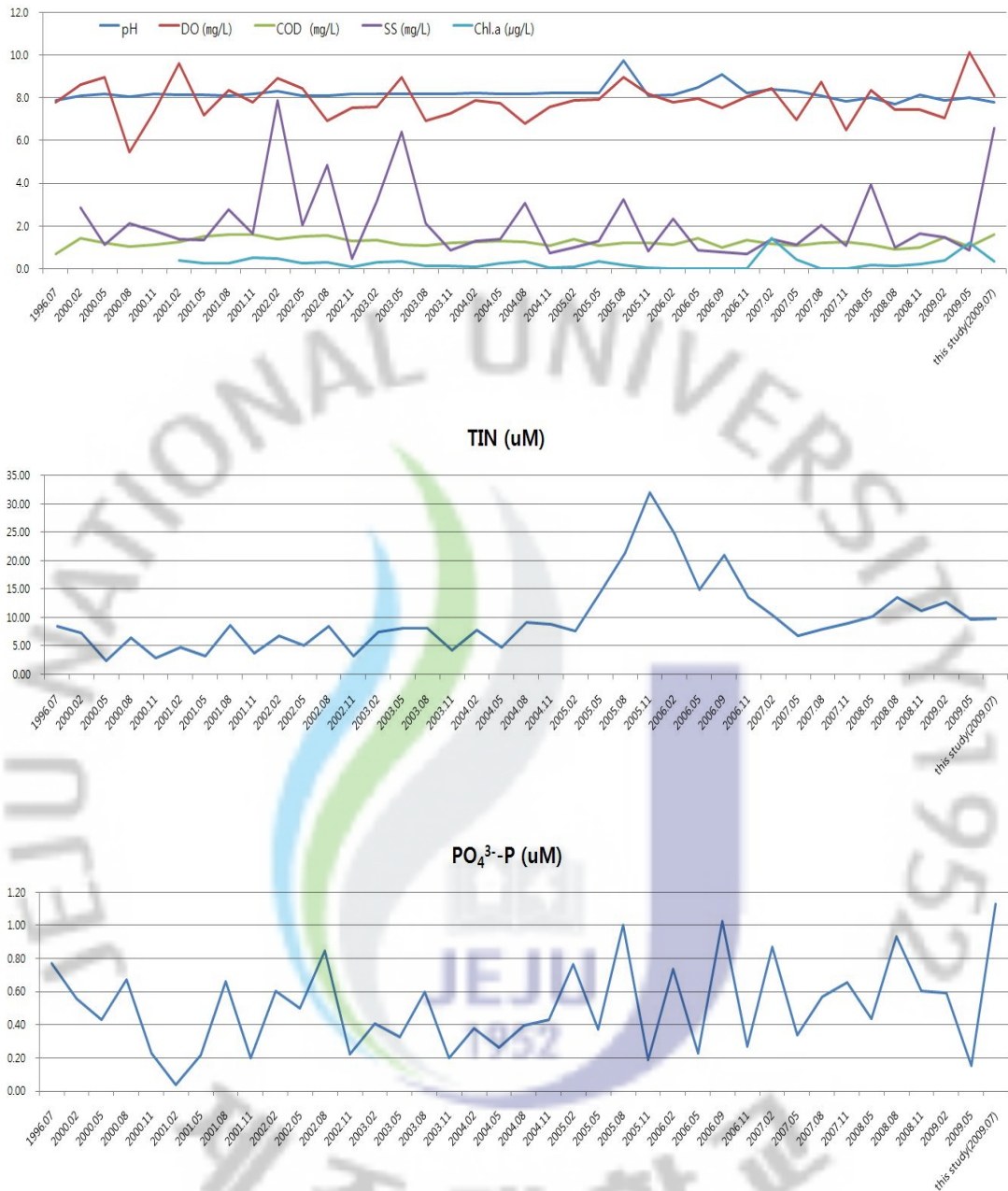


Fig. 24. Variation of seawater environmental variables and nutrients concentration in the bottom layer(below 50m in water depth) in the dumping area(reference: Park et al., 1996.07; Korea coast guard R&D center, 2000.02~2009.05; this study, 2009.07).

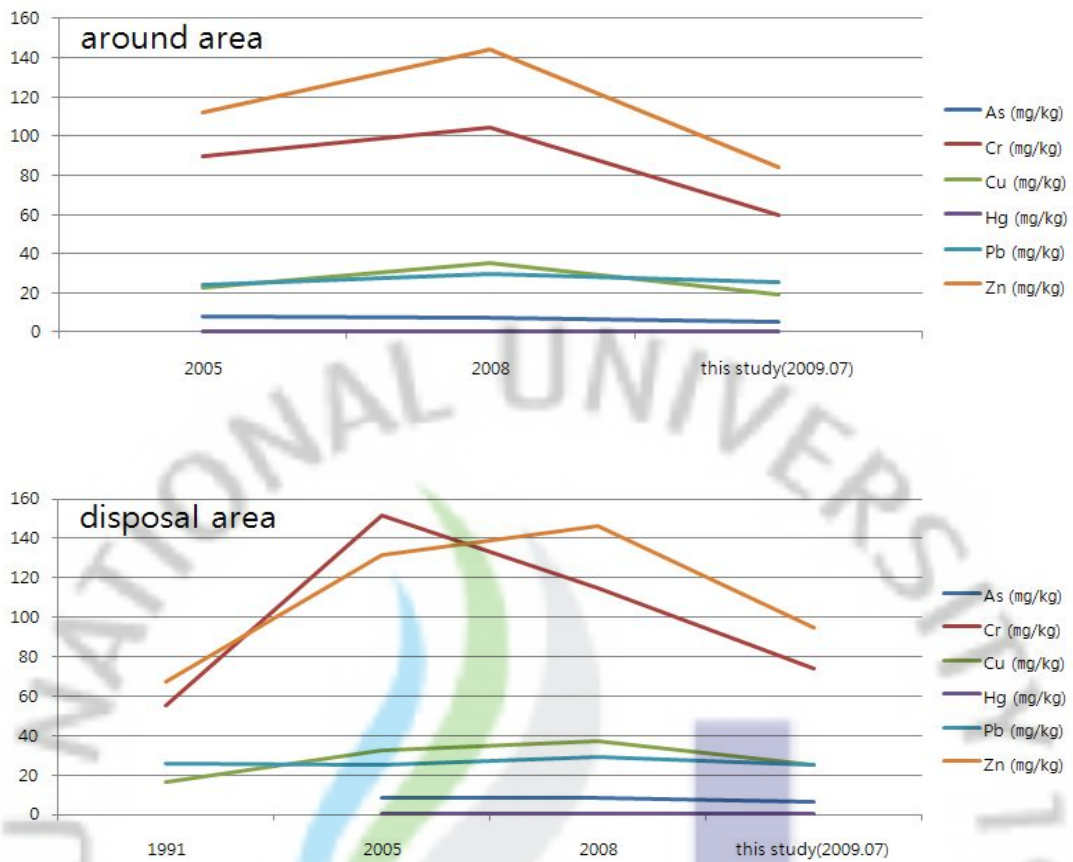


Fig. 25. Variation of sediments concentration in the study area(reference: Kim et al., 1991.11; Korea coast guard R&D center, 2005.08, 2008.08; this study, 2009.07).

## IV. 결론

본 연구는 1988년부터 시작된 황해 폐기물 해양투기(서해병)로 인한 해양환경 변화를 알아보고자 주변해역과 투기해역을 조사한 결과이다.

1. 연구해역에서 물리적 특성은 밀도성층 기작이 염분보다는 수온 변화에 크게 좌우되고 있었다. 모든 정점 수심 30m에서는 황해저층냉수가 분포하고 있었는데, 10℃이하의 냉수괴는 수년을 통해 잔존하고 최저수온이 3월에 나타난다고 보고하고 있지만 이번 연구에서는 7℃이하의 수온이 존재하고 있었다. 그리고 수심 약 20m에서는 염분이 0.5~1.5psu정도 갑자기 낮아지는 역전현상을 보였는데, 하계에 강수량 증가와 황하연안에서 남하하는 고온저염의 세력이 황해중앙해역에서 혼합에 의한 영향으로 보아진다.

2. 해수질 화학적 특성은 투기해역의 심층으로 갈수록 pH 감소, 부유물질 농도 증가, 높은 COD 농도, 용존산소 감소를 보였고, 영양염은 수온약층 이심에서 높은 농도를 보였다. 특히 저층에서 인의 과잉공급을 보였는데, 인의 함량이 높은 분뇨, 축산폐수 및 각종오니류가 2002년부터 급격한 배출증가와 질소의 빠른 소비, 질소에 비해 느린 인의 생지화학적 순환때문이라 사료된다. 또한 연구해역의 영양상태는 표층에서는 빈영양상태, 저층에서는 부영양상태로 추정할 수 있었으며, 투기로 인한 축적의 영향이 계속되고 있음을 나타내고 있었다.

3. 표층퇴적물 CODs는 정점 3, 5에서 일본 수산환경기준인 20mgO<sub>2</sub>/g-dry를 초과하였고, 중금속 Cr의 함량은 정점 3, 4(휴식년 구역)에서 Ni은 정점 2를 제외한 모든 정점에서 미해양대기청 퇴적물 권고기준인 ERL(Effect Range-Low)을 초과하고 있었다. Cr은 함량이 높은 피혁공정 발생물의 배출에 의한 원인으로 보이고, Ni은 주상시료 분석결과 농축계수가 투기직전과 거의 일정함을 보인 보고자료와 유사하여 해양투기의 영향이라 볼 수 없었다.

4. 퇴적물의 함수율과 Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Zn은 강한 양의 상관관계를 보이고 있는 것으로 보아 연구해역에서 중금속은 대부분 용존형태로 존재하고 있었다.

5. 저층에서 농도의 연변화는 기존 연구자료와 비교했을 때 하계와 동계에 높았으며, 투기해역에서 총무기질소는 1987년에 연평균  $3.7\mu\text{M}$ , 인산염인은 1966~71년에 평균  $0.5\mu\text{M}$ 로 이번 연구에서 총무기질소는  $9.8\mu\text{M}$ , 인산염인은  $1.1\mu\text{M}$ 까지 증가하여 해양투기 이후 약 2.6배, 2.2배정도 농축되어 있었다.

주변해역 정점의 자료가 다소 부족하였고 심각한 수준은 아니지만 투기해역 북서쪽에 위치한 주변해역 정점(St.1)으로 유기물 산화에 따른 변화 및 퇴적물의 중금속 함량이 투기해역과 유사하여 이 곳까지 영향을 미치고 있는 것으로 보아지며, 정점 4(휴식년 구역)와 달리 여전히 투기지역인 정점 3에서는 Cr이 ERL을 초과하여 휴식년 구역 지정에 대한 세밀한 조사가 필요할 것으로 보인다.



## 참고문헌

- 김도희, 2007. 수 저층의 저질조사(I): 저질조사의 중요성과 분석에 관하여. 해양환경안전학회, 13(1): p.93~102.
- 김부생, 2003. 해양투기 하수슬러지의 중금속 화학형태 연구에 의한 생태위해성 평가. 경남대학교대학원 석사학위논문, p.7.
- 김석현, 홍기훈, 정창수, 김영일, 전용현, 2001. 황해 폐기물 배출해역 퇴적물의 중금속 및 유기탄소 분포 특성, 1991. 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, p.57~66.
- 노일현, 윤양호, 김대일, 박종식, 2006. 가막만 표층퇴적물 중 유기물량의 시·공간적 분포 특성. 한국해양환경공학회지, 9(1): p.1~13.
- 노일현, 윤양호, 박종식, 서호영, 김대일, 2006. 남해 중부해역 표층퇴적물 유기물의 시·공간 분포특성. 한국해양환경공학회지, 9(4): p.203~215.
- 박용철, 이효진, 손주원, 손승규, 1998. 황해 해양투기해역에서의 해양화학환경. 한국해양학회지 바다, 3(4): p.203~213.
- 신성규, 2008. 황해 폐기물배출해역의 오염인자 평가에 의한 환경변화 연구. 인하대학교 공학대학원 석사학위논문.
- 오현주, 강영실, 박정훈, 1999. 동중국해 북부해역 클로로필-a의 분포특성과 해양환경 특성. J. Korean Fish. Soc., 32(1): p.88~97.
- 윤정수, 고윤영, 이호준, 2001. 황해 중앙부해역 표층퇴적물내 금속원소의 분포특성. 제주대 해양과환경연구논문집, 25: p.1~10.
- 이광우, 양한섭, 1998. 화학해양학. 청문각. p.95~190.
- 이두호, 전병열, 이창복, 김범수, 1999. 발전소 주변 표층퇴적물 내 중금속원소 분산 특성. 한국해양학회지 바다, 4(1): p.25~32.
- 이석우, 1992. 한국근해 해상지. 집문당, p.337.
- 이승철, 2003. 동중국해 외대륙붕 표층퇴적물 내 금속원소 분포특성. 제주대학교 대학원 석사학위논문. p.12~19.
- 이완섭, 조현진, 박관석, 신성규, 김인구, 박선희, 장선희, 손재경, 서영상, 2006. 2005년 한국 폐기물배출해역 오염도 조사에 관한 연구. 한국해양과학기술협

- 의회 공동학술대회 논문집, p.2436.
- 이종환, 2008. SPSS를 이용한 조사방법 및 통계분석의 이해와 적용. 공동체, p.251~258.
- 이창복, 정희수, 정갑식, 1992. 황해 남동해역 표층퇴적물 중 수중 금속원소의 분포 특성에 관한 연구. 한국해양학회지, 27(1): p.55~65.
- 장선희, 박관석, 박선희, 신성규, 염규설, 이상은, 2007. 해양폐기물의 분석방법에 따른 오염 저감효과 예측. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, p.2625~2635
- 차현주, 김준영, 고철환, 이창복, 1998. 황해 중동부 해역 표층수에서 영양염 원소의 시공간적 분포. 한국해양학회지, 3(1): p.25~33.
- 최기영, 김석현. 2008. 축산폐수 중금속 함량 분포. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, p.2998~3001.
- 허진영, 2000. 곰소만 해수내의 중금속 분포. 군산대학교 대학원 석사학위논문, p.1.
- 홍기훈, 정창수, 조기용, 김영일, 신종현, 노정래, 이희승, 김경태, 문덕수, 서승모, 이현미, 최준선, 이해순, 안동선, 박준건, 정혜란, 양성렬, 김종기, 김석현, 양동범, 최진우, 유준, 진용현, 오선미, 홍혜윤, 임혜진, 이강만, 전재수, 김철호, 이재학, 정경태, 이홍재, 조철호, 안유환, 이하웅, 장영석, 강석구, 이석, 송용식, 박창, 2001. 황해 종합 조사연구;황해 오염특성 조사연구. 한국해양연구원, p.9.
- 해양수산부, 2005. 해양환경공정시험방법.
- 해양투기종합관리시스템 홈페이지, <http://www.oceandumping.re.kr>, 해양배출현황.
- APHA, AWWA, APCE, 1989. Standard method for examination of water and wastewater, 16th ed., p.417~463.
- Balkis, N. and Cagatay, M.N., 2001. Factors controlling metal distribution in the surface sediments of the Erdek Bay, Sea of Marmara, Turkey. Environment international, 27, p.1~13.
- Goyet C., A.L. Bradshaw and P.G. Brewer, 1991. Carbonate system in the



- Black-Sea. *Deep-Sea Res.*, 38: S1049~S1068.
- Kim P.K., Park M.E., Sung K.Y., 2009. Distribution of heavy metals in marine sediments at the ocean waste disposal site in the Yellow Sea, South Korea. *Geosciences journal*, 13(1): p.15~24.
- Maita Y. and K. Toya, 1986. Characteristics on the distribution and composition of nutrient in subarctic regions. *J. Oceano. Soci. Japan*, 50(2): p.105~113.
- Martin, J. M. and Meybeck, M. 1979. Elemental mass balance of material carried by major world rivers. *Mar. Chem.*, 7. p.173~206.
- Millero, F.J. and M.L. Sohn, 1992. *Chemical Oceanography*. CRC Press, London, p.531.
- Park, P.K., 1968. The processes contributing to the vertical distribution of apparent pH in the northeastern Pacific Ocean. *J. Oceano. Soc. Korea*, 3: p.1~7.
- Redfield, A.C., 1958, The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46: 205~222.
- Salomons, W. and Förstner, U. 1984. *Metals in the hydrocycle*. Springer Verlag, Berlin, p.349.
- Solorzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenol hypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.*, 14: p.779~801.
- Son, S.K., K.H. Chung, J.S. Jo and Y.C. Park, 1989. Seasonal variation of nutrients, total dissolved amino acids and bacterial biomass in the Yellow Sea. *Yellow Sea Res.*, 2: 1-12.
- Spencer, c.p., 1975, The micronutrient elements, In *chemical Oceanography*. Vol. 2, edited by Ritey. J.P. and G. Skirrow London Academic Press. p.245~300.
- Thomson, J., N.C. Higgs, S. Colley, 1996. Diagenetic redistributions of redox-sensitive elements in northeast Atlantic glacial/interglacial transition sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.139,

p.365~377.

Wasmund, N., A. Andrushaitis, E. Lysiak-Pasruszak, B. Muller-Karulis, G. Nausch, T. Neumann, H. Ojaveer, I. Olenina, L. Postel and Z. Witek, 2001, Trophic status of the south-Eastern Baltic Sea : A comparison of Coastal and open areas. Est. Coast. Shelf Sci., 53: p.849~864.



## 감사의 글

너무 많이 부족했던 저에게 항상 교수님께서 보여주신 관심과 배려에 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문 심사를 위해 애써 주신 방익찬 교수님과 윤석훈 교수님, 그리고 제 논문에 대해 충고와 조언을 아끼지 않으신 윤정수 교수님, 그리고 항상 인자하신 고유봉 교수님, 이준백 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

학부시절부터 항상 옆에서 지켜보며 많은 관심과 도움을 주는 화학연구실을 비롯 많은 연구실 선배님들과 특히 오랫동안 저를 아껴주는 수강이형에게 감사의 마음을 전합니다.

연구실을 생활을 같이 하며 많은 힘이 되어주지 못했지만, 많은 도움과 추억을 준 원호, 준호, 병훈이, 은아, 선영이, 홍석이, 근수, 재익이, 동윤이, 친구에게도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 식사과정을 함께 하며 아낌없이 힘이 되준 승우, 승현이, 한식이, 물리연구실 준호와 성준이 그리고 임용호 조교선생님에게도 고마운 마음을 전합니다.

항상 많은 힘과 도움을 주는 후배 진석이, 정란이, 명섭이, 지욱에게도 고마움을 전합니다. 또한 웃음과 힘을 주는 친구 진수, 정현, 상욱, 지훈, 의철, 경용, 민철, 홍석, 재신, 기원, 용석, 봉관, 원혁, 종석, 정요에게 고마움을 전합니다.

언제나 막내동생을 아껴주는 큰형, 큰형수님, 작은형, 작은형수님, 누나, 매형에게도 감사의 말씀을 전하고 앞으로 좋은 일이 더 많이 생기길 바랍니다. 그리고 항상 아들처럼 아껴주는 장모님, 장인어른께 감사의 마음을 전하고, 헌신적인 사랑으로 보살펴주신 할머니와 어머니께 감사의 마음을 담아 비록 부족하지만 작은 결실을 바칩니다.

끝으로 사랑하는 나의 아내 지연에게 고마움과 사랑의 마음을 전합니다.

Appendix 1. Analytical results of seawater from study area.

| Station | Depth | Temp. | Salinity | pH   | DO saturation | DO   | COD  | SS   | VSS  | Chl.a |
|---------|-------|-------|----------|------|---------------|------|------|------|------|-------|
|         | m     | °C    | psu      |      | %             |      | mg/l |      |      | µg/l  |
| 1       | S     | 24.1  | 31.42    | 7.98 | 105.3         | 7.4  | 0.24 | 4.6  | 4.2  | 0.58  |
|         | 10    | 23.9  | 31.46    | 8.05 | 114.3         | 8.0  | 0.43 | 3.6  | 3.0  | 0.54  |
|         | 30    | 9.3   | 32.54    | 7.81 | 94.6          | 8.8  | 0.24 | 3.0  | 2.2  | 0.90  |
|         | 50    | 7.2   | 32.60    | 7.74 | 80.5          | 7.9  | 1.82 | 3.4  | 2.4  | 0.42  |
|         | B     | 7.0   | 32.66    | 7.74 | 81.6          | 8.0  | 1.59 | 3.8  | 2.8  | 0.48  |
| 2       | S     | 23.1  | 31.90    | 7.85 | 115.1         | 8.2  | 0.79 | 2.6  | 0.6  | 0.42  |
|         | 10    | 23.0  | 32.05    | 8.03 | 135.0         | 9.6  | 1.22 | 2.6  | 1.2  | 0.54  |
|         | 30    | 10.9  | 32.95    | 7.78 | 97.8          | 8.8  | 1.14 | 3.6  | 2.8  | 0.87  |
|         | 50    | 9.3   | 32.91    | 7.84 | 95.4          | 8.9  | 0.59 | 4.4  | 3.0  | 0.36  |
|         | B     | 7.9   | 32.84    | 7.81 | 93.2          | 8.9  | 0.71 | 5.2  | 4.4  | 0.36  |
| 3       | S     | 24.0  | 31.69    | 8.17 | 121.3         | 8.5  | 0.55 | 7.2  | 4.0  | 0.53  |
|         | 10    | 24.0  | 31.65    | 8.16 | 129.9         | 9.1  | 0.79 | 8.6  | 6.4  | 0.53  |
|         | 30    | 9.4   | 32.53    | 7.97 | 102.1         | 9.6  | 0.39 | 8.8  | 6.4  | 0.85  |
|         | 50    | 7.8   | 32.63    | 7.87 | 88.5          | 8.5  | 2.66 | 10.2 | 6.6  | 0.30  |
|         | B     | 7.2   | 32.67    | 7.85 | 87.7          | 8.6  | 2.06 | 19.4 | 6.6  | 0.60  |
| 4       | S     | 23.7  | 31.77    | 8.14 | 121.2         | 8.5  | 1.23 | 3.8  | 2.6  | 0.45  |
|         | 10    | 23.7  | 31.77    | 8.16 | 131.0         | 9.2  | 0.39 | 3.6  | 2.2  | 0.45  |
|         | 30    | 9.4   | 32.42    | 7.99 | 104.0         | 9.8  | 0.80 | 4.4  | 3.4  | 1.31  |
|         | 50    | 6.7   | 32.72    | 7.75 | 90.6          | 9.0  | 1.59 | 3.6  | 3.4  | 0.39  |
|         | B     | 6.7   | 32.72    | 7.84 | 91.2          | 9.0  | 2.81 | 12.6 | 4.0  | 0.63  |
| 5       | S     | 23.9  | 31.92    | 8.23 | 105.0         | 7.3  | 0.67 | 3.6  | 2.8  | 0.46  |
|         | 10    | 23.9  | 31.91    | 8.21 | 111.5         | 7.8  | 0.99 | 3.4  | 1.5  | 0.68  |
|         | 30    | 9.3   | 32.55    | 8.00 | 83.9          | 7.8  | 1.77 | 3.4  | 2.0  | 0.96  |
|         | 50    | 6.8   | 32.71    | 7.83 | 74.3          | 7.3  | 2.97 | 3.4  | 2.6  | 0.36  |
|         | B     | 6.8   | 32.71    | 7.80 | 74.3          | 7.3  | 0.28 | 13.4 | 5.0  | 0.59  |
| 6       | S     | 23.5  | 31.81    | 8.20 | 101.7         | 7.2  | 0.52 | 2.9  | 1.7  | 0.30  |
|         | 10    | 23.5  | 31.81    | 8.21 | 107.6         | 7.6  | 0.39 | 5.4  | 3.0  | 0.39  |
|         | 30    | 8.6   | 32.53    | 7.99 | 81.5          | 7.7  | 1.50 | 6.2  | 4.5  | 1.27  |
|         | 50    | 6.9   | 32.80    | 7.83 | 76.4          | 7.5  | 0.95 | 10.8 | 5.8  | 0.33  |
|         | B     | 6.9   | 32.80    | 7.86 | 76.8          | 7.5  | 0.40 | 18.2 | 6.8  | 0.55  |
| 7       | S     | 24.0  | 32.08    | 8.23 | 113.7         | 7.9  | 0.87 | 4.0  | 3.2  | 0.51  |
|         | 10    | 23.8  | 32.07    | 8.23 | 121.2         | 8.5  | 0.16 | 4.2  | 2.4  | 0.70  |
|         | 30    | 9.3   | 32.43    | 7.98 | 81.1          | 7.6  | 0.36 | 3.2  | 1.2  | 0.77  |
|         | 50    | 7.1   | 32.67    | 7.81 | 76.4          | 7.5  | 0.12 | 5.2  | 4.0  | 0.41  |
|         | B     | 6.8   | 32.72    | 7.81 | 76.7          | 7.6  | 3.41 | 14.4 | 5.8  | 0.69  |
| 8       | S     | 24.1  | 31.92    | 8.20 | 106.6         | 7.4  | 0.67 | 3.0  | 1.8  | 0.45  |
|         | 10    | 23.9  | 31.95    | 8.21 | 121.3         | 8.5  | 0.79 | 6.2  | 3.4  | 0.71  |
|         | 30    | 8.5   | 32.46    | 8.05 | 78.4          | 7.5  | 1.47 | 5.4  | 3.7  | 1.39  |
|         | 50    | 6.8   | 32.77    | 7.79 | 75.2          | 7.4  | 1.38 | 6.4  | 3.3  | 0.30  |
|         | B     | 6.8   | 32.78    | 7.81 | 75.4          | 7.4  | 0.99 | 14.6 | 5.2  | 0.55  |
| 9       | S     | 23.4  | 31.94    | 8.16 | 129.2         | 9.1  | 1.63 | 4.8  | 3.8  | 0.31  |
|         | 10    | 23.1  | 32.13    | 8.16 | 136.1         | 9.7  | 1.39 | 5.0  | 4.0  | 0.42  |
|         | 30    | 10.1  | 32.40    | 8.05 | 117.3         | 10.7 | 0.71 | 3.8  | 2.2  | 1.16  |
|         | 50    | 7.6   | 32.59    | 7.86 | 97.7          | 9.5  | 0.99 | 8.8  | 7.4  | 0.29  |
|         | B     | 6.8   | 32.72    | 7.76 | 96.1          | 9.5  | 1.97 | 18.2 | 6.9  | 0.32  |
| 10      | S     | 23.1  | 31.90    | 8.15 | 115.4         | 8.2  | 1.85 | 3.4  | 1.6  | 0.48  |
|         | 10    | 22.9  | 32.19    | 8.16 | 113.6         | 8.1  | 1.54 | 5.8  | 4.2  | 0.74  |
|         | 30    | 9.2   | 32.19    | 8.03 | 105.8         | 9.9  | 1.55 | 4.0  | 2.4  | 0.94  |
|         | 50    | 7.0   | 32.78    | 7.76 | 83.5          | 8.2  | 2.13 | 4.2  | 3.2  | 0.27  |
|         | B     | 7.0   | 32.79    | 7.76 | 84.4          | 8.3  | 1.62 | 19.2 | 11.6 | 0.30  |
| Min.    |       | 6.7   | 31.42    | 7.74 | 74.3          | 7.2  | 0.12 | 2.6  | 0.6  | 0.27  |
| Max.    |       | 24.1  | 32.95    | 8.23 | 136.1         | 10.7 | 3.41 | 19.4 | 11.6 | 1.39  |
| Avg.    |       | 14.2  | 32.34    | 7.97 | 99.6          | 8.4  | 1.16 | 6.7  | 3.8  | 0.58  |

continued

| Station | Depth | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | TIN   | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | SiO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | N/P ratio | Si/P ratio |
|---------|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|------------|
|         | m     | μM                           |                              |                              |       |                               |                               |           |            |
| 1       | S     | 0.57                         | 1.26                         | 0.16                         | 1.99  | 0.04                          | 2.53                          | 49.7      | 63.3       |
|         | 10    | 3.55                         | 0.18                         | 0.16                         | 3.89  | 0.15                          | 3.28                          | 26.0      | 21.9       |
|         | 30    | 3.83                         | 1.74                         | 0.04                         | 5.61  | 0.15                          | 8.45                          | 37.4      | 56.3       |
|         | 50    | 1.27                         | 5.19                         | 0.15                         | 6.61  | 0.24                          | 7.43                          | 27.5      | 31.0       |
|         | B     | 1.42                         | 6.90                         | 0.11                         | 8.43  | 0.16                          | 9.62                          | 52.7      | 60.1       |
| 2       | S     | 0.15                         | 1.23                         | 0.04                         | 1.42  | 0.16                          | 8.12                          | 8.9       | 50.8       |
|         | 10    | 0.58                         | 2.81                         | 0.05                         | 3.44  | 0.06                          | 8.92                          | 57.3      | 148.7      |
|         | 30    | 0.26                         | 5.09                         | 0.09                         | 5.44  | 0.46                          | 12.55                         | 11.8      | 27.3       |
|         | 50    | 0.47                         | 5.49                         | 0.07                         | 6.03  | 0.78                          | 14.81                         | 7.7       | 19.0       |
|         | B     | 0.40                         | 7.39                         | 0.10                         | 7.89  | 0.87                          | 16.59                         | 9.1       | 19.1       |
| 3       | S     | 0.16                         | 0.15                         | 0.04                         | 0.35  | 0.07                          | 3.70                          | 5.0       | 52.9       |
|         | 10    | 0.33                         | 0.14                         | 0.08                         | 0.55  | 0.03                          | 2.49                          | 18.4      | 83.0       |
|         | 30    | 1.01                         | 0.66                         | 0.04                         | 1.71  | 0.06                          | 4.34                          | 28.5      | 72.3       |
|         | 50    | 0.94                         | 10.14                        | 0.08                         | 11.16 | 0.73                          | 12.90                         | 15.3      | 17.7       |
|         | B     | 1.01                         | 8.72                         | 0.14                         | 9.87  | 1.10                          | 13.96                         | 9.0       | 12.7       |
| 4       | S     | 0.40                         | 0.12                         | 0.05                         | 0.58  | 0.09                          | 2.42                          | 6.4       | 26.9       |
|         | 10    | 0.69                         | 0.33                         | 0.05                         | 1.07  | 0.05                          | 1.24                          | 21.4      | 24.8       |
|         | 30    | 0.22                         | 0.98                         | 0.09                         | 1.29  | 0.12                          | 2.26                          | 10.8      | 18.8       |
|         | 50    | 2.06                         | 5.94                         | 0.07                         | 8.07  | 0.99                          | 8.49                          | 8.2       | 8.6        |
|         | B     | 2.60                         | 7.90                         | 0.15                         | 10.65 | 0.99                          | 7.36                          | 10.8      | 7.4        |
| 5       | S     | 0.66                         | 1.53                         | 0.04                         | 2.23  | 0.01                          | 2.54                          | 223.0     | 254.0      |
|         | 10    | 1.42                         | 0.48                         | 0.09                         | 1.99  | 0.10                          | 1.77                          | 19.9      | 17.7       |
|         | 30    | 1.21                         | 0.37                         | 0.07                         | 1.65  | 0.14                          | 4.11                          | 11.8      | 29.4       |
|         | 50    | 0.54                         | 2.53                         | 0.12                         | 3.18  | 1.04                          | 9.84                          | 3.1       | 9.5        |
|         | B     | 0.80                         | 2.73                         | 0.08                         | 3.60  | 1.35                          | 8.24                          | 2.7       | 6.1        |
| 6       | S     | 1.05                         | 0.19                         | 0.04                         | 1.29  | 0.02                          | 2.16                          | 64.4      | 108.0      |
|         | 10    | 1.97                         | 0.75                         | 0.14                         | 2.85  | 0.03                          | 2.50                          | 95.0      | 83.3       |
|         | 30    | 0.86                         | 1.75                         | 0.08                         | 2.69  | 0.17                          | 4.83                          | 15.8      | 28.4       |
|         | 50    | 0.56                         | 2.12                         | 0.14                         | 2.81  | 0.82                          | 6.23                          | 3.4       | 7.6        |
|         | B     | 1.10                         | 14.80                        | 0.07                         | 15.97 | 0.93                          | 15.50                         | 17.2      | 16.7       |
| 7       | S     | 1.10                         | 1.01                         | 0.07                         | 2.17  | 0.04                          | 3.71                          | 54.4      | 92.8       |
|         | 10    | 1.13                         | 1.27                         | 0.07                         | 2.46  | 0.07                          | 1.88                          | 35.2      | 26.9       |
|         | 30    | 1.00                         | 1.15                         | 0.15                         | 2.30  | 0.23                          | 5.52                          | 10.0      | 24.0       |
|         | 50    | 1.69                         | 9.14                         | 0.07                         | 10.90 | 1.09                          | 9.98                          | 10.0      | 9.2        |
|         | B     | 1.28                         | 7.19                         | 0.16                         | 8.63  | 1.99                          | 10.33                         | 4.3       | 5.2        |
| 8       | S     | 2.11                         | 0.34                         | 0.04                         | 2.48  | 0.04                          | 2.25                          | 62.0      | 56.3       |
|         | 10    | 1.53                         | 0.26                         | 0.04                         | 1.83  | 0.13                          | 2.72                          | 14.1      | 20.9       |
|         | 30    | 1.57                         | 3.65                         | 0.05                         | 5.27  | 0.18                          | 2.17                          | 29.3      | 12.1       |
|         | 50    | 0.79                         | 8.13                         | 0.08                         | 8.99  | 1.64                          | 10.51                         | 5.5       | 6.4        |
|         | B     | 0.73                         | 17.05                        | 0.18                         | 17.96 | 1.39                          | 8.67                          | 12.9      | 6.2        |
| 9       | S     | 0.57                         | 0.47                         | 0.04                         | 1.08  | 0.04                          | 5.03                          | 26.9      | 125.8      |
|         | 10    | 0.73                         | 1.40                         | 0.06                         | 2.20  | 0.14                          | 4.44                          | 15.7      | 31.7       |
|         | 30    | 2.17                         | 1.07                         | 0.11                         | 3.35  | 0.30                          | 2.81                          | 11.2      | 9.4        |
|         | 50    | 2.19                         | 10.69                        | 0.08                         | 12.96 | 0.89                          | 14.48                         | 14.6      | 16.3       |
|         | B     | 0.50                         | 17.34                        | 0.16                         | 18.00 | 1.56                          | 14.46                         | 11.5      | 9.3        |
| 10      | S     | 0.31                         | 2.54                         | 0.06                         | 2.90  | 0.03                          | 3.99                          | 96.6      | 133.0      |
|         | 10    | 1.10                         | 1.91                         | 0.04                         | 3.05  | 0.08                          | 4.17                          | 38.1      | 52.1       |
|         | 30    | 0.29                         | 3.49                         | 0.04                         | 3.82  | 0.14                          | 2.60                          | 27.3      | 18.6       |
|         | 50    | 1.22                         | 18.78                        | 0.06                         | 20.06 | 1.86                          | 14.26                         | 10.8      | 7.7        |
|         | B     | 0.30                         | 9.15                         | 0.16                         | 9.60  | 2.16                          | 11.49                         | 4.4       | 5.3        |
| Min.    |       | 0.15                         | 0.12                         | 0.04                         | 0.35  | 0.01                          | 1.24                          | 2.7       | 5.2        |
| Max.    |       | 3.83                         | 18.78                        | 0.18                         | 20.06 | 2.16                          | 16.59                         | 223.0     | 254.0      |
| Avg.    |       | 1.09                         | 4.31                         | 0.09                         | 5.49  | 0.52                          | 6.89                          | 27.5      | 41.0       |

continued

| Station | Depth | Al    | As    | Cd    | Cr    | Cu    | Pb    | Zn    |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 1       | S     | 0.302 | 0.083 | 0.002 | 0.036 | 0.013 | ND    | 0.008 |
|         | 10    | 0.360 | 0.155 | ND    | 0.002 | ND    | 0.101 | 0.002 |
|         | 30    | 0.383 | 0.082 | 0.001 | ND    | ND    | 0.059 | 0.005 |
|         | 50    | 0.378 | 0.149 | 0.002 | 0.012 | 0.005 | ND    | 0.010 |
|         | B     | 0.383 | 0.087 | 0.002 | 0.010 | ND    | ND    | 0.002 |
| 2       | S     | 0.386 | ND    | 0.002 | 0.013 | ND    | ND    | ND    |
|         | 10    | 0.341 | ND    | 0.001 | 0.013 | 0.002 | ND    | 0.003 |
|         | 30    | 0.361 | 0.209 | ND    | 0.008 | 0.004 | ND    | ND    |
|         | 50    | 0.374 | ND    | 0.002 | 0.019 | 0.008 | ND    | ND    |
|         | B     | 0.368 | 0.061 | 0.001 | 0.009 | 0.002 | 0.097 | 0.003 |
| 3       | S     | 0.424 | ND    | 0.001 | 0.006 | 0.015 | ND    | 0.022 |
|         | 10    | 0.331 | ND    | 0.001 | 0.004 | 0.013 | 0.123 | 0.038 |
|         | 30    | 0.377 | 0.267 | 0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.038 | 0.007 |
|         | 50    | 0.319 | ND    | 0.002 | 0.012 | 0.001 | ND    | ND    |
|         | B     | 0.359 | 0.157 | 0.002 | 0.010 | 0.004 | ND    | 0.003 |
| 4       | S     | 0.405 | 0.072 | 0.002 | 0.006 | 0.003 | ND    | 0.005 |
|         | 10    | 0.247 | ND    | ND    | 0.011 | 0.004 | ND    | ND    |
|         | 30    | 0.385 | ND    | 0.001 | 0.005 | 0.002 | ND    | 0.002 |
|         | 50    | 0.400 | 0.131 | 0.002 | 0.018 | ND    | ND    | 0.004 |
|         | B     | 0.365 | 0.081 | 0.002 | 0.015 | 0.006 | ND    | 0.018 |
| 5       | S     | 0.402 | ND    | 0.002 | 0.014 | 0.009 | ND    | 0.017 |
|         | 10    | 0.340 | 0.136 | 0.001 | ND    | 0.007 | 0.019 | 0.006 |
|         | 30    | 0.362 | ND    | 0.001 | 0.006 | 0.008 | 0.094 | 0.008 |
|         | 50    | 0.326 | ND    | 0.001 | 0.013 | 0.002 | ND    | 0.004 |
|         | B     | 0.380 | ND    | 0.002 | 0.012 | 0.016 | ND    | 0.037 |
| 6       | S     | 0.435 | 0.172 | 0.009 | 0.014 | 0.035 | ND    | 0.218 |
|         | 10    | 0.428 | 0.046 | 0.001 | 0.014 | ND    | ND    | ND    |
|         | 30    | 0.388 | 0.234 | 0.002 | 0.016 | 0.015 | ND    | 0.048 |
|         | 50    | 0.381 | 0.135 | 0.001 | 0.017 | 0.006 | ND    | 0.005 |
|         | B     | 0.417 | 0.221 | ND    | 0.013 | 0.002 | ND    | 0.003 |
| 7       | S     | 0.401 | ND    | 0.002 | 0.017 | 0.006 | ND    | 0.017 |
|         | 10    | 0.374 | ND    | ND    | 0.012 | 0.013 | 0.061 | 0.002 |
|         | 30    | 0.395 | ND    | 0.001 | 0.012 | 0.011 | 0.131 | 0.073 |
|         | 50    | 0.380 | ND    | ND    | 0.015 | ND    | ND    | ND    |
|         | B     | 0.413 | ND    | 0.002 | 0.018 | ND    | ND    | ND    |
| 8       | S     | 0.329 | 0.104 | 0.000 | 0.012 | 0.004 | ND    | 0.006 |
|         | 10    | 0.370 | ND    | ND    | 0.017 | 0.003 | ND    | ND    |
|         | 30    | 0.395 | ND    | ND    | 0.015 | 0.001 | ND    | ND    |
|         | 50    | 0.406 | 0.128 | 0.001 | 0.016 | 0.007 | ND    | ND    |
|         | B     | 0.430 | ND    | ND    | 0.022 | 0.004 | ND    | 0.014 |
| 9       | S     | 0.422 | ND    | ND    | 0.008 | 0.005 | 0.007 | 0.022 |
|         | 10    | 0.371 | 0.231 | 0.001 | 0.010 | 0.003 | 0.123 | 0.015 |
|         | 30    | 0.376 | ND    | ND    | 0.015 | 0.003 | 0.083 | 0.016 |
|         | 50    | 0.354 | 0.153 | ND    | 0.026 | 0.002 | ND    | 0.001 |
|         | B     | 0.423 | 0.109 | 0.000 | 0.013 | 0.001 | ND    | ND    |
| 10      | S     | 0.423 | ND    | ND    | 0.011 | ND    | ND    | 0.005 |
|         | 10    | 0.353 | ND    | ND    | 0.021 | ND    | ND    | 0.003 |
|         | 30    | 0.373 | ND    | ND    | 0.013 | ND    | ND    | 0.001 |
|         | 50    | 0.403 | ND    | 0.001 | 0.017 | 0.009 | ND    | 0.031 |
|         | B     | 0.405 | 0.134 | 0.002 | 0.015 | ND    | ND    | 0.007 |
| Min.    |       | 0.247 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Max.    |       | 0.435 | 0.267 | 0.009 | 0.036 | 0.035 | 0.131 | 0.218 |
| Avg.    |       | 0.378 | 0.139 | 0.002 | 0.013 | 0.007 | 0.078 | 0.018 |



Appendix 2. Analytical results of sediments from study area.

| Station | WC   | IL    | COD   | As  | Cd   | Co   | Cr   | Cu       | Hg    | Mn    | Ni   | Pb   | Zn    | Al  | Fe  |
|---------|------|-------|-------|-----|------|------|------|----------|-------|-------|------|------|-------|-----|-----|
|         | %    |       | mg/g  |     |      |      |      | mg/kg.dw |       |       |      |      |       | %   |     |
| 1       | 64.0 | 19.39 | 17.13 | 8.0 | 0.16 | 15.0 | 76.2 | 26.9     | 0.023 | 355.1 | 35.0 | 26.8 | 105.7 | 6.1 | 3.6 |
| 2       | 39.9 | 4.86  | 6.17  | 2.6 | 0.07 | 8.1  | 43.9 | 11.5     | 0.012 | 291.5 | 19.4 | 23.8 | 62.1  | 5.8 | 2.2 |
| 3       | 70.0 | 18.94 | 21.47 | 6.0 | 0.15 | 13.1 | 81.7 | 29.5     | 0.035 | 305.2 | 33.0 | 24.7 | 99.1  | 4.9 | 3.3 |
| 4       | 55.2 | 13.48 | 16.02 | 6.0 | 0.18 | 13.0 | 84.8 | 26.5     | 0.025 | 289.3 | 32.7 | 23.9 | 94.8  | 4.9 | 3.2 |
| 5       | 69.3 | 17.71 | 22.88 | 6.3 | 0.16 | 13.6 | 80.3 | 27.5     | 0.053 | 326.8 | 34.3 | 25.9 | 99.0  | 6.0 | 3.4 |
| 6       | 52.7 | 10.53 | 14.56 | 7.1 | 0.19 | 12.5 | 63.4 | 20.2     | 0.020 | 293.5 | 29.0 | 24.0 | 85.9  | 6.9 | 3.1 |
| 7       | 57.7 | 28.80 | 15.12 | 7.1 | 0.20 | 13.6 | 70.0 | 23.5     | 0.018 | 318.3 | 32.2 | 24.0 | 95.6  | 6.0 | 3.3 |
| 8       | 51.1 | 9.19  | 12.84 | 5.6 | 0.13 | 11.4 | 57.3 | 18.4     | 0.014 | 273.5 | 27.3 | 21.0 | 79.3  | 5.2 | 2.8 |
| 9       | 58.3 | 9.35  | 18.80 | 5.9 | 0.08 | 13.4 | 79.5 | 28.6     | 0.036 | 353.5 | 33.8 | 30.1 | 107.7 | 6.1 | 3.5 |
| Min.    | 39.9 | 4.86  | 6.17  | 2.6 | 0.07 | 8.1  | 43.9 | 11.5     | 0.012 | 273.5 | 19.4 | 21.0 | 62.1  | 4.9 | 2.2 |
| Max.    | 70.0 | 28.80 | 22.88 | 8.0 | 0.20 | 15.0 | 84.8 | 29.5     | 0.053 | 355.1 | 35.0 | 30.1 | 107.7 | 6.9 | 3.6 |
| Avg.    | 57.6 | 14.70 | 16.11 | 6.1 | 0.15 | 12.6 | 70.8 | 23.6     | 0.026 | 311.8 | 30.7 | 24.9 | 92.1  | 5.8 | 3.2 |