

하계 새만금 갯벌의 수질 분포 및 지화학적 특성에 관한 연구

Geochemistry and Water Quality in the Tidal Flat of Saemangum Area, West Sea of Korea in Summer

박경수* / 박승윤** / 이삼근*** / 이윤****

Gyung Soo Park / Soung Yun Park / Sam Geun Lee / Yoon Lee

:: Abstract ::

Environmental quality(water and sediment) was analyzed in the tidal flat of Saemangum of Jeonbuk Province, the west coast of Korea, using the 101 sediment samples and 69 water samples collected in September 4~13, 2001. Major water quality parameters with the means of 69 surface water samples are as follows; 25.51 ± 0.68 °C for water temperature, 29.88 ± 5.01 for salinity, 1.40 ± 0.78 mg/L for COD, 0.352 ± 0.417 mg/L for DIN, and 0.027 ± 0.023 mg/L for phosphate, respectively. Higher values were found at the subestuary of Dongjin and Mangyung River, and lower values at the Saemangum embayment and Gomso Bay. There was a significant negative correlation between salinity and the other water quality parameters($p < 0.0001$) such as COD, nutrients, SS and N/P. This correlation suggested that the major pollution sources be from terrestrial inputs through tributaries in this area. Principal component analysis clearly revealed a spatial variation of water quality; stations with higher values of nutrients and COD located subestuary of tributaries. 14 sediment quality parameters including 8 trace metals were measured using the 101 surface sediment samples. Average values for the parameters are as follows; Al $2.28 \pm 0.92\%$, Cd 0.61 ± 0.27 ppm, Cu 8.95 ± 4.06 ppm, Fe $1.19 \pm 0.37\%$, Mn 182.31 ± 77.45 ppm, Ni 10.83 ± 4.97 ppm, Pb 15.20 ± 4.35 ppm, Zn 41.34 ± 34.62 ppm, COD 2.68 ± 1.85 mg/g dry, AVS 0.04 ± 0.08 mg/g dry, IL $1.29 \pm 1.08\%$, water content $24.11 \pm 4.49\%$, TN $0.02 \pm 0.02\%$, TC $0.22 \pm 0.30\%$. Spatial variations of sediment quality were not clear as water quality. Some higher values were found at the subestuary of Gum River and lower values at the other area. There was a significant positive correlation between the heavy metal concentrations and organic materials within the sediment($p < 0.05$). Enrichment factors showed the ranges of 1~2 for most of the metals in the sediment except zinc(1~6), indicating no serious exogenous input of heavy metals in the study area. Also, the heavy metal concentrations in the sediment were within the ranges found at the natural marine environments.

Keywords : water quality, geochemistry, sediment quality, heavy metals, Saemangum, west coast, Korea

* 국립수산과학원 서해수산연구소, Email : gspark@nfrda.re.kr

** 국립수산과학원 동해수산연구소, Email : sypark@nfrda.re.kr

*** 국립수산과학원 서해수산연구소, Email : sglee@nfrdi.re.kr

**** 국립수산과학원 서해수산연구소, Email : yoonlee@momaf.go.kr

:: 요 지 ::

전북 군산 및 부안 지역을 중심으로 이루어지는 새만금간척공사 수역과 그 주변 해역의 수질 및 저질 분포 특성을 구명하기 위하여 2001년 9월에 총 101개 퇴적물 시료와 69개의 해수 시료를 채취, 분석하였다. 주요 수질 항목별 평균 및 표준편차는 수온 $25.51 \pm 0.68^\circ\text{C}$, 염분 $29.88 \pm 5.01\text{psu}$, COD $1.40 \pm 0.78\text{ mg/L}$, 용존무기질소 (DIN) $0.352 \pm 0.417\text{ mg/L}$, 그리고 인산인 $0.027 \pm 0.023\text{ mg/L}$ 이었다. 영양염류 및 COD는 동진강 및 만경강 하구에서 매우 높은 농도를 보였으며, 곰소만과 새만금 입구 수역은 매우 낮은 값을 보였다. COD, 영양염류 농도 및 N/P 등은 염분과 유의적 역상관관계를 보였으며, 이는 대부분의 오염 물질이 육상 기원임을 시사하였다. 주성분 분석에 의한 수질 분포 역시 새만금 수역으로 유입되는 지류에서 높은 영양염류 및 유기물 농도를 보여 타 수역에 비하여 수질 오염도가 높았다. 퇴적물의 경우 주요 중금속류 및 일반저질항목별 농도는 알루미늄 $2.28 \pm 0.92\%$, 카드뮴 $0.61 \pm 0.27\text{ ppm}$, 구리 $8.95 \pm 4.06\text{ ppm}$, 철 $1.19 \pm 0.37\%$, 망간 $182.31 \pm 77.45\text{ ppm}$, 니켈 $10.83 \pm 4.97\text{ ppm}$, 납 $15.20 \pm 4.35\text{ ppm}$, 아연 $41.34 \pm 34.62\text{ ppm}$, COD $2.68 \pm 1.85\text{ mg/g dry}$, AVS $0.04 \pm 0.08\text{ mg/g dry}$, 강열감량 $1.29 \pm 1.08\%$, 함수율 $24.11 \pm 4.49\%$, 총질소 $0.02 \pm 0.02\%$ 그리고 총탄소 $0.22 \pm 0.30\%$ 이었다. 저질의 공간 분포 특성은 수질처럼 명확하지는 않았으나, 금강하구 수역에서 전반적으로 높은 농도를 보였다. 저질 항목별 상관관계는 중금속과 유기물함량 간에 유의적 관계가 있었으며 ($p < 0.05$), 퇴적물내의 농축비 (enrichment factor)가 대부분 수역에서 1-2의 범위를 보여 중금속의 외부 유입이 심각하지 않은 것으로 밝혀졌다. 또한 퇴적물 내의 중금속 농도 역시 일반적인 해양 퇴적물에서 검출되는 범위 이내로 새만금 및 주변 수역의 저질 상태는 매우 양호한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수질, 지화학특성, 저질, 중금속, 새만금, 서해연안

1. 서론

서해 연안 수역은 조석 간만의 차에 의한 광범위한 조간대의 발달로 다양한 생물이 서식하는 생물 자원의 보고이다. 그러나 70년대 후반부터 급속한 산업화로 인하여 많은 환경 변화를 겪어왔으며, 육상 및 연안역으로부터 오염물 유입과 해양 투기 및 매립 등으로 인하여 서해 연안의 환경 변화는 심화되고 있는 실정이다. 특히 전북 연안은 금강, 동진강 및 만경강 하구역, 곰소만과 변산반도 국립공원을 포함하는 귀중한 해양 자원을 보유하고 있으나, 새만금 간척 사업으로 인하여 많은 면적의 갯벌 및 하구역이 상실될 위기에 처해 있다. 더욱이 동진강 및 만경강 하구역은 한강 하구역을 제외하고는 서해 연안에서 유일하게 남은 자연 하구이나 이마저도 상실될 위기에 처해있다. 상기 수역은 비옥한 곡창지대로서 일제시대부터 많은 간척 사업이 이루어졌으며, 본 새만금 사업은 동진강과 만경강 하구를 잇는

방조제를 축조하는 대규모 공사로 방조제 길이만 33km에 이르며, 완공 후(1991년~2011년)에는 내부면적 401km^2 , 갯벌 상실 면적은 208km^2 에 달한다(해양수산부, 2001).

따라서 본 연구에서는 현재 사업이 진행중인 새만금 주변 해역의 수질 및 저질 상태를 파악하되로서 해양환경 전반에 관한 사전 자료를 축적하고 또한 현재 새만금 주변 해역과 타 해역 간의 비교 분석을 통하여 수질 및 저질 분포 특성을 구명하는데 주목적이 있다.

2. 재료 및 방법

새만금 연안 갯벌환경조사를 위하여 금강 하구에서 곰소만에 이르는 새만금 연안 수역의 총 101개 정점에서 표층퇴적물을 채취하였으며, 이중 69개 정점에서 표층 해수 1L를 채수하였다. 수질은 YSI(556MPS)를 이용하여 현장에서 수온, 염분, 용존산소, 용존산소포화

도를 측정하였으며, 화학적산소요구량, 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소, 인산인은 실험실에서 분석하였다(해양수산부, 1998; Parson 등, 1984). 용존무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN)는 암모니아질소, 아질산질소 및 질산질소의 합으로 산출하였고, NP비는 용존무기질소와 인산인의 몰농도 비로서 산출하였다(Fig. 1).

조사 정점은 육상 오염원을 고려하여 주요 강 및 하구와 만을 포함하며, 기타 수역은 오염원과의 거리 및 정점간의 간격을 고려하여 조사 위치를 선정하였다. 시료 채취 시기는 2001년 9월 4일부터 13일까지 이루어졌으며, 주간 시간대에 소형 선박을 이용하여 채취하였으며, 각 정점의 위치는 휴대용 GPS(AccuNav Sport, Eagle)를 이용하여 위도와 경도를 표시하였다.

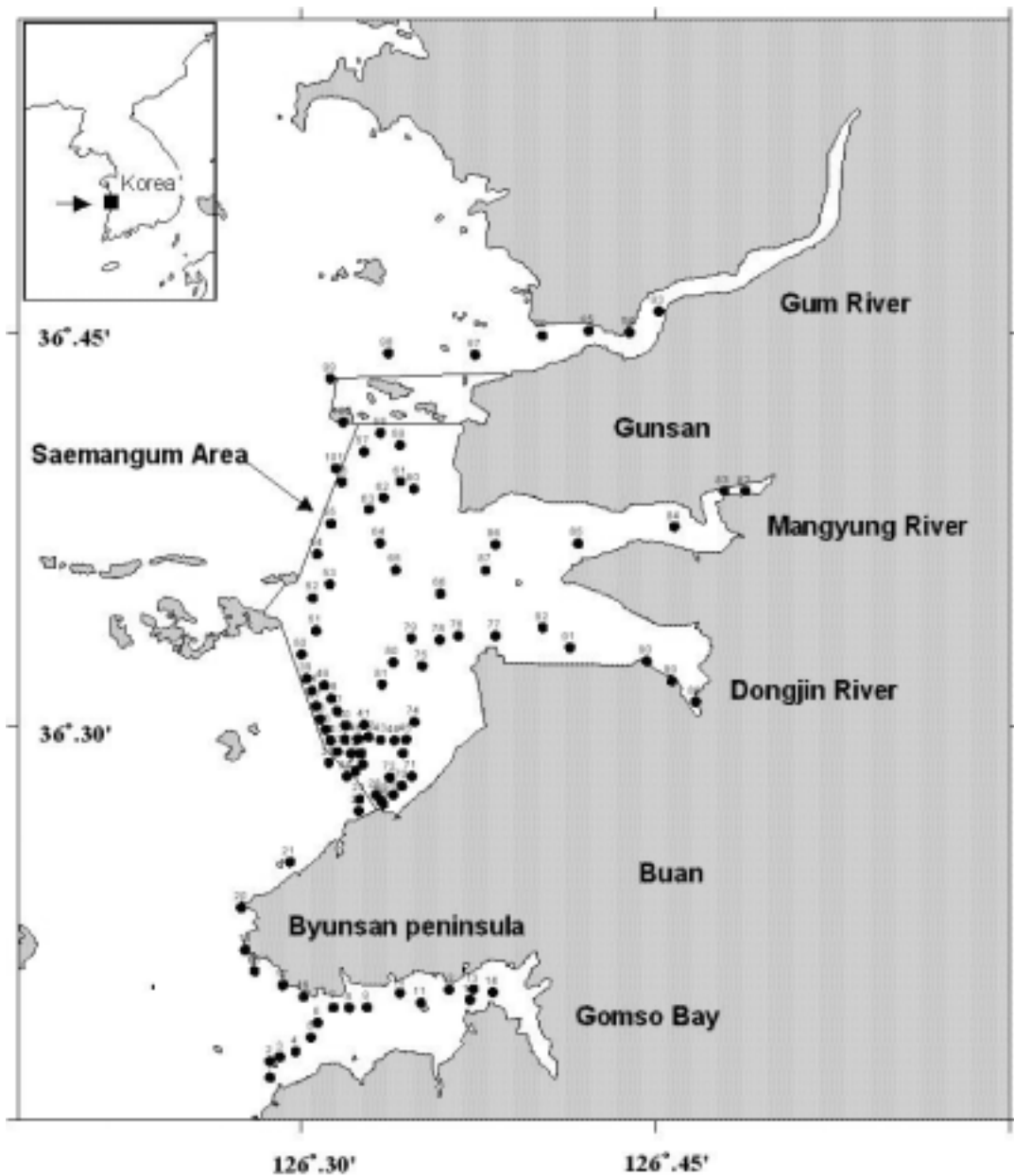


Fig. 1. Station locations for the water and sediment sampling in the Saemangum Area, West Sea of Korea

퇴적물시료채취는 grab sampler(LA-FONT)를 이용하였으며, 가능한 표층 2cm 이내의 퇴적물을 채취하여 분석하였다. 분석항목은 화학학적산소요구량(COD), 산취발성황화물(AVS, acid volatile sulfide), 강열감량(IL, ignition loss), 중금속류(Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn), 총탄소(TC, total carbon) 및 총질소(TN, total nitrogen)이다(해양수산부, 1998). 중금속 분석은 원자흡광광도계(Varian Spectra AA 880 및 55)와 ICP/OES(Perkin Elmer SC3000 axial)을 이용하여 측정하였다. 퇴적물 내의 중금속 회수율을 측정하기 위하여 NRC(Canada)에서 생산된 중금속표준물질인 MESS-3와 PACS-2를 이용하였다. 총탄소 및 총질소의 정량은 중금속 측정을 위하여 분쇄된 시료를 일정량 취하여 원소분석기(CHN analyzer, Perkin-Elmer 2400)를 이용하여 분석하였다.

새만금 수역의 수질 및 저질 분포 특성과 분포에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하기 위하여 Pearson 상관분석과 주성분분석(PCA)을 실시하였으며, 통계프로그램은 SAS(SAS, 1983)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 새만금 수역 조간대의 수질

곰소만에서 금강하구에 이르는 전북 연안 해수의 수질 분석을 위하여 총 69개 정점에서 채수된 해수를 분석한 결과(Fig. 2), 수온은 전 조사 정점을 평균하여 25.51 ± 0.68℃로 나타났으며, 최소 24.30℃에서 최고 27.00℃로 나타났다. 특히 수온의 경우 다른 수질 요소와는 달리 전 조사 정점에 걸쳐 큰 차이를 보이지 않았으며, 변동계수(coefficient of variance, CV)가 2.6%로 매우 낮은 값을 보였다. 수온의 지리적 변동은 크지 않았으나 일반적으로 담수의 유입이 많은 강의 하구 및 본류에서 높은 수온을 보였으며, 해수가 지배적인 새만금 외부 및 곰소만 수역에서는 수온이 상대적으로 낮았다.

반면 염분은 최저 0.5psu에서 최고 32.0psu로 정점간에 큰 차이를 보였으며, 최소값을 보인 정점은 만경강 상류에 위치한 정점이었다(Fig. 2의 염분분포 참고).

염분의 전체 평균은 29.88 ± 5.01psu, 변동계수는 16.8%로 금강, 만경강 및 동진강의 본류 및 하구역에서 낮은 값을 보였으며, 새만금 내·외부, 곰소만 및 변산반도 주변 수역은 31.0psu 이상의 염분을 보였다.

용존산소의 전체 평균은 6.92 ± 1.15mg/L, 용존산소 포화도는 평균 101.54 ± 17.09%로 매우 양호한 상태를 보였다. 용존산소 및 포화도의 범위는 각각 5.26~10.85mg/L, 76.50~158.60%로 정점 간에 큰 차이를 보였다. 특히 담수의 영향을 많이 받는 정점에서 용존산소 및 포화도가 매우 낮게 나타났으며, 해수가 지배적인 새만금 내부 및 외부 수역에서는 100% 이상의 양호한 상태를 보였다. 담수의 영향 정도에 따른 용존산소의 감소는 담수 내에 포함된 다량의 유기물(이후 화학적산소요구량 참조)에 의한 영향으로 사료된다. 또한 정점별 분산을 나타내는 용존산소 및 포화도의 변동계수는 각각 16.6% 및 16.8%로 나타났다.

화학적산소요구량은 전체 평균 1.40 ± 0.78mg/L로 나타났으며, 농도 범위는 0.68~4.71mg/L로 평균적으로 해역수질 II 등급에 해당하였다. 특히 만경강 및 동진강 하구역에서 2.0mg/L를 초과하여 타 정점에 비하여 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 정점간의 변동계수 역시 56.0%로 지리적 변화가 매우 컸다. 해수의 영향이 많고 또한 담수 유입이 적은 곰소만 및 새만금 해역과 변산반도 주변 해역은 1mg/L 이하로 해역수질 I 등급에 해당하였다.

부유물질은 전체 평균이 53.93 ± 37.88mg/L로 나타났으며, 변동계수는 70.3%로 공간적 변화가 매우 컸다. 특히 조류가 강하고 수심이 낮은 수역에서 저층 퇴적물의 일시적 재부유에 의하여 높은 농도를 보였으며, 수심이 깊고 해수의 영향을 주로 받는 수역에서는 낮은 농도를 보였다. 따라서 부유물질량의 농도 범위는 19.80~295.20mg/L로 정점에 따라 매우 큰 차이를 보였다. 가장 높은 부유물질 농도를 보인 수역은 만경강 본류 및 하구역으로 평균 126.4mg/L 였으며, 새만금 외부 및 변산반도 주변 수역은 30.0mg/L 이하의 농도를 보였다.

해수중의 용존무기영양염류는 기초생산자의 광합성

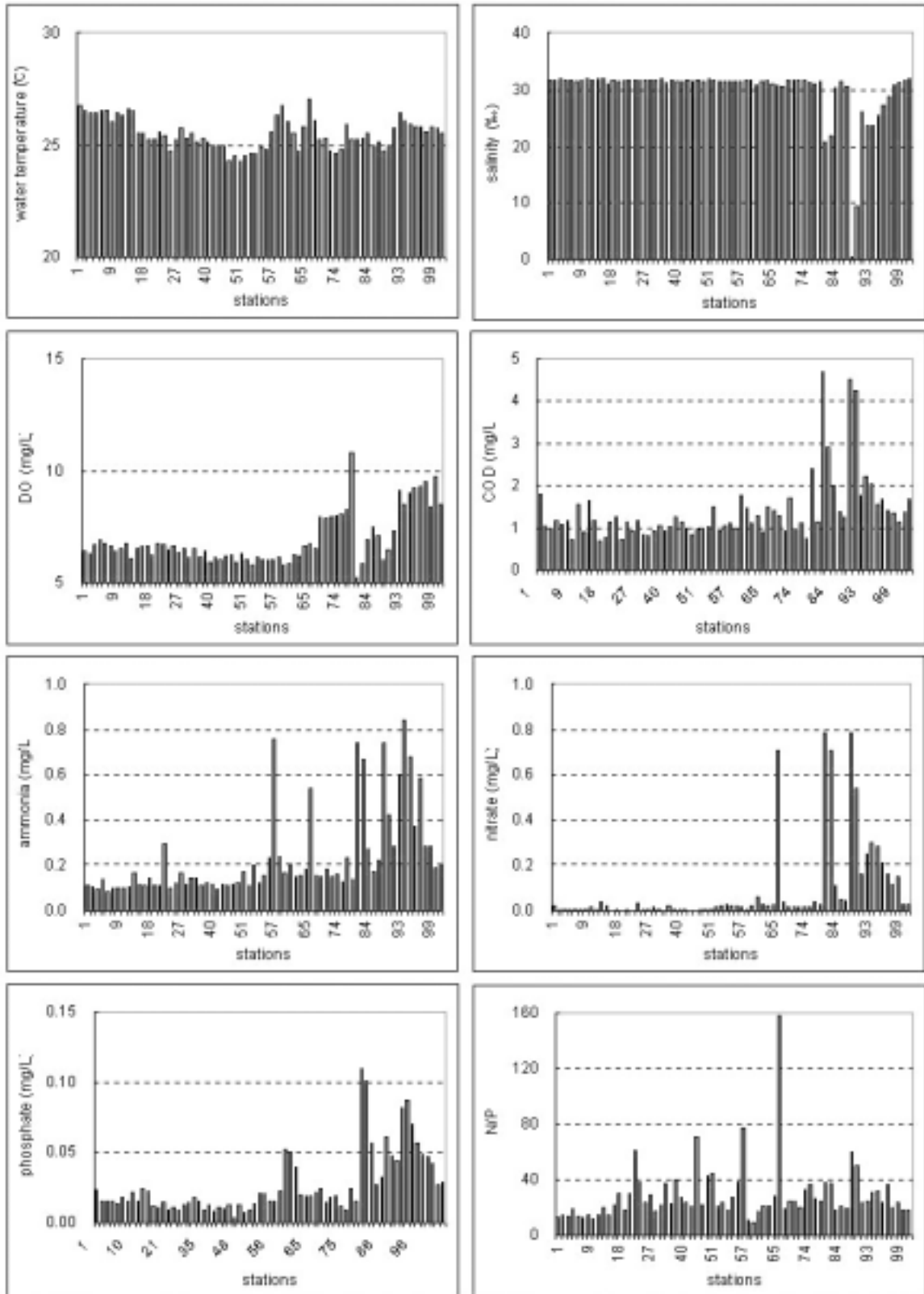


Fig. 2. Spatial variation of water quality in the Saemangum Area, West Sea of Korea in September, 2001

에 많은 영향을 주는 매우 중요한 요소이며 또한 부영양화의 주요 인자이기도 하다. 본 조사에서는 질소계 영양염류로 암모니아, 아질산질소 및 질산질소를 측정하여 그 합을 용존무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN)로 표기하였으며, 용존무기인(DIP)의 양은 인산인(phosphate)을 측정하였다. 우선 암모니아의 농도는 평균 $0.231 \pm 0.191 \text{mg/L}$, 범위는 $0.081 \sim 0.840 \text{mg/L}$ 이었다. 변동계수는 83.0%로 수역에 따른 농도 분포가 매우 다르게 나타났으며, 금강, 만경강 및 동진강과 그 하구역에서 0.4mg/L 이상의 매우 높은 농도를 보였다. 아질산질소와 질산질소의 평균은 각각 $0.033 \pm 0.068 \text{mg/L}$ 및 $0.088 \pm 0.187 \text{mg/L}$ 로 나타났으며, 암모니아와 마찬가지로 금강, 동진강 및 만경강의 본류와 하구역에서 높게 나타났다. 용존무기질소는 평균 $0.352 \pm 0.417 \text{mg/L}$ 였으며, 범위는 $0.087 \sim 1.857 \text{mg/L}$ 로 수역에 따른 농도차가 매우 컸다. 특히 새만금의 지류에서 높은 농도를 보였으며, 총질소 기준으로 새만금 수역 조간대 수질은 해역수질 II 등급에 해당하였다.

인산인은 평균 $0.027 \pm 0.023 \text{mg/L}$, 농도 범위는 $0.004 \sim 0.110 \text{mg/L}$ 로 나타났으며, 변동계수는 83.6%였다. 인산인의 지리적 분포 역시 질소계 영양염류와 동일한 분포 양상을 보여, 새만금의 지류 및 금강 하구역에서 높은 농도를 보였다.

NP 비는 평균 28.8 ± 20.7 , 범위는 $8.8 \sim 158.1$ 로 나타났다. 서해 연안의 경우 일반적인 해양 환경에서의

NP 비가 16인점을 감안할 때 매우 높은 NP 비를 보이며, 특히 강의 하구역인 경우 평균적으로 25를 초과한 반면, 곰소만 및 새만금 외부 수역은 각각 16 및 18 이었다. 따라서 새만금 수역을 포함하는 전북 연안 역시 담수의 영향이 지배적인 환경으로 사료되며, 질소계 영양염류가 인에 비하여 상대적으로 높은 농도를 보여 인이 제한 인자로 작용하였다.

나. 주성분분석을 통한 수질 분포특성

새만금 수역의 수질 분포 특성을 구명하기 위하여 주요 수질 요소인 정점별 화학적산소요구량, 암모니아, 질산질소, 인산인, 염분, 부유물질 및 NP 비를 이용하여 주성분 분석(principal component analysis)을 실시하였다. 정점별 수질 요소를 이용한 주성분 분석은 수질이 유사한 정점끼리 무리화(grouping)할 수 있으며, 따라서 어떠한 수질 요소가 정점별 차이를 일으키고, 또한 어떠한 정점끼리 유사한 수질을 보이는지를 파악할 수 있다. 주성분 분석 결과, 주성분 I(principal component I)은 전체 변이중 61%를, 주성분 II는 18%를, 그리고 주성분 III은 10%를 설명하였다. 주성분 I을 설명하는 주요 수질 요소는 질산질소, 화학적산소요구량, 암모니아 및 염분으로 나타났으며, 주성분 II는 NP비와 부유물질이 주요요소로 나타났다(Fig. 3). 각 정점별 고유치를 도식하면, 금강, 동진강 및 만경강의 하구역과 본류에 위치한 정점은 1/4 또는 4/4 분면에 위치하며, 이와 같은 이유

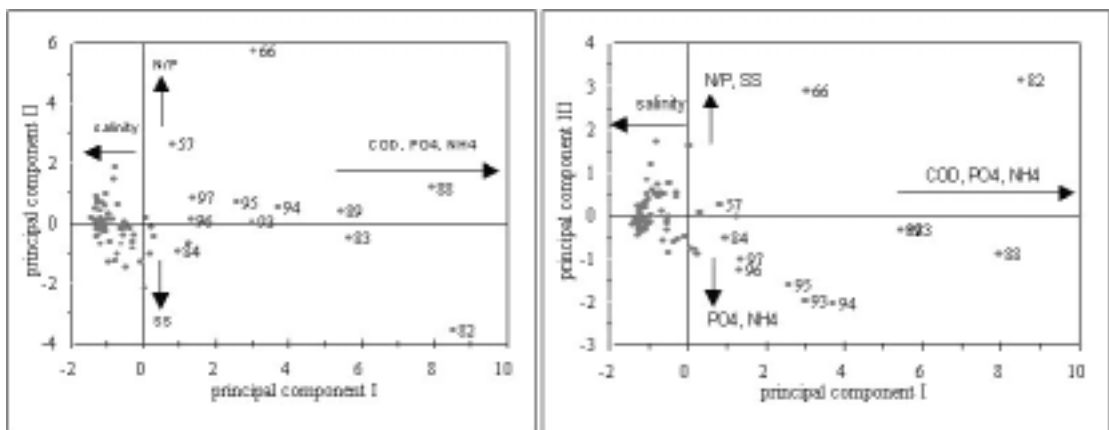


Fig. 3. Principal component ordination of stations in the Saemangum Area using water quality parameters

는 상기 정점에서 화학적산소요구량과 영양염류의 농도가 높게 나타났기 때문이다. 따라서 새만금 수역 조간대의 수질 분포 특성은 새만금의 주요 지류인 동진강과 만경강의 담수 유입량과 그 영향 범위에 따라 수질이 좌우되며, 따라서 각각의 강으로부터 지리적 거리가 수질의 상태를 결정하는 주요 인자로 밝혀졌다.

다. 수질 요소간의 상관관계

새만금 연안의 수질 분포에 영향을 미치는 주요 요인을 구명하기 위하여 정점별로 분석된 수질 자료를 이용하여 Pearson 상관분석을 실시하였다. 분석에 이용된 자료는 염분, 화학적산소요구량, 암모니아, 질산질소, 용존무기질소, 인산인, 부유물질 및 NP이며, 수질 요소간의 상관관계를 구명하므로써 어떠한 요소가 수질의 지리적 분포에 영향을 미치는 주요 요인인가를 구명하기 위함이다.

분석 결과 염분은 모든 수질요소와 매우 높은 유의적 상관관계를 보였고, 또한 영양염류간의 상관관계도 매우 높은 유의성을 보였다(Table 1). 염분은 화학적산소요구량 및 영양염류와 매우 높은 음의 상관관계($p < 0.0001$)를 보였으며, 부유물질 및 NP 비와도 유의적 음의 상관관계($p < 0.05$)를 보였다(Fig. 4). 따라서 염분이 낮을수록 상기 수질요소의 농도가 높음을 의미하고

이는 새만금 연안 해수의 수질은 지류를 통하여 유입되는 담수에 의하여 좌우됨을 의미한다. 염분과 부유물질의 음의 상관관계는 강의 하구역 및 본류의 수로가 좁고 또한 수심이 낮아 조석에 따른 강한 조류가 형성되고 이에 따른 저층 퇴적물의 재부유 때문으로 사료된다. 염분과 NP비 역시 음의 상관관계가 있었으며, 이는 담수에 의해 유입되는 질소계 영양염류의 양이 인에 비해 상대적으로 높음을 의미한다. 또한 질소계 영양염류와 인산인 역시 유의적 양의 상관관계가 나타났으며, 이는 질소 및 인의 유입원이 동일함을 의미한다. 따라서 새만금 연안의 하계 수질에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 담수 유입으로 사료되며, 상기 상관분석에서도 입증되었듯이 염분은 영양염류 및 화학적산소요구량의 지리적 변화(geographical variation)에 60~80%를 설명하는 주요 인자로 구명되었다(Table 1의 상관계수 참조).

이와 같은 현상은 한강의 영향을 주로 받는 서해안의 경기만에서도 동일한 양상을 보였으며(Park과 Park, 2000), 특히 여름철의 경우 집중강우에 의한 담수 유입량이 많아져, 염분과 기타 수질 요소간의 상관관계가 매우 뚜렷하게 나타난다. 그러나 이와 같은 현상은 서해 연안중 담수 유입이 많은 수역에서 나타나는 일반적 현상이며, 모든 수역에 적용되는 것은 아니다. 또한 겨울철에는 담수의 유입량이 현저히 감소되고, 북서 계절

Table 1. Relationship between water quality parameters. Top numbers are correlation coefficients and bottoms are calculated probability

Variables	COD	ammonia	nitrate	DIN	phosphate	SS	N/P
Salinity	-0.8485	-0.6606	-0.8027	-0.7531	-0.6082	-0.2433	-0.2435
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0440	0.0438
COD		0.6415	0.8157	0.7725	0.7316	0.5437	0.1540
		0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.2063
ammonia			0.7814	0.9230	0.8058	0.2008	0.4501
			0.0001	0.0001	0.0001	0.0980	0.0001
nitrate				0.9583	0.7351	0.4127	0.5078
				0.0001	0.0001	0.0004	0.0001
DIN					0.8135	0.3610	0.5192
					0.0001	0.0023	0.0001
phosphate						0.4072	0.0052
						0.0005	0.9665
SS							-0.0634
							0.6048

풍의 영향으로 인하여 수층이 교란되면서 저층 퇴적물이 재부유하게 된다. 따라서 겨울철의 수질에 영향을 미치는 요인은 담수 유입이 아닌 수층 교란에 따른 내부 오염물의 수층 공급으로 수질이 좌우된다(박승운 등, 1999). 그러므로 서해 연안의 수질의 지리적 분포는 여름철에는 염분, 그리고 겨울철에는 부유물질량과 유의적 상관관계가 성립된다.

마. 새만금 수역 조간대의 저질

새만금 갯벌의 저질 특성을 구명하기 위하여 총 101개 정점에서 채취된 표층 퇴적물을 분석한 결과(Fig. 5), 대부분 니사질 퇴적물로 구성되어 있으며, 함수율은 평균 $24.11 \pm 4.49\%$, 범위는 16.41~41.91%로 나타났다. 함수율은 퇴적물의 입도와 밀접한 관계를 가지며, 또한 입도는 퇴적물의 지화학적 특성을 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 함수율이 가장 높은 수역은 새만금 외부의 2개 정점(100, 101)과 금강하구에서 약 30%의 함수율을 보였으며, 동진강 및 만경강 본류와 하구역은 약 25% 이하의 함수율을 보였다.

강열감량은 전체 평균 $1.29 \pm 1.08\%$ 로 정점에 따른 차이가 매우 컸으며(변동계수 83.4%), 범위는

0.12~6.01% 이었다. 강열감량은 퇴적물 내의 유기물 함량을 나타내는 지표 인자로 일반적으로 니질 퇴적물에서 높은 값을 보인다. 따라서 함수율이 높았던 금강하구 및 새만금 외부 수역에서 강열감량이 높았으며, 함수율이 낮았던 동진강 및 만경강 하구와 곰소만 등에서 낮은 값을 보였다.

퇴적물 화학적산소요구량의 평균은 $2.68 \pm 1.85 \text{mg/g} \cdot \text{dry}$, 범위는 0.64~10.91 $\text{mg/g} \cdot \text{dry}$ 이었다. 퇴적물 내의 화학적산소요구량은 강열감량과 밀접한 관계를 가지므로 지리적 분포 양상은 강열감량과 유사하였다. 비교적 높은 농도를 보인 수역은 금강하구 및 변산반도 수역이며, 만경강 및 동진강에서 낮은 농도를 보였다.

산취발성황화물은 평균 $0.04 \pm 0.08 \text{mg/g} \cdot \text{dry}$, 범위는 0.00~0.52 $\text{mg/g} \cdot \text{dry}$ 이었다. 지리적으로 농도가 매우 컸으며, 비교적 높은 농도를 보인 수역은 새만금 외부, 변산반도 및 금강 하구역이고, 동진강 및 만경강에서는 낮은 농도를 보였다.

총탄소(total carbon, TC)는 평균 $0.22 \pm 0.30\%$, 범위는 0.00~2.61% 이었다. 총탄소의 지리적 분포는 상기 언급된 요소의 분포와 매우 유사하여, 유기물 함량이 높았던 새만금 외부, 금강하구 및 변산반도에서 높

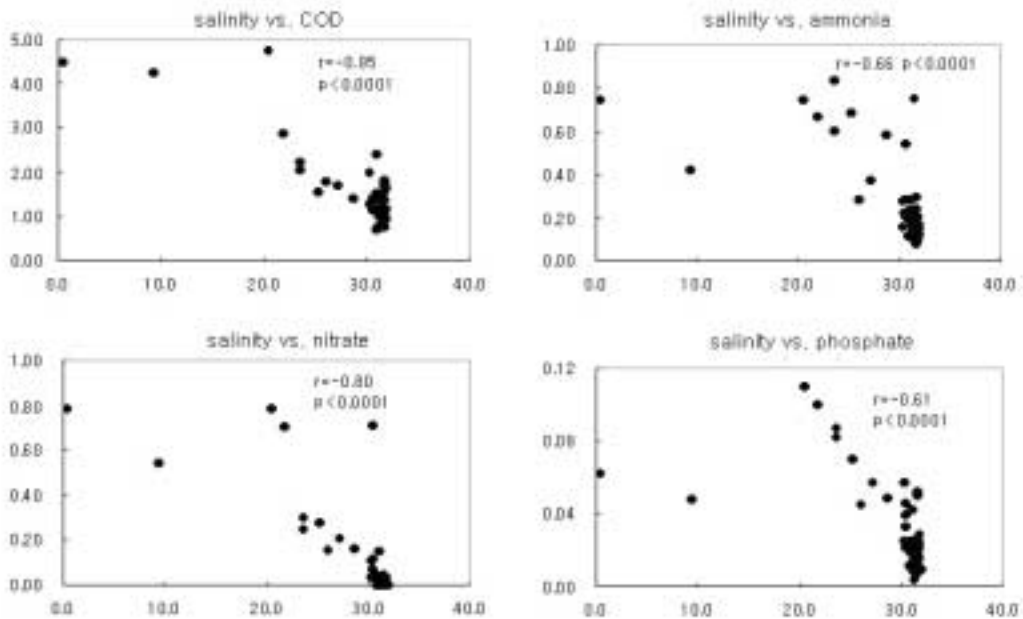


Fig. 4. Correlation between salinity and the other water quality parameters

은 함량을 보였으며, 동진강 및 만경강 하구에서는 낮은 값을 나타냈다. 총질소(total nitrogen, TN)는 평균 $0.02 \pm 0.02\%$, 범위는 $0.00 \sim 0.08\%$ 로 나타났으며, 지리적 분포는 총탄소와 유사하였다.

퇴적물내의 중금속은 알루미늄, 카드뮴, 철, 망간, 니

켈, 납, 아연 및 구리로 총 8개 원소를 분석하였다(Fig. 5). 알루미늄(Al)의 전체 평균은 $2.28 \pm 0.92\%$, 범위는 $0.78 \sim 5.21\%$, 카드뮴(Cd)은 0.61 ± 0.27 ppm, 범위는 $0.14 \sim 1.65$ ppm, 구리(Cu)는 8.95 ± 4.06 ppm, 범위는 $3.84 \sim 28.31$ ppm, 철(Fe)은 $1.19 \pm 0.37\%$, 범위는

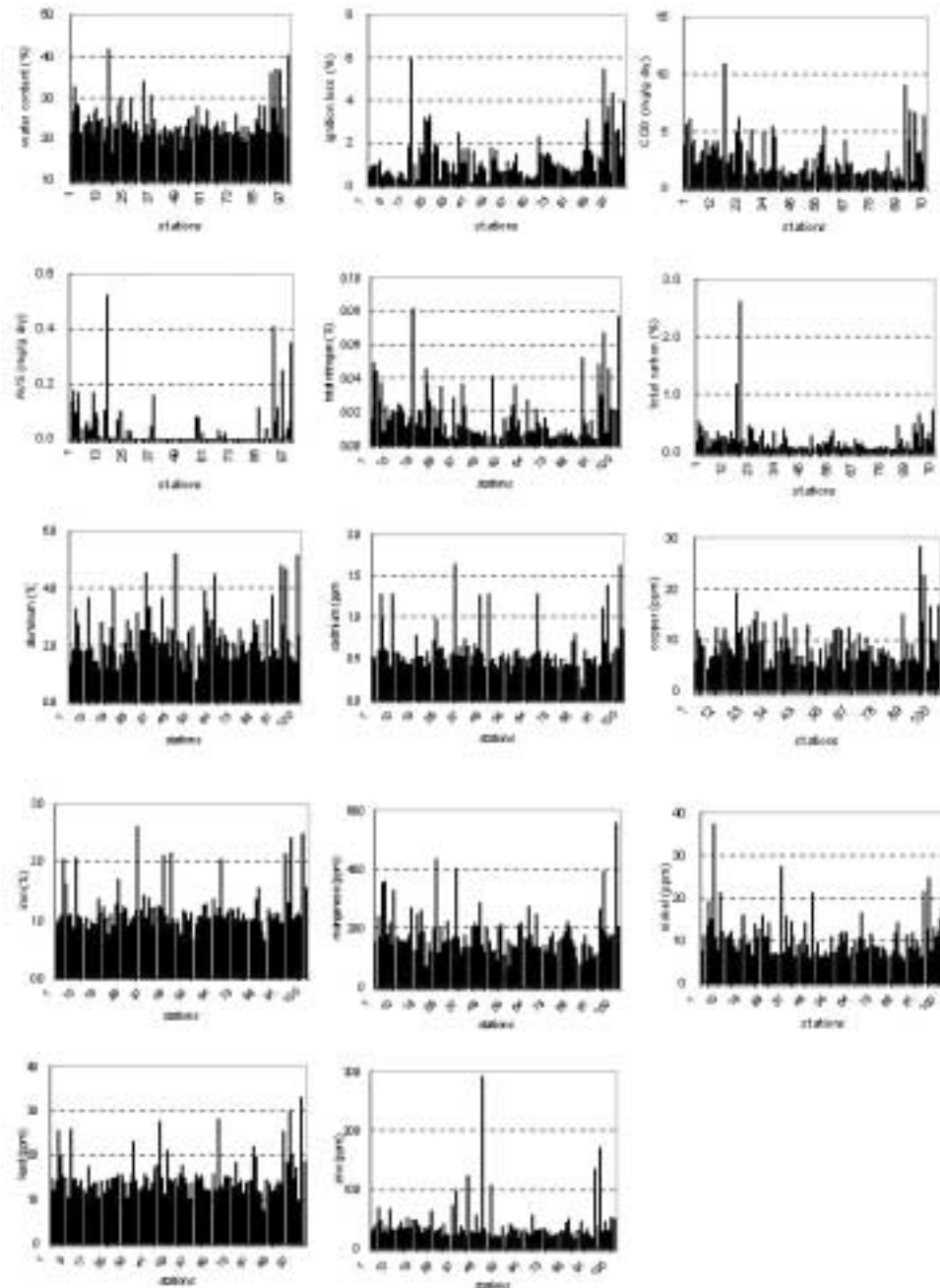


Fig. 5. Distribution of sediment quality parameters in the Saemangum Area of West Sea, Korea in September 2001

0.64~2.61%, 망간(Mn)은 182.31 ± 77.45 ppm, 범위는 68.96~556.90 ppm, 니켈(Ni)은 10.83 ± 4.97 ppm, 범위는 4.94~37.49 ppm, 납(Pb)은 15.20 ± 4.35 ppm, 범위는 7.61~33.00 ppm, 아연(Zn)은 41.34 ± 34.62 ppm, 범위는 15.48~291.60 ppm으로 나타났다. 지리적으로 비교적 높은 농도를 보인 수역은 유기물 및 함수율이 높았던 새만금 외부, 곰소만 및 금강하구 수역으로 나타났으며, 동진강 및 만경강의 본류와 하구역에서는 매우 낮은 농도를 보였다. 따라서 퇴적물내의 중금속 농도 분포는 유기물 함량 및 함수율 등에 의하여 결정되었다(이후 상관관계 참조).

바. 저질 분포 특성

새만금 연안 101개 정점의 저질 분포 특성을 구명하기 위하여 측정 요소중 주요 항목인 중금속 8종과 함수율, 화학적산소요구량, 총탄소, 총질소, 강열감량 및 AVS를 이용하여 주성분 분석을 실시하였다. 분석 결과, 주성분 I(principal component I)은 전체 변이의 48%, 주성분 II는 24%, 그리고 주성분 III은 6%를 설명하여, 수질요소를 이용한 주성분 분석에 비하여 분별도가 낮았다. 주성분 I를 설명하는 주요 저질 요소는 구리, 총질소, 카드뮴, 철, 함수율, 니켈 및 화학적산소요구량이었으며, 주성분 II를 설명하는 주요 저질 요소는 납, 알루미늄, 철, 카드뮴, 화학적산소요구량, AVS, 및 강열감량으로 나타났다(Fig. 6). 따라서 주성분 값을 도

식한 그림에서에서 1/4 및 3/4 분면에 위치한 금강하구 및 새만금 외부 정점과 일부 새만금 내부 정점이 퇴적물 오염도가 비교적 높은 것으로 나타났다. 특히 금강하구의 모든 정점은(정점 93~97) 1/4 및 3/4 분면에 위치하여, 퇴적물 오염도가 다른 수역에 비하여 상대적으로 높게 나타났다. 금강 하구역이 동진강 및 만경강의 하구역보다 중금속 농도가 높은 이유는, 첫째 금강하구는 하구인 건설로 인하여 해수의 소통이 제한되는 점이다. 즉 담수의 유입량이 제한되고, 또한 하구둑으로 인하여 해수의 소통이 원활치 못하며 이에 따른 유속의 감소로 하구역 내의 오염물질은 flushing(씻김) 효과에 의한 오염물 제거 작용이 줄어들게 된다.

이와 더불어 유속의 감소로 인하여 세립질 퇴적물이 우세하게 되며, 세립질 퇴적물은 다량의 유기물을 포함하게 되고, 또한 퇴적물 내의 대부분의 중금속은 유기물과 결합된 형태로 존재하므로 퇴적물 내의 중금속 농도가 증가하게 된다. 두 번째로는 금강하구는 군산항 및 산업단지를 포함하는 외부 오염원이 많은 수역에 위치하기 때문에 중금속의 농도가 다른 수역에 비하여 상대적으로 높게 나타난 것으로 사료된다. 따라서 새만금 방조제가 완성되어 담수 유입이 제한되고 또한 해수의 유통을 저해하므로 새만금 주변의 퇴적물은 세립화되고 이에 따른 퇴적물내 중금속을 포함한 오염물질의 농도는 증가할 것으로 예상된다.

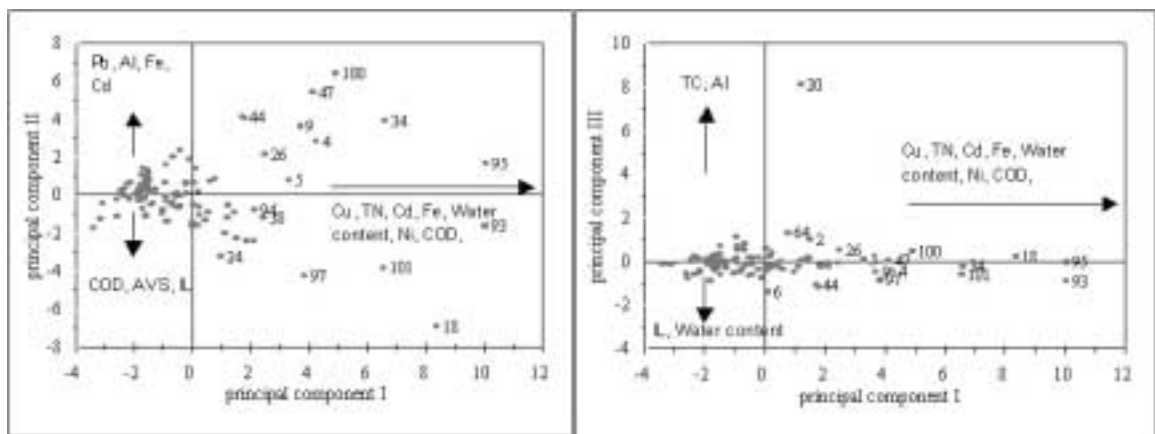


Fig. 6. Principal component ordination of stations in the Saemangum Area using sediment quality parameters

사. 저질 항목간의 상관관계

새만금 연안 101개 정점에서 채취된 표층 퇴적물의 정점별 농도 분포와 이에 영향을 미치는 요인을 구명하기 위하여 저질 요소간의 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 실시하였다(Table 2). 가장 많은 유의적 상관관계를 보인 조합은 함수율과 중금속의 조합이며, 함수율은 알루미늄을 제외한 모든 중금속과 유의적 상관관계를 보였다($p < 0.05$, Fig. 7). 또한 함수율은 총탄소, 총질소, 강열감량 및 AVS와도 높은 양의 상관관계를 보여 퇴적물내의 유기물 및 중금속의 농도를 결정짓는 가장 중요한 요소로 밝혀졌다. 이와 같은 상관관계는 함수율이 퇴적물의 입도와 밀접한 관계를 갖기 때문으로 사료된다. 즉 퇴적물을 구성하는 입자가 작을수록 함수율은 커지고, 또한 입자가 작을수

록 표면적이 상대적으로 커지기 때문에 유기물이 흡착할 수 있는 면적이 많아짐을 의미한다. 또한 유기물량과 중금속 농도가 양의 상관관계를 갖는 이유는 퇴적물 내의 대부분의 중금속이 유기물과 결합된 형태로 존재하기 때문이다(Ramamoorthy와 Rust, 1976; Kudo와 Hart, 1974). 이와 같이 퇴적물 내의 중금속 농도가 유기물 농도 및 입자 등과 밀접한 관계를 가지므로 퇴적물 내 중금속의 절대농도로 오염 정도를 추정하는 데는 다소 무리가 따른다. 이를 보정하기 위하여 농축비(enrichment factor)를 이용하게 되며, 본 연구에서는 shale에 포함된 알루미늄과 다른 중금속의 비율을 본 시료에서 분석된 비율과 비교하여 농축비를 산출하였다(Chester, 1990). 따라서 농축비가 '1'보다 클 경우에는 외부 오염원에 의한 중금속 오염이 발생하였음을 의

Table 2. Correlation between sediment quality parameters. Top numbers are correlation coefficients and bottoms are calculated probability

	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	COD	AVS	IL	WC	TN	TC
Al	0.6117	0.2714	0.7381	0.6479	0.3934	0.5146	0.5943	0.0263	0.0445	0.0273	0.1141	0.0916	0.1623
	0.0001	0.0060	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.7942	0.6587	0.7867	0.2559	0.3621	0.1049
Cd	0.4100	0.9691	0.7858	0.7278	0.8729	0.5668	0.3108	0.2631	0.2105	0.3617	0.3459	0.1680	
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0016	0.0079	0.0347	0.0002	0.0004	0.0932	
Cu	0.4323	0.3116	0.5162	0.2346	0.4217	0.7702	0.6540	0.6544	0.7207	0.7587	0.5053		
	0.0001	0.0015	0.0001	0.0182	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	
Fe	0.7914	0.6968	0.8616	0.6067	0.2498	0.2337	0.2011	0.3447	0.3067	0.1582			
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0118	0.0187	0.0437	0.0004	0.0018	0.1141			
Mn	0.5035	0.7087	0.3451	0.2318	0.2005	0.0728	0.2346	0.3101	0.2495				
	0.0001	0.0001	0.0004	0.0197	0.0444	0.4694	0.0182	0.0016	0.0119				
Ni	0.5614	0.5044	0.4610	0.3626	0.2860	0.5057	0.4577	0.2288					
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0037	0.0001	0.0001	0.0214					
Pb	0.4522	0.1688	0.1866	0.1095	0.1994	0.2043	0.0139						
	0.0001	0.0916	0.0617	0.2759	0.0456	0.0404	0.8899						
Zn	0.2064	0.1963	0.1986	0.2573	0.2807	0.1296							
	0.0384	0.0491	0.0464	0.0094	0.0045	0.1965							
COD	0.8258	0.6419	0.8075	0.8665	0.5455								
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001								
AVS	0.6742	0.7660	0.7996	0.4496									
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001									
IL	0.6631	0.6619	0.3223										
	0.0001	0.0001	0.0010										
WC	0.8273	0.3414											
	0.0001	0.0005											
TN	0.5842												
	0.0001												

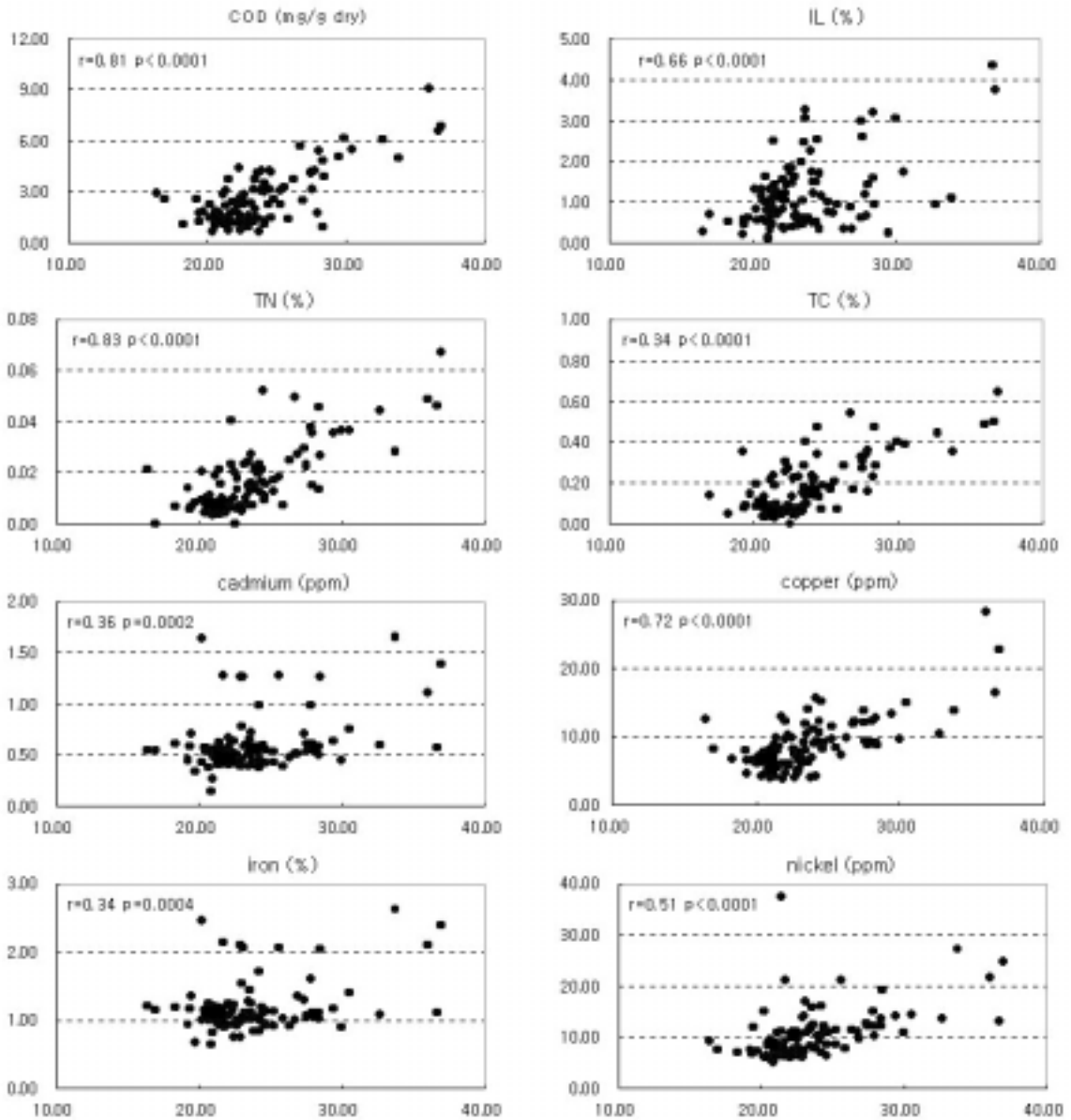


Fig. 7. Correlation between water contents(%) and sediment quality parameters collected in the Saemangum Area in September 2001

미하게 된다. 농축비를 강열감량과 비교하여 도식한 결과, 아연을 제외한 대부분의 중금속 원소는 농축비가”1 “에 근접하였으며, 또한 강열감량과 농축비는 양의 상관 관계를 보였다(Fig. 8). 따라서 새만금 연안 퇴적물의 오염도는 높지 않은 것으로 판단되며, 또한 절대 농도도 다른 해역에 비하여 높지 않은 것으로 나타났다(Table 3). 따라서 새만금 연안의 퇴적물 오염도는 일부 수역을 제외하고는 전반적으로 양호한 상태를 보였다.

4. 감사의글

본 연구는 해양수산부과제인 “갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구” 과제로 수행되었고, 본 논문과 관련된 자료 및 퇴적환경, 생물상 분포 및 인문사회적 특성 등은 최종연구보고서(해양수산부, 2001)에 수록되어 있으며, 본 논문을 심사하여 주신 한국해양연구원의 김은수, 정창수 박사님께 감사드립니다.

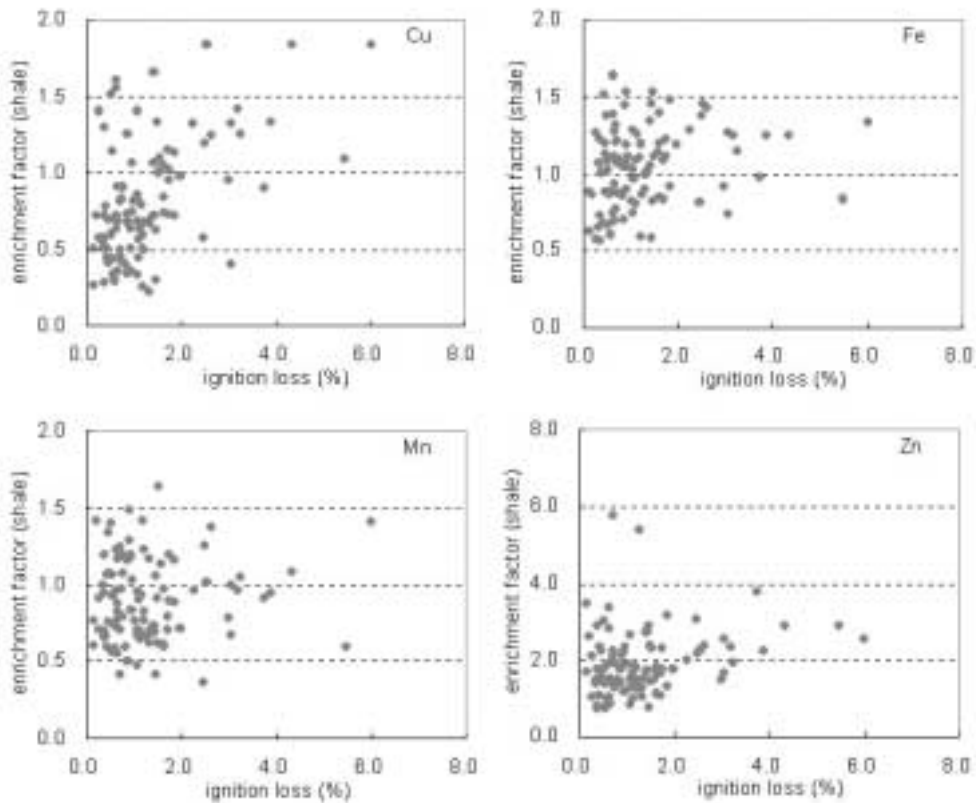


Fig. 8. Correlation between ignition loss(%) as an organic material in sediment and enrichment factor

5. 참고문헌

1. 박경수, 박승윤, 김전풍, 박중현, 강지수, 황해 표층 퇴적물의 지화학적 특성, 수진원연구보고, 제56권, pp.221~229, 1999.
2. 박승윤, 박경수, 석규진, 오현주, 이영식, 김전풍, 경기만 수질의 시공간적 변동과 부영양화, 수진연구보고, 제56권, pp.189~204, 1999.
3. 해양수산부, 해양환경공정시험법, 1998.
4. 해양수산부 : 갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용 방안 연구, 2001.
5. Bothner, M.H., Aruscavage, P.J., Ferrebee, W.M., and Baedeker, P.A., Trace metal concentrations in sediment cores from the Continental Shelf off the south-eastern United States. Estuarine and Coastal Marine Science, Vol. 10, pp.523~541, 1980.
6. Brugmann, L., Heavy metals in the Baltic Sea. Marine Pollution Bulletin, Vol.12, pp.214~218, 1981.
7. Chester, R., Marine Geochemistry. Unwin Hyman, Londo, 1990.
8. Emerson, R.R., Soule, D.F., and Oguri, M., Heavy metal concentrations in marine organisms and sediments collected near an industrial waste outfall. Proceedings of International Conference on Environmental Sensing and Assessment, Vol.1, Las Vegas, Nevada, Sept. 14~19, 1975. pp.1~5, 1976.
9. Greig, R.A., Reid, R.N., and Wenzloff, D.R., Trace metal concentrations in sediments from Long Island Sound. Marine Pollution Bulletin Vol.8, pp.183~188, 1977.
10. Hong, G.K., Zhang, J., and Park, B.K.,

Table 3. Heavy metal concentrations in the marine sediments of world oceans

Location	Average(range)	References
Cadmium		
Baltic Sea	-(0.01-8.1)	Olausson 등, 1997
Coast of Israel	-(0.3-2.2)	Roth와 Hornung, 1977
Estuaries(UK)	-(0.2-25)	Steele 등, 1973
Santa Minica Canyon(USA)	-(0.2-65)	Schafer와 Bascom, 1976
Tokyo Bay	-(3.1-40.4)	Ishibashi, 1970
Yellow Sea	0.1(-)	Hong 등,1998
Yellow Sea(central area)	0.11(0.0.02-0.24)	unpublished
Yellow Sea(tidal flat)	0.61(0.14-1.65)	this study
Copper		
Baltic Sea	-(1-283)	Brugmann, 1981
Coastal Waters, North Sea(UK)	8(2-49)	Taylor, 1979
Continental Shelf(SE,USA)	≤2	Bothner 등, 1980
Los Angeles Harbour(USA)	99(39-148)	Emerson 등, 1976
Mediterranean(Lebanon)	21(2-195)	Shiber, 1980
Sorfjord(Norway)	2,400(210-12,000)	Skei 등, 1972
South Sea(Korea)	11,0(2-35)	Hong 등,1998
St.Lawrence Estuary(Canada)	19(3-76)	Loring, 1978
Yellow Sea(coastal area)	7(0.1-32.0)	박경수 등, 1999
Yellow Sea	-(5-30)	Lee 등, 1998
Yellow Sea	12.8(-)	Hong 등,1998
Yellow Sea(central area)	16.75(2.40-22.70)	unpublished
Yellow Sea(tidal flat)	8.95(3.84-28.31)	this study
Lead		
Baltic Sea	-(2-400)	Brugmann, 1981
Continental Shelf(SE,USA)	≤4	Bothner 등, 1980
Long Island Sound(USA)	-(200-350)	Greig 등, 1977
Sorfjorden(Norway)	11,400(720-70,000)	Skei 등, 1972
South Sea(Korea)	27.0(28-32)	Hong 등,1998
Yellow Sea(coastal area)	15(2-73)	박경수 등, 1999
Yellow Sea	-(20-25)	Lee 등, 1998
Yellow Sea	25.3(-)	Hong 등,1998
Yellow Sea(central area)	20.31(11.50-40.60)	unpublished
Yellow Sea(tidal flat)	15.20(7.61-33.00)	this study
Zinc		
Baltic Sea	-(6-2,090)	Brugmann, 1981
Continental Shelf(SE,USA)	6(3-10)	Bothner 등, 1980
Los Angeles Harbour(USA)	202(98-325)	Emerson 등, 1976
Mediterranean(Labanon)	60(13-155)	Shiber, 1980
South Sea(Korea)	53.0(18-110)	Hong 등,1998
Yellow Sea(coastal area)	179(51-657)	박경수 등, 1999
Yellow Sea	-(30-100)	Lee 등, 1998
Yellow Sea	54.5(-)	Hong 등,1998
Yellow Sea(central area)	67.63(32.80-98.00)	unpublished
Yellow Sea(tidal flat)	41.43(15.48-291.60)	this study

- Health of the Yellow Sea. The Earth Love Publication Association, Seoul. pp.342, 1998.
11. Ishibashi, M.S., Ueda, S., and Yamamoto, Y., The chemical composition and cadmium; Chromium and vanadium contents of shallow-water deposits in Tokyo Bay. Journal of the Oceanographical Society of Japan Vol.26, pp.189~194, 1970.
 12. Kudo, A., and Hart, J. S., Uptake of inorganic mercury by bed sediments. J. of Environmental Quality, Vol.3, pp.273~278, 1974.
 13. Lee, Y.C., Qin, Y.S., and Liu, R.Y., Yellow Sea Atlas. Ho Yong Publishing Co. Seoul. pp.524, 1998.
 14. Loring, D.H., Geochemistry of zinc, copper and lead in the sediments of the estuary and Gulf of St. Lawrence. Canadian Journal of Earth Sciences Vol.15, pp.757~772, 1978.
 15. Olausson, E, Gustafsson, O., Mellin, T., and Svensson. R., Current level of heavy metal pollution and eutrophication in Baltic proper. Medd Marine-geol. Labor, Goteborg Vol.9, pp.28, 1977.
 16. Park, G.S., and Park, S.Y., Long-term trends and temporal heterogeneity of water quality tidally mixed estuarine waters. Marine Pollution Bulletin Vol.40, pp.1201~1209, 2000.
 17. Parsons, T.R., Maita, Y., and Lalli, C.M., A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis, Pergamon Press, Oxford, 1984.
 18. Ramamoorthy, S., and Rust, B.R., Mercury absorption and desorption characteristics of some Ottawa River sediment. Canadian J. of Earth and Sciences Vol.13, pp.530~536, 1976.
 19. Roth, I., and Hornung, H., Heavy metal concentrations in water, sediments and fish from Mediterranean coastal area, Israel. Environmental Sciences and Technology Vol.11, pp.265~269, 1977.
 20. SAS, SAS User's Guide. SAS Institute. North Carolina, 1983.
 21. Schafer, H.A., and Bascom, W., Sludge in Santa Monica Bay. Annual Report, Southern California Coastal Water Research Project, pp.77~82, 1976.
 22. Shiber, J.G., Metal concentrations in marine sediments from Lebanon. Water, Air, and Soil Pollution Vol.13, pp.35~43, 1980.
 23. Skei, J.M., Price, N.B., Calvert, S.E., and Holtedahl, H., The distribution of heavy metals in sediments of Sorfjord, West Norway. Water, Air, and Soil Pollution. Vol.1, pp.452~461, 1972.
 24. Steele, J.H., McIntyre, A.D., Johnson, R., Baxter, I.G., Topping, G., and Dooley, H.D., Pollution studies in the Clyde Sea area. Marine Pollution Bulletin Vol.4, pp.153~157, 1973.
 25. Taylor, D., The effect of discharges from three industrialized estuaries on the distribution of heavy metals in the costal sediments of the North Sea. Estuarine and Coastal Marine Science Vol.8, pp.387~393, 1979.