

마산항 표층 퇴적물의 유기물 및 금속원소의 분포

황동운 · 진현국 · 김성수 · 김정대 · 박종수 · 김성길*
국립수산과학원 해양환경본부 환경관리팀

Distribution of Organic Matters and Metallic Elements in the Surface Sediments of Masan Harbor, Korea

Dong Woon HWANG, Hyun Gook JIN, Seong Soo KIM, Jung Dae KIM,
Jong Soo PARK and Seong Gil KIM*
Marine Environmental Management Team, Headquarter for Marine Environment Department,
NFRDI, Busan 619-902, Korea

We measured the concentrations of organic matter and metallic elements (Al, Fe, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb and Hg) in the surface sediments of Masan Harbor (in the southern sea, Korea) to evaluate the geochemical characters of sediment and the pollutions by organic matter and metallic elements. The mean grain size of the surface sediments in the study area ranged from 5.6 Φ to 7.8 Φ , indicating silt sediment. The water content of the surface sediments exceeded 60% except at some stations. The contents of ignition loss (IL), total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) ranged from 7.2-14.3%, 1.2-3.2%, and 0.10-0.28%, respectively. Based on the C/N ratios, the organic matter in the surface sediments of Masan Harbor may originate from terrigenous sources including fluvial inputs (mainly sewage in urban areas). The chemical oxygen demand (COD) and acid volatile sulfide (AVS) ranged from 11.3-29.9 mgO₂/g·dry and 0.20-4.47 mgS/g·dry, respectively, and low concentrations were observed near a shipping route. In addition, the concentrations of metallic elements showed large spatial variations in Masan Harbor and the distributions of metallic elements were also comparable to those of organic matter. This implies that the distributions of organic matter and metallic elements in the surface sediments of Masan Harbor are mainly controlled by biogenic matter and artificial action (mainly dredging). In addition, we calculated the enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) in order to evaluate pollution by metallic elements. The enrichment of metallic elements relative to Al was three to eighteen times higher at the study sites, compared to levels in the Earth's crust except for Fe, Ni and Mn. In addition, the Igeo class indicated that the surface sediments in the study area were moderately to strongly polluted in terms of metallic elements.

Key words: Masan Harbor, Sediment, Metal, Enrichment factor, Geoaccumulation index

서론

연안해역은 육지와 해양의 경계면에 인접한 해역으로 수심이 얇고 강물과 하천을 통해 육상의 오염물질의 유입으로 물리학적, 생물학적, 지화학적 변화가 심한 지역이다. 특히, 전 세계적으로 연안해역은 1960년대 이후 공업단지, 각종 편의시설 및 신도시 건설 등 그 활용도가 증가함에 따라 산업폐수, 오수, 어업양식 폐기물 등으로 인한 인위적인 오염이 가중되고 있다(Woo et al., 1999, 2003).

한반도의 남동쪽 진해만의 동북쪽에 깊숙이 위치하고 있는 마산만 또한 1970년대 이후 주변의 마산시와 창원시에 임해공업단지(마산 수출자유지역과 창원 기계공업단지)의 조성으로 인하여 인구가 증가하였다. 이로 인해 공단지역과 도시에서 배출되는 다량의 산업폐수와 생활하수 등의 유입량이 증가함에 따라 마산만의 수질은 크게 악화되어 해역 자체가 가지고 있는 자정능력을 상실하고 부영양화가 진행되어져 왔다(Jin

et al., 2000). 특히, 반폐쇄적인 내만의 특성을 가진 마산만은 외해수와 혼합이 매우 제한적이기 때문에, 육상으로부터 유입된 다량의 유기물과 금속원소와 같은 오염물질들이 외해로 빠져나가지 못하고 입자물질에 흡착되어 마산만내 해양퇴적물로 이동하여 퇴적물의 오염을 가중시켜 퇴적물 내에 서식하는 각종 저서생물을 포함한 저서생태계에 큰 영향을 미치고 있다(Hong and Lee, 1983; Kim et al., 1986; Cho et al., 1998; Woo et al., 1999, 2003).

또한, 해양퇴적물로 이동한 오염물질들은 퇴적물의 산화환원 환경(redox condition) 변화와 속성작용에 의해 다시 해양의 수층으로 공급되며, 이는 해수의 성층이 형성되는 하계에 연안부영양화를 가속화시켜 만성적인 적조의 발생과 다발적인 저층 빈산소 수괴의 형성 등과 같은 각종 연안 해양환경문제를 발생시키고 수산생물의 대량 폐사를 야기할 수 있다(Hong, 1987; Macdonald et al., 1991; Presley et al., 1992; Choi et al., 1999). 이러한 이유로 마산만은 1983년 환경청 고시에 의해 특별관리해역으로 지정되어 환경개선을 위한 환경기초시설

*Corresponding author: cosmas@momaf.go.kr

설치, 양식장 정화사업, 오염물질 준설사업 등을 시행하여 왔으며(Lee and Park, 2003), 마산만 해역의 중요성을 인식하고 지금까지 마산만 주변 해수 및 퇴적물 중의 유기물이나 중금속 오염(Lee and Lee, 1983; Kang and Lee, 1996; Jin et al., 2000) 및 저서생물의 변화(Hong and Lee, 1983; Woo et al., 1999)에 대한 많은 기초적인 연구가 지속적으로 이루어져 있다. 그러나, 지금까지의 활발한 연구에도 불구하고 마산만 내에서도 오염이 가장 심각할 것으로 예상되는 마산항 내에서의 유기물이나 금속원소의 분포 특성 및 오염에 대해서는 거의 알려져 있지 않은 실정이다. 특히, 마산항의 경우 1990년부터 1994년까지 오염퇴적물에 대한 대규모 준설이 이루어졌으나, 육상오염물질의 오염부하량 저감대책 시행 이전에 이루어져 준설의 효과가 크지 않기 때문에 현재 퇴적물중의 유기물과 금속원소의 농도에 대한 정확한 근거 자료가 부족한 실정이다(MOMAF, 2002).

연구해역인 마산항은 진해만 북동쪽에 위치한 폭 1.1-3.2 km, 길이 약 9.3 km의 좁고 긴 반폐쇄적인 특성을 가진 마산만의 가장 안쪽(마산시 덕동 상대말-진해시 동도를 잇는 선내)에 위치한 항구이다. 마산항의 총 해수면적은 총 약 14 km²이고 수심은 마산만의 입구 쪽인 소모도 단면에서는 27 m로 깊으나 만의 안쪽으로 들어감에 따라 점차 얕아져 저도 단면에서는 약 12 m를 나타낸다. 또한, 마산항 내는 평균 수심이

약 7-8 m로서 북쪽의 삼호산호천과 북동쪽에 위치한 남천을 통해 유입된 토사가 항내에 퇴적되어 수심이 비교적 얕아 대부분의 지역이 평균수심보다 얕고 일부 항로유지를 위한 준설을 통해 항로 및 신설부두 주변으로 수심이 10 m 이상을 나타낸다(Fig. 1).

따라서, 이 연구의 목적은 마산항 표층 퇴적물의 지화학적 특성과 유기물 및 금속원소의 오염 정도를 파악하는데 있으며, 이를 위해 마산항 표층 퇴적물의 퇴적학적 특성(Mean Grain Size, Sorting, Skewness, Kurtosis)과 유기물 및 금속원소들의 오염을 알 수 있는 여러 지화학적 인자들(Total Organic Carbon, Total Nitrogen, Chemical Oxygen Demand, Acid Volatile Sulfide, Metallic Elements)을 조사하였다.

재료 및 방법

조사항목 및 분석방법

본 연구는 국립수산과학원의 조사선을 이용하여 2005년 8월에 마산항내 저도 안쪽의 총 22개의 정점에서 Box Corer를 이용하여 표층 퇴적물(0-3 cm)을 채취하였다(Fig. 1). 채취한 시료는 냉동 보관 후 실험실로 운반하여 평균입도(Mz; Mean Grain Size)와 함수율(WC; Water Content), 강열감량(IL; Ignition Loss), 총 유기탄소(TOC; Total Organic Carbon), 총질소(TN; Total Nitrogen), 화학적 산소 요구량(COD; Chemical

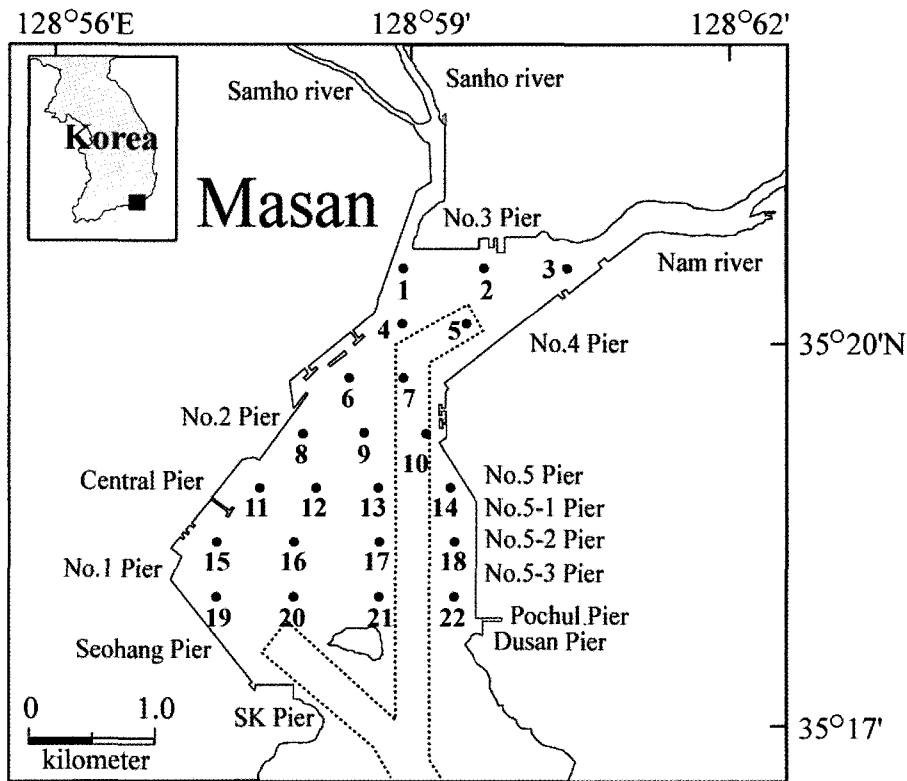


Fig. 1. A map showing the study area and the sampling stations for analysing the surface sediment. The dot lines represent the sea route of ship.

Oxygen Demand), 산 휘발성 황화물(AVS, Acid volatile sulfide), 그리고 금속원소(Al, Fe, Cr, Cu, Ni, Zn, Cd, As, Pb, Hg)를 분석하였다.

퇴적물의 Mz분석은 채취한 퇴적물 시료를 약 20 g 정도 취하여 이온교환수를 이용하여 염분을 제거한 다음 10% 과산화수소(H₂O₂)와 0.1 N 염산(HCl)을 차례로 넣어 유기물과 탄산염(CaCO₃)을 완전히 제거하였다. 이 퇴적물은 다시 이온교환수를 이용하여 깨끗이 세척하고 4 ϕ (0.0625 mm) 표준체로 물체질(wet sieving)을 한 후 4 ϕ 보다 큰 조립질 입자에 대해서는 110 $^{\circ}$ C에서 24시간 동안 건조한 후 진탕기(Ro Tap sieve shaker)를 이용하여 건식체질(dry sieving)을 한 후 1 ϕ 간격으로 무게 백분율을 구하였고, 4 ϕ 보다 작은 세립질 입자에 대해서는 약 2 g 정도의 퇴적물을 취한 다음 자동입도분석기(Helos, Sympatec)로 분석하였다. 여기서 퇴적물의 특성을 나타내는 Mz, 분급도(Sorting), 왜도(Skewness) 및 첨도(Kurtosis)는 컴퓨터를 이용하여 통계처리 하였으며, 퇴적상의 분류는 Folk (1968)의 방법에 따랐다.

WC와 IL은 먼저, 퇴적물 시료 약 20 g을 미리 무게를 측정한다거나 담아 이를 건조기에 넣어 110 $^{\circ}$ C에서 24시간 가열한 후 데시케이터 안에서 실온으로 식혀 도가니의 무게를 측정하였고, 이를 전기로에 넣고 550 $^{\circ}$ C에서 4시간 가열한 후 데시케이터 안에서 실온으로 식혀 도가니의 무게를 측정하여 그 무게차이로 WC와 IL을 계산하였다.

퇴적물의 COD는 먼저 습시료 약 1g의 무게를 취하여 250 mL 삼각플라스크에 넣고 0.1 N KMnO₄ 100 mL와 10% NaOH 5 mL를 넣고 잘 흔든 다음, 시료와 시약이 담긴 플라스크를 끓는 물에서 1시간 동안 중탕하였다. 그 후 실온으로 냉각시켜 10% KI 10 mL와 4% Na₂S₂O₃ 한 방울을 넣은 다음, 여기에 증류수를 가해 500 mL로 만든 후 잘 흔들어 유리섬유여과지로 여과한 후, 여과용액 100 mL를 30% H₂SO₄ 2 mL을 넣고 잘 흔들어 이를 0.1 N Na₂S₂O₃·H₂O 용액으로 적정·분석하였다.

TOC와 TN의 분석은 먼저 냉동 건조시킨 시료 0.5 g을 유리 vial에 시료 약 0.5 g을 넣고 1 N HCl 10 mL를 첨가하여 탄산염을 제거하고, 70 $^{\circ}$ C에서 하룻밤 동안 수분과 잔류염소를 날려 보냈다. 전처리된 시료는 105 $^{\circ}$ C에서 2시간 건조시키고, 상온에서 2시간 방치 후 주석박막으로 3-5 mg의 시료를 말아 CHN 원소분석기(Flash EA 1112, ThermoFinnigan)로 측정하였다.

AVS는 채취한 퇴적물중 일정량을 칭량하여 검지관법을 이용하여 측정하였다. 즉, 습시료 약 2 g의 무게를 정확히 측정하여 황화수소(H₂S) 발생관에 넣은 후 약간의 증류수를 넣고 기체가 새지 않도록 뚜껑을 닫은 다음 발생관에 황산 2 mL를 넣고 2-3초간 기다린 후 펌프를 이용하여 발생하는 황화수소가 검지관에 흡수되도록 하여 측정하였다.

금속원소의 분석은 퇴적물 시료를 -80 $^{\circ}$ C에서 동결건조한 후 플라스틱 재질의 체(ϕ <63 μ m)로 체질하여 통과된 퇴적물을 시료로 사용하였다. 미량금속을 추출하기 위하여 1 g의 동결건조된 퇴적물 시료를 50 mL 테프론 비이커에 넣고 혼합

산(HNO₃:HF:HClO₄=2:2:1)을 이용하여 digestion 하였다. 산을 완전히 휘발시킨 후 2% HNO₃ 용액을 사용하여 100 mL로 정용하였다. 퇴적물 시료의 미량금속분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, Elan 6000)로 분석하였으며, Hg의 경우 수은자동분석기(Milestone, AMA-254)로 분석하였다. 분석자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 Standard Reference Material은 PACS-2 (Marine Sediment)를 이용하였으며, 모든 전처리 과정은 class 100의 clean booth 내에서 행하였다.

결과 및 고찰

표층 퇴적물의 퇴적학적 특성

본 연구지역의 표층 퇴적물중 WC는 43-73% 범위로서 항로 부근의 St. 5와 St. 7, 그리고 항내 북서쪽의 St. 8을 제외한 모든 정점에서 60% 이상의 높은 WC를 나타내었다(Fig. 2). 퇴적물의 Mz 분포는 현재의 수리역학적 퇴적환경을 잘 반영하는 주요 인자로서, 퇴적물의 공급원 혹은 해수의 물리적 유동 즉, 기상변화에 따른 조류, 파랑 등 수리역학적 에너지의 변동에 의해 크게 좌우된다(Lee et al., 2004). 마산항 표층 퇴적물중 모래 (sand)는 0-40% (평균 7.5%), 실트(silt)와 점토(clay)는 각각 51-76% (평균 72.2%), 9-26% (평균 20.3%) 범위로서 실트와 점토의 함량에 비해 모래의 함량이 매우 낮았다. 따라서, Mz분석결과를 기초로 한 마산항 표층 퇴적물의 퇴적상은 Folk (1968)의 분류법에 따라 크게 2개의 퇴적상으로 나누어 졌으며, St. 4, St. 5, St. 8, 그리고 St. 17은 sandy silt로, 그 나머지 정점들은 silt로 구분되었다. 또한, 평균 Mz는 실트질 퇴적물의 Mz인 5.6-7.8 ϕ (평균 7.2 ϕ) 범위로 very coarse silt에서 fine silt에 해당하며, 마산항 4부두 앞쪽의 St. 5를 제외하면 대부분 6.5 ϕ 이상으로 지역별로 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2).

Mz에 대한 조직변수의 변화를 살펴보면(Fig. 3), 분급도는 1.0-2.5 ϕ 범위였으며, 주로 1.0-2.0 ϕ 사이에 분포하였다. 이는 마산항내 표층 퇴적물이 불량한 분급(Poorly sorted)을 가지고 있고 다양한 크기의 입자가 존재함을 의미한다. 또한, 왜도는 -1.5-1.0 범위로 음성 왜도(Negatively skewed)와 양성왜도(Positively skewed)를 모두 가지나 대부분 0.5-0.2 사이에 분포하여 음성왜도와 균형적인 왜도(Symmetrical skewed)를, 첨도는 2.0-8.5 범위이나 대부분 2.5-3.5 사이로 매우 돌출형의 형태(Very leptokurtic)를 보였다. 이는 마산항 표층 퇴적물의 대부분의 시료에서 비교적 세립질 퇴적물이 집중적으로 분포하고 있음을 의미한다.

표층 퇴적물의 유기물 함량 및 분포 특성

마산항내 표층 퇴적물중의 유기물 함량과 분포특성을 살펴보면(Fig. 4), IL과 TOC, TN의 농도는 각각 7.2-14.3% (11.2 \pm 1.6%), 1.2-3.2% (2.3 \pm 0.4%), 0.10-0.28% (0.20 \pm 0.01%) 범위로, 저도 서쪽의 St. 15와 St. 20에서 다소 높고, 4부두 앞쪽의

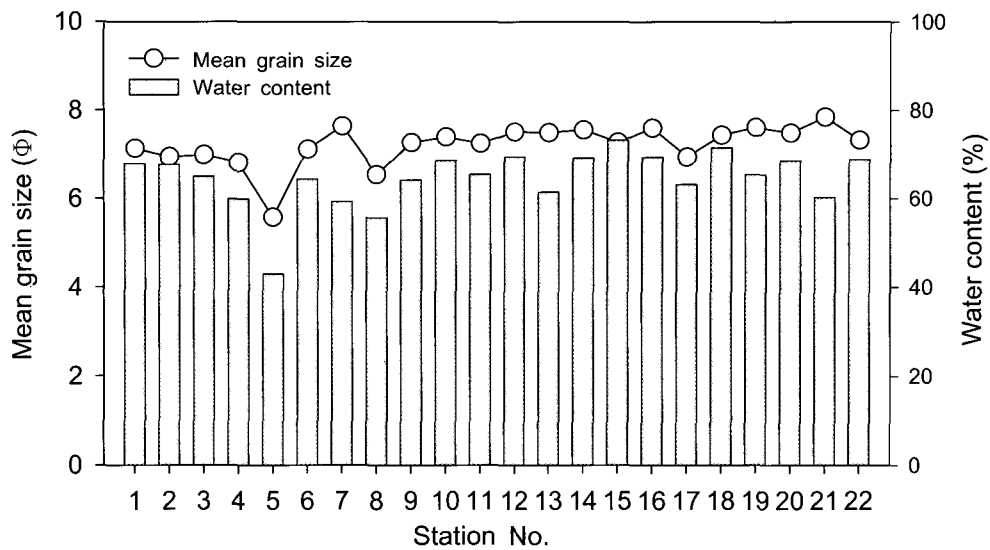


Fig. 2. Mean grain size and water content of each station in surface sediment of Masan Harbor.

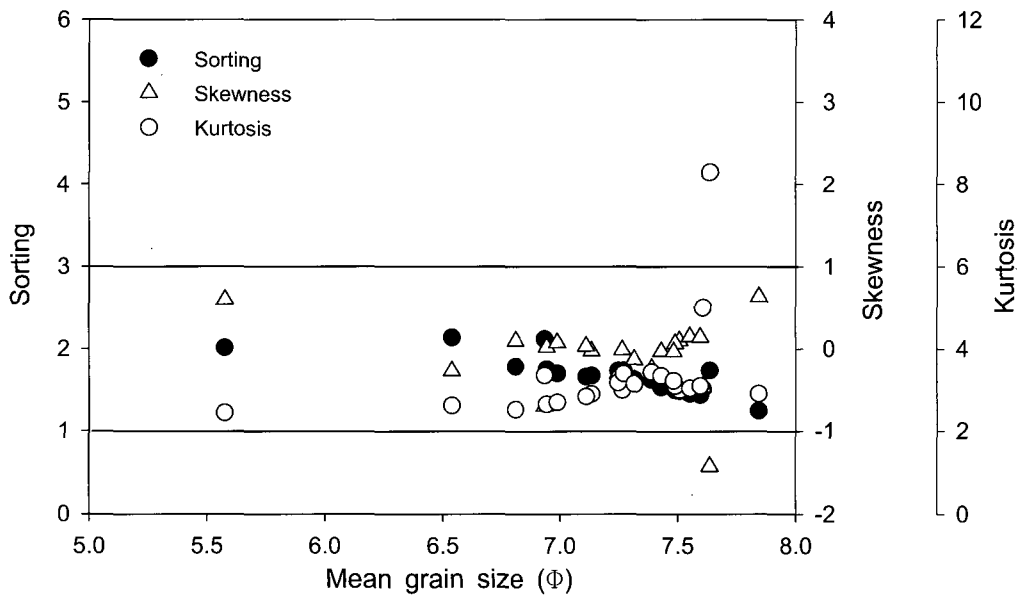


Fig. 3. Plots of mean grain size versus sorting, skewness, and kurtosis of surface sediment in Masan Harbor.

St. 5에서 가장 낮은 농도를 나타내었다. 일반적으로 퇴적물 내 유기물의 함량은 퇴적물의 Mz와 밀접한 관련이 있으며 대체로 세립질 퇴적물 일수록 유기물 함량이 높은 것으로 알려져 있다(Cho et al., 1994; Cho and Park, 1998; Hyun et al., 2003a). 그러나, 본 논문에서는 제시하지 않았지만 연구지역 내 표층 퇴적물중 IL, TOC, TN의 함량은 퇴적물의 Mz와 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으며($R^2 < 0.26$), 같은 Mz내에서도 큰 유기물 함량차이를 나타내었다. 특히, St. 5를 포함한 항로에 인접한 정점들(Sts. 7, 13, 21)은 주변의 다른 정점들에 비해 낮은 농도를 보였다(Fig. 4). 이러한 마산항내 유기물의 분포 경향은 연구지역내 퇴적물의 평균 Mz의 변화가 적은

것으로 보아 퇴적물의 Mz보다는 다른 외부적인 요인에 의해서 조절되며, 주로 항내의 항로유지 혹은 오염 퇴적물의 정화를 위한 준설과 같은 인위적인 활동과 크게 관련이 있을 것으로 판단된다. 한편, 연구지역내 IL, TOC, TN의 평균농도는 Park et al. (1995)이 부산항에서 측정한 유기물 함량(IL: 6.3-18.5%, TOC: 7.1-63.8%, TN: 0.3-4.5%)보다 상당히 낮은 농도였다. 또한, 이전에 Kang et al. (1993)등이 제시한 우리나라 주변의 연안 표층 퇴적물 내 평균 유기물 함량(IL: 1.4-10.8%, TOC: 0.17-3.44%, TN: 0.03-0.26%)과는 유사한 농도범위를 보였으며, 특히 연구지역이 포함되어 있는 진해만에서 측정한 결과와는 비슷하였다. 그러나, 최근, Hyun et al. (2003b)이

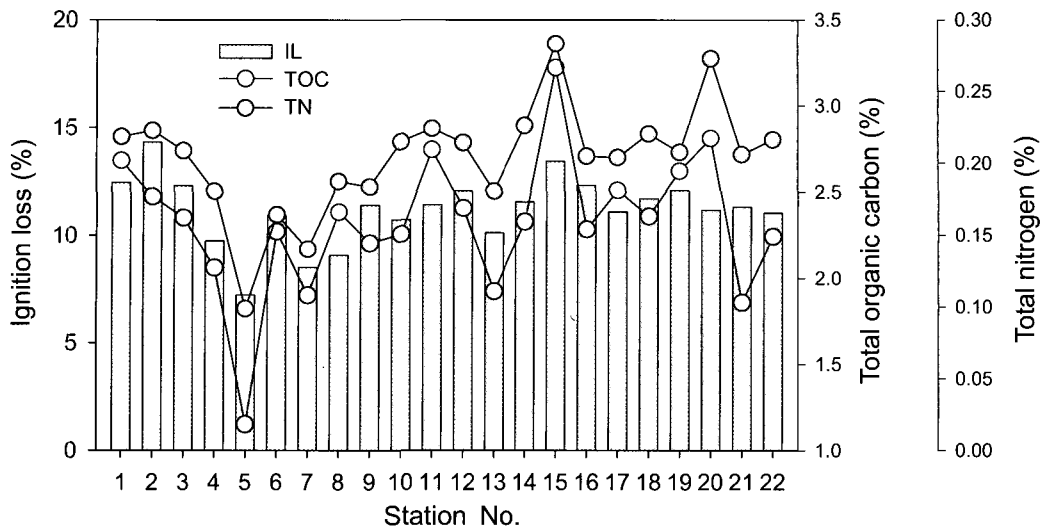


Fig. 4. The concentrations of ignition loss, total organic carbon, and total nitrogen in each station in the surface sediment of Masan Harbor.

보고한 광양만 및 여수해만 부근의 표층 퇴적물 내 유기물 함량 (TOC: 0.32-2.14%, TN: 0.02-0.83%)과는 비슷하거나 다소 높다.

COD는 11.3-29.9 mg O₂/g·dry (평균 19.6±3.9 mg O₂/g·dry) 범위였으며, IL과 마찬가지로 항내 서쪽의 St. 15에서 가장 높고, 4부두 앞쪽의 St. 5에서 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한, 항로부근의 일부 정점들(Sts. 5, 7, 10, 13, 17, 21)에서 주변의 다른 정점들에 비해 낮은 농도를 보였다(Fig. 5). 한편, 이들 값들은 남해안의 거금수도 부근의 표층 퇴적물중에서 측정된 농도인 15.5-32.8 mg O₂/g·dry (Yoon, 2000)와 부산항의 표층 퇴적물에서 조사된 결과값 5.1-43.7 mg O₂/g·dry (Park et al., 1995)와는 비슷하였다. 그러나, 이전에 하계 특량만 표층 퇴적물중에서 측정된 농도인 0.4-10.6 mg O₂/g·dry (Yoon, 2003)와 Kang et al. (1993) 등이 제시한 경기만, 아산만, 군산연안 등과 같은 서해안의 표층 퇴적물중에서 측정된 평균 COD (3.2-8.4 mg O₂/g·dry)보다는 상당히 높았다.

AVS의 농도는 0.20-4.47 mg S/g·dry (평균 1.83±1.21 mg S/g·dry) 범위로, 마산항 북쪽에 위치한 하천의 입구 쪽인 St. 1에서 가장 높고, 4부두 앞쪽의 St. 7에서 가장 낮은 농도를 나타내었다. 특히, AVS의 농도는 연구지역내에서 각정점별 화학적 산소요구량과 유사한 농도변화를 보였다(Fig. 5). 일반적으로 황화물을 생성하는 황산염 환원세균은 퇴적물 내에서 에너지원으로 COD로 표현되는 생분해성 유기물을 이용하고 있는데 화학적 산소 요구량의 농도가 10-20 mg O₂/g·dry 범위에서는 황화물의 생성이 매우 느리게 나타나지만, 20 mg O₂/g·dry 이상을 넘게 되면 매우 빠른 속도로 황화물을 생성시킨다(Yoon, 2000). 따라서, 마산항내 표층 퇴적물중 각 정점별 AVS의 농도 변화는 퇴적물 내 유기물 농도의 영향인 것으로 생각된다. 한편, 연구지역내 AVS의 농도는 남해안의 하계 특량만과 거금수도 부근의 표층 퇴적물 중에서 측정된 농도인

ND-3.30 mg S/g·dry (Yoon, 2000, 2003)와 연구지역과 비슷한 해양환경 특성을 보이는 부산항의 표층 퇴적물에서 조사된 결과값 0.06-4.37 mg S/g·dry (Park et al., 1995)와는 비슷하였다. 그러나, 광양만 및 여수해만 부근의 표층 퇴적물 중에서 측정된 농도인 0.001-0.30 mg S/g·dry (Hyun et al., 2003b)와 Kang et al. (1993)이 제시한 우리나라 주변의 연안 표층 퇴적물 내 평균 황화물 함량인 ND-1.12 mg S/g·dry 보다는 상당히 높았다.

한편, 연안해역이나 양식이 활발하게 이루어지고 있는 어장 주변 해역에서 퇴적환경의 악화나 어장의 노화 현상 등은 주로 생분해성 유기물에 의해서 이루어지기 때문에 COD와 AVS는 퇴적물의 오염을 평가하는 기준으로 널리 이용되고 있다(Yoon, 2000; Hyun et al., 2003a, 2004). 특히, AVS는 저서 생물이나 어장환경에 큰 영향을 미치기 때문에 중요한 화학적 지시자이다(Yokoyama, 2000). 따라서, 오염된 저서환경의 척도로서 생물이 정상적인 활동에 제한을 가져오거나 부영양화의 기준값으로 일본에서는 퇴적물중 COD와 AVS의 농도를 각각 20 mg O₂/g·dry와 0.20 mg S/g·dry로 제시하고 있다. 이를 기준으로 마산항 표층 퇴적물 내 유기물의 오염정도를 살펴보면, COD는 항로부근의 일부 정점들(Sts. 5, 7, 10, 13, 17, 21)을 제외한 대부분의 정점들에서 일본의 수산환경 퇴적물 기준치인 20 mg O₂/g·dry 보다 높은 농도를 나타내었다. 또한, AVS는 연구지역내 모든 정점에서 일본의 수산환경 퇴적물 기준치인 0.20 mg S/g·dry를 초과하였다. 특히, 퇴적물중 높은 황화물의 농도는 퇴적물 내 산소의 고갈 및 결핍을 의미하기 때문에 저서생태계 뿐만 아니라 저층 수질에도 나쁜 영향을 줄 가능성이 있다(Hyun et al., 2003b).

이러한 마산항 표층 퇴적물 내 유기물 오염의 기원을 알아보기 위해 TOC에 대한 TN의 비(C/N ratio)를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 연안해역에서 퇴적물 내 유기물의 주 공급원

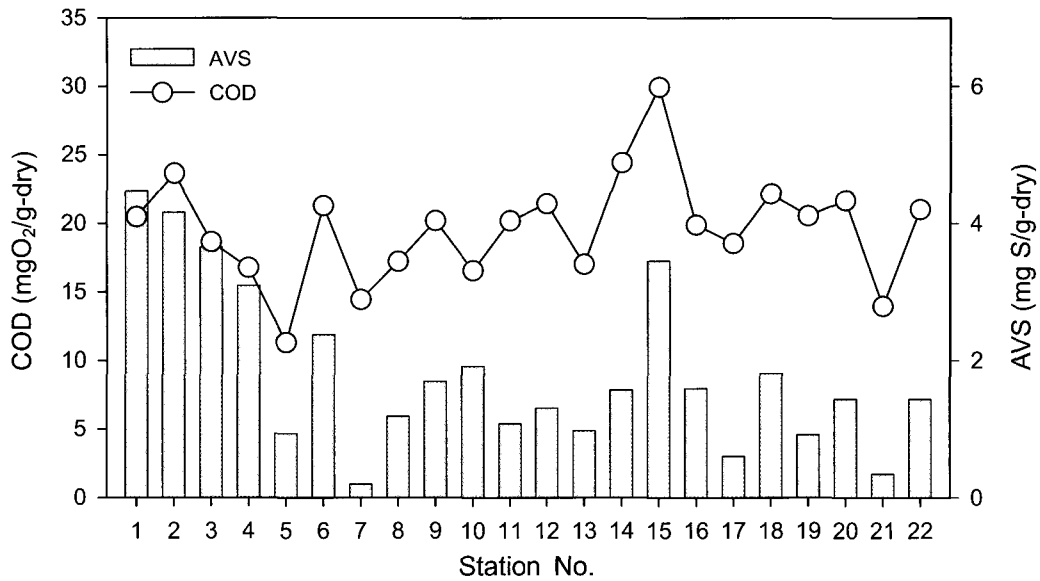


Fig. 5. The concentrations of chemical oxygen demand and acid volatile sulfide in each station in the surface sediment of Masan Harbor.

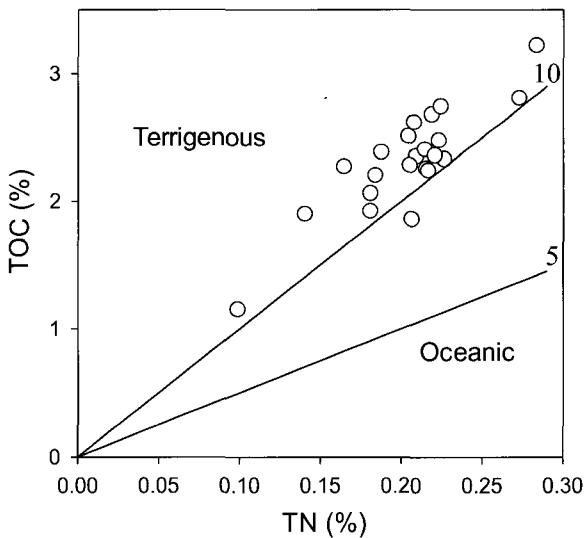


Fig. 6. Plot of TN versus TOC of the surface sediment in Masan Harbor.

으로서는 육지로부터 도시하수나 산업폐수 등의 유입과 해역 내 식물플랑크톤의 대량번식 및 폐사와 관련된 고형 유기물의 침강, 그리고 인근에 산재한 양식장으로부터 유출되는 생물기원 유기물 등이 있다(Romankevich, 1984; Lim and Hong, 1994; Choi et al., 2005). 이때 유기물 중 C/N ratio가 10 이상인 경우는 유기물이 인근 육상으로부터 도시하수나 산업폐수를 통해 유입되었음을 의미하고 이와 반대로 C/N ratio가 5-10 정도의 값을 가질 경우, 해역 자체 내 생물체에 의해 생성된 해양 기원성 유기물임을 의미한다(Muller, 1977; Stein, 1991; Hyun et al., 2003b, 2004). 이를 고려하여 마산항 표층 퇴적물 내 C/N ratio를 살펴보면, St. 21을 제외한 모든 정점에서 10 이상

(10.3-13.8)을 나타내었다. 따라서 연구지역내 표층 퇴적물의 유기물질은 인근 육상으로부터 도시하수나 산업폐수를 통해 유입된 것으로 판단된다.

표층 퇴적물의 금속원소 함량 및 분포 특성

마산항내 표층 퇴적물 중 금속원소의 농도와 분포특성을 알아보기 위하여 각 정점별로 원소의 농도를 Fig. 7에 나타내었다. 퇴적물 내 Al의 농도는 4.79-6.96% (6.36±0.52%)의 범위로, 항내 북서쪽(St. 8)과 항로주변의 일부 정점들(Sts. 5, St. 9, St. 13)을 제외하면 대부분 6% 이상의 농도를 보여 지역적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 Al은 지각물질 중에 높은 농도로 존재하는 원소들 중에 하나로 암석의 풍화나 풍화된 퇴적물들이 운반되는 도중에 농도변화가 매우 낮고, 액체상태보다는 고체상태로 운반되는 것으로 보고된 바 있다(Martin and Meybeck, 1979). Fe와 Mn의 농도는 각각 3.61-5.21% (4.53±0.37%)와 503-978 mg/kg (716±17 mg/kg)의 범위로 항내 북서쪽의 일부 정점들(Sts. 6, 8, 11, 15)에서 낮고, 항내 동쪽의 항로 주변해역에서 다소 높은 농도를 나타내었다. 이 중 일반적으로 점토광물과 각섬석을 비롯한 유색광물 계열에서 그 함량이 높은 Mn은 해양 퇴적물 내에서는 탄산칼슘에 의해서 조절되며, 주로 MnCO₃ 형태로 흡착된다(Jung et al., 1996; Fang and Hong, 1999).

Zn과 Pb, Cu, Cd, Hg의 농도는 각각 131-492 mg/kg (321±92 mg/kg), 38-108 mg/kg (74±18 mg/kg), 28-115 mg/kg (73±22 mg/kg), 0.17-2.36 mg/kg (1.37±0.57 mg/kg), 0.03-0.32 mg/kg (0.14±0.07 mg/kg)의 범위로 마산항 북쪽에 위치한 하천의 입구 쪽 정점들(Sts. 1-3)과 저도 서쪽의 일부정점들(Sts. 15, 20)에서 높은 농도를 나타내었으며, 항내 동쪽의 항로 주변해역에서 다소 낮은 농도를 나타내었다. 이들 원소 중 Cu와

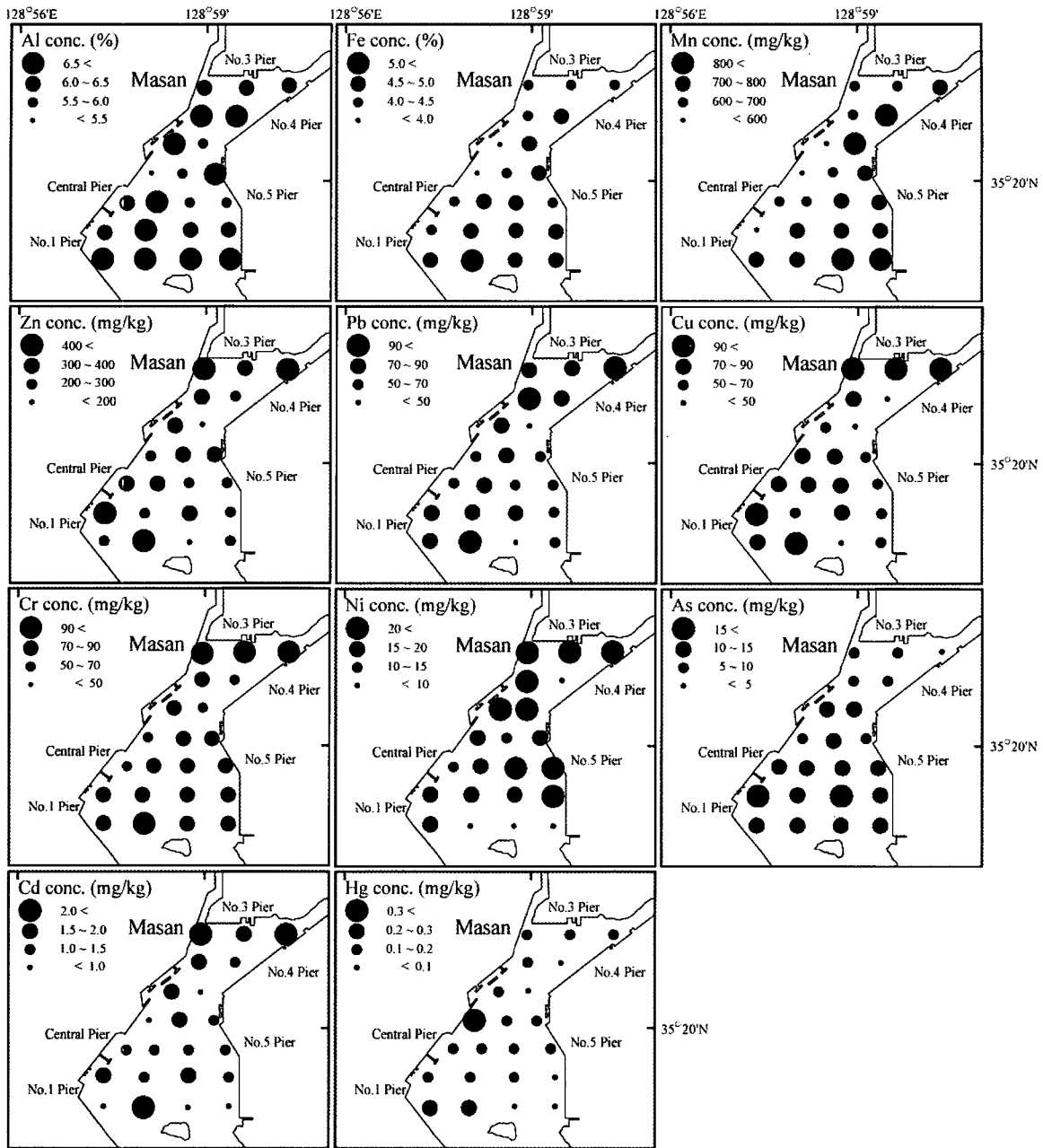


Fig. 7. Horizontal distributions of metallic elements for Al, Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Cu, Ni, As, Cd, and Hg in the surface sediment of Masan Harbor.

Pb, Zn은 퇴적물 내에서 Fe-Mn-Oxyhydroxide 및 유기탄소의 함량에 의해 그 농도가 조절되는 것으로 알려져 있다(Balkis and Cagatay, 2001).

일반적으로 Ni와 Cr은 Fe과 유사한 거동을 보이는 원소들로서 비슷한 지구화학적 특성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Youn et al., 1999). Cr과 Ni의 농도는 각각 $56-109 \text{ mg/kg}$ ($79 \pm 17 \text{ mg/kg}$)와 $0.1-26.3 \text{ mg/kg}$ ($16.7 \pm 7.9 \text{ mg/kg}$)의 범위로, 항내 북쪽의 하천의 입구 쪽 정점들(Sts. 1-3)에서 가장 높고 항내 남쪽해역으로 갈수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

그러나, As의 농도는 $4.6-16.4 \text{ mg/kg}$ ($10.5 \pm 3.6 \text{ mg/kg}$)의 범위로 다른 미량금속원소들과 달리 하천의 입구 쪽에서 낮고 항내 남쪽으로 갈수록 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 이 연구에서 마산항 표층 퇴적물 중 금속원소의 평균 농도는 이전에 마산만 주변 해양 퇴적물중에 측정된 금속원소농도(Lee and Lee, 1983; Kang and Lee, 1996; Jin et al., 2000)보다 대체로 낮거나 비슷하였다. 이는 1990-1994년도에 마산항내 오염퇴적물의 정화를 위해 이루어진 대규모의 준설의 결과로 퇴적물중 금속원소의 농도가 다소 낮아진 것으로 판단된다.

하지만 기존에 연구되었던 영일만과 광양만, 새만금, 시화호 등의 다른 해역에서 측정된 금속원소들의 평균 농도보다는 비슷하거나 다소 높은 결과를 나타내었다(Table 1).

일반적으로, 연안해역의 퇴적물 중 금속원소의 농도는 주로 퇴적물의 물리적인 인자인 Mz와 쇄설성 광물질의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있으나(Cho and Park, 1998; Cho et al. 1994; Choi et al., 1999), 환경에 따라서는 자생광물 혹은 생물기원물질, 그리고 인위적인 요인에 의해서도 큰 영향을 받을 수 있다(Cho et al., 2001). 이중 생물기원 물질, 특히 유기물은 세립질 퇴적물과 친화력이 커서 Mz가 세립함에 따라 그 농도가 증가하는 경향을 나타내고, 또한 표면적이 넓어 금속원소의 흡착능력이 매우 뛰어난 것으로 알려져 있다(Horowitz, 1991). 마산항내 표층 퇴적물 내 금속원소의 농도분포를 조절하는 요인을 알아보기 위하여 금속원소들과 평균 Mz와의 관계를 살펴본 결과, 금속원소의 농도는 Mz와 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으며($R^2 < 0.16$), 이는 연구지역내 퇴적물의 Mz 변화가 작다는 사실을 고려할 때 Mz 이외의 다른 요인이 금속원소의 함량에 중요하게 작용하고 있음을 시사한다.

이에 따라, 연구지역내 퇴적물중 금속원소에 대한 유기물의 영향을 살펴보기 위해 유기물과 친화력이 큰 금속원소들(Cu, Zn, Cd)과 TOC와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 퇴적물중 이들 금속원소의 축적은 퇴적물 내 이루어지는 초기 속성(early diagenesis) 작용 중 황화물 형성에 의해 이루어지며(Jung et al., 1996; Choi et al., 1999), 이러한 황화물의 형성은 앞서 설명하였듯이 퇴적물 내 유기물의 함량과 밀접한 관련이 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 연구지역의 퇴적물 내 Cu, Zn, Cd는 TOC와 뚜렷한 양의 상관관계를 보였으며, 이는 이들 원소들의 유기물의 영향을 크게 받고 있음을 의미한다. 특히, 이들 원소 외에 Hg 또한 TOC와 뚜렷한 양의 상관관계를 나타내어 유기물의 영향을 받는 것으로 보인다. 그 외의 금속원소들은 약한 상관관계($r < 0.40$)를 나타내어 퇴적물의 Mz 및 유기물과 관련성이 없는 금속원소들은 퇴적물에 내재되지 않은 외부요인에 영향을 반영한다. 따라서, 마산항 표층 퇴적물 내 금속원소의 농도는 생물기원물질에 의한 퇴적환경의 차이이거나 혹은 항로유지를 위한 준설과 같은 인위적인 요인들에 의해 조절되는 것으로 생각된다.

표층 퇴적물 내 금속원소의 오염평가

퇴적물 내 금속원소는 급격한 환경변화를 보이는 연안해역에서 해수의 생지화학적 조건변화를 반영하고, 해수와 달리 오염의 기록을 장기간 보존하는 특성을 가지고 있어서 그 지역의 금속에 대한 오염의 지표로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 오염물질의 유입과정과 오염 역사를 추적하는 단서로 사용된다(Choi et al., 1999; Lee et al., 2004). 이러한 퇴적물 내 금속원소의 오염평가는 주로 분석된 금속원소의 농도를 오염되지 않은 지역에서의 자연적인 농도와 비교하는 방법이 주로 이용되며, 그 방법으로는 Enrichment Factor (EF), Geoaccumulation index (Igeo), Concentration enrichment ratio, Metal pollution index 등 다양한 방법이 있다. 이 연구에서는 퇴적물 내 금속원소의 오염의 정도를 파악하기 위해 EF와 Igeo를 이용하였다. 먼저, EF란 측정된 퇴적물중 Al에 대한 각 금속원소의 농도비 $[(Me/Al)_{observed}]$ 를 지각물질 중 Al에 대한 각 금속원소의 평균농도비 $[(Me/Al)_{crust}]$ 로 나누어 준 값을 말하며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다(Eq. 1).

$$Enrichment\ Factor\ (EF) = \frac{(Me/Al)_{observed}}{(Me/Al)_{crust}} \quad (1)$$

이 연구에서는 지각 물질 중 Al에 대한 각 금속원소의 평균 농도비는 전 세계 연안대륙붕지역의 퇴적물중 각원소의 평균 농도(Taylor and McLennan, 1995)를 이용하였다. 위의 식에서 EF값이 1에 가까울수록 오염이 되지 않은 자연적인 농도임을 의미하고, 1 보다 클 경우에는 대기나 하천 등을 통해 각 원소의 순 유입(net gain)이 있고 퇴적물 내에 상당히 농축되어 있음을 의미한다. 마산만 표층 퇴적물 중 각 정점별 원소의 평균 EF 값을 Table 2에 나타내었다. 연구지역내 퇴적물중 Ni는 EF값이 거의 1에 가까운 값(1.14)을 나타내어 지각중의 Ni가 퇴적물 내에 그대로 보존되어 있는 것으로 나타났다. 그러나, Ni를 제외한 모든 금속원소들은 EF 값은 1보다 큰 값(1.5-17.7)을 보여 대기과 하천을 통한 공급이 있었음을 알 수 있다. 특히, Fe와 Mn을 제외한 대부분의 금속원소들은 지각내 평균값보다 약 3배 이상 높고, 특히 Cd의 경우에는 최고 약 18배까지 농축되어 있는 것으로 나타났다.

EF와 함께 연구지역의 표층 퇴적물중 금속원소의 오염을

Table 1. The average concentration of metallic elements in coastal surface sediment around Korea

Region	Mz (Φ)	Metals (%)		Metals (mg/kg)									Reference
		Al	Fe	Mn	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni	As	Cd	Hg	
Youngil Bay	3.8	6.0	2.4	-	202	36	29	49	-	-	1.5	-	Lee et al. (2005)
Gwangyang Bay	7.1	6.2	3.3	812	86	28	51	18	24	-	0.2	-	Hyun et al. (2003)
Saemangeum	4.4	6.6	2.7	535	43	24	49	12	21	-	-	-	Cho et al. (2001)
Shihwa	7.9	7.3	3.6	504	272	54	142	210	49	-	1.7	-	Choi et al. (1999)
Hampyong Bay	-	6.1	2.2	321	45	20	34	12	15	-	-	-	Youn et al. (1999)
Southwest Coast	-	-	2.8	480	86	33	67	19	37	-	-	-	Jeon and Cho (2002)
Jinhae Bay	-	-	3.6	386	128	37	59	30	27	-	-	-	Lee and Lee (1983)
South Sea	5.2	5.1	2.5	409	62	27	53	11	26	-	-	-	Cho et al. (1994)
Masan Harbor	7.2	6.4	4.5	716	321	74	79	73	17	11	1.4	0.14	This Study

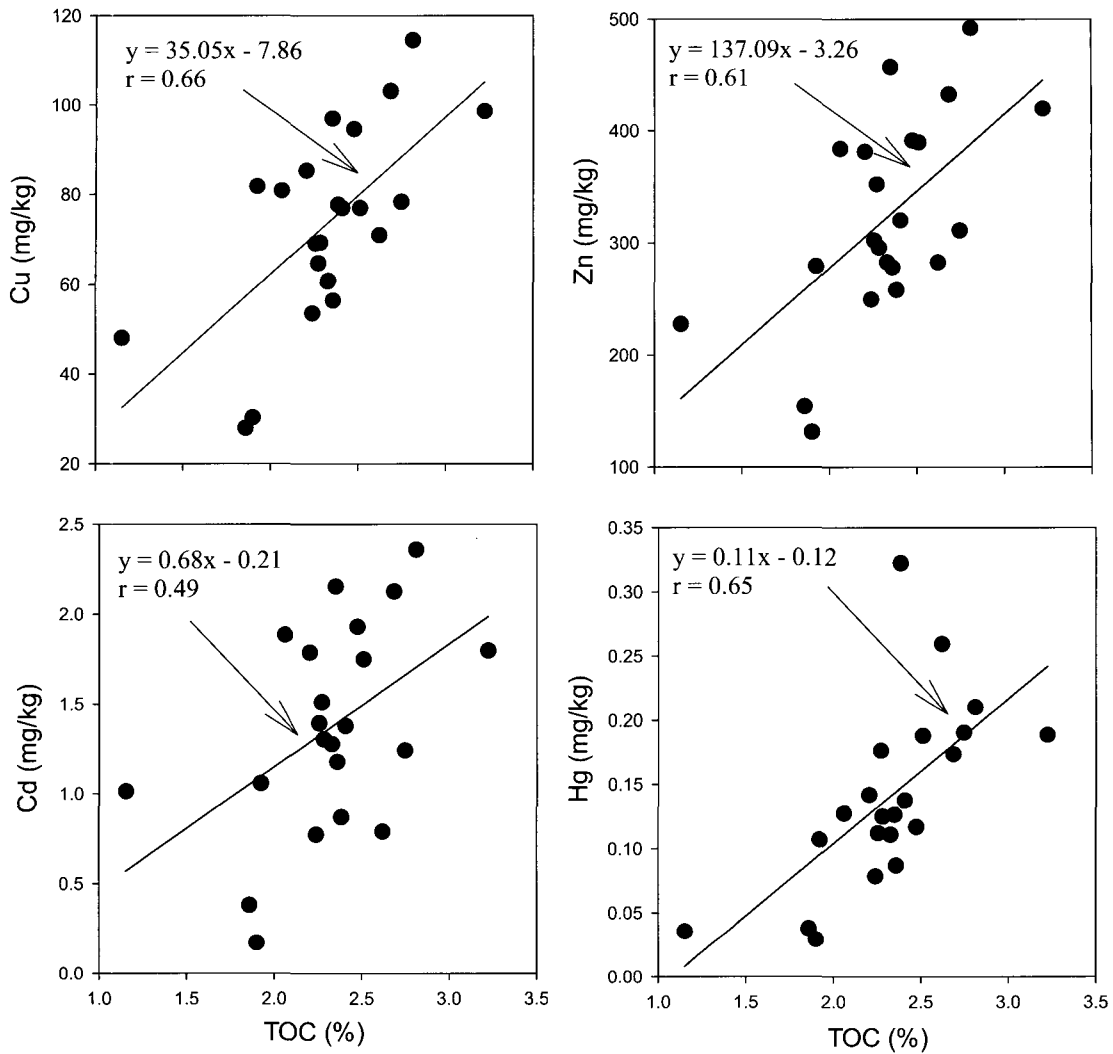


Fig. 8. Plots of TOC versus Cu, Zn, Cd, and Hg in the surface sediment of Masan Harbor.

Table 2. Ratios of metallic elements to Al in the surface sediment of Masan Harbor and in earth crust with the Taylor and McLennan (1995)

	Metal / Al		Metals / Al × 1000						Metals / Al × 10000	
	Fe / Al	Mn / Al	Zn / Al	Pb / Al	Cu / Al	Cr / Al	Ni / Al	As / Al	Cd / Al	Hg / Al
Masan Harbor	0.71	11.31	5.07	1.16	1.17	1.25	0.28	0.16	0.216	0.023
Earth's crust	0.44	7.46	0.88	0.25	0.31	0.44	0.25	0.02	0.012	0.010
EF*	1.64	1.52	5.75	4.67	3.75	2.88	1.13	8.81	17.701	2.269

*EF: Enrichment Factor.

정량적으로 평가하기 위해 연구지역의 지질특성을 반영하여 오염을 평가할 수 있는 Igeo를 계산하였다. Igeo란 Müller (1979)에 의해 제시된 것으로 퇴적물에 함유된 금속원소의 농도를 오염되지 않은 금속원소의 농도와 비교하여 정량하는 방법이다(Hyun et al., 2003b). 특히, Igeo는 EF와 달리 연구지역내 주어진 시스템내에서 금속원소의 상대적인 농축정도를 반영할 뿐만 아니라 농축정도를 등급화 하여 오염정도를 더욱 세분화하여 평가할 수 있기 때문에 연안 퇴적물의 오염정도를

평가하기 위해 최근에 널리 이용되고 있는 방법이며 다음과 같은 식을 이용하여 계산된다.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5} \quad (2)$$

또한, 일반적으로 퇴적물 내 금속원소의 농도는 입자의 크기가 세립할수록 높아지기 때문에 그 지역의 Mz를 고려하여 오염지수를 평가하기 위해서는 다음과 같은 수정된 식을 이용하기도 한다(Lee et al., 2004).

Table 3. Classification of geoaccumulation index (Muller, 1979) and the number of each Igeo-class for the concentrations of ten metallic elements in the surface sediment of Masan Harbor

Igeo	Igeo Class	Designation of sediment quality	Igeo									
			Fe	Mn	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg
>5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	5	Strongly/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	0	3	0	0	0	0	14	5	0
1-2	2	Moderately polluted	0	0	17	17	12	1	0	8	1	2
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	0	1	2	5	8	21	0	0	1	11
0	0	Practically unpolluted	22	21	0	0	2	0	22	0	0	9

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{B_n \times 1.5 \times M_z} \quad (3)$$

여기서, C_n 은 분석된 금속원소의 농도를, B_n은 금속원소의 바탕(background or reference)값을, 그리고 M_z는 연구지역의 M_z와 바탕지역의 M_z의 비를 나타낸다. 일반적으로 금속원소의 바탕값은 세일이나 지각물질의 평균농도를 사용하며 (Martin and Whitefield, 1983; Jeon and Cho, 2002), 때로는 해당 연구지역에서 오염원의 영향을 가장 적게 받는 지역의 농도값 혹은 가장 낮은 농도의 값을 사용하는 경우도 있다 (Sahu and Bhosale, 1991; Hyun et al., 2003b). 따라서, 이 연구에서는 EF에서와 마찬가지로 전 세계 연안대륙붕지역의 퇴적물 중 각원소의 평균농도(Taylor and McLennan, 1995)를 바탕값으로 사용하였으며, 연구지역내 M_z의 변화가 적고 M_z의 영향을 없애기 위해 각 정점별로 63 μm 이하의 퇴적물 입자를 분리하여 금속원소의 농도를 분석하였기에 방정식 (2)식을 이용하여 오염지수를 산정하였다.

위의 식 (2)에서, Igeo값은 그 값에 따라 7등급으로 구분되며(Jeon and Cho, 2002; Hyun et al., 2003b; Lee et al., 2004), 이를 Table 3에 표시하였다. 이 연구에서는 EF에서 살펴본 총 10개의 원소에 대하여 각각 Igeo를 계산하였다. Fe, Mn, Ni는 Igeo class가 0으로 연구지역인 마산항이 오염되지 않은 수준(Practically unpolluted)인 것으로 나타났다. 또한, Cr과 Hg은 대부분 Igeo class가 0과 1에 집중되어 있어 약간 오염되었거나 오염되지 않은 수준 (Practically unpolluted/ moderately polluted)인 것으로 나타났다. 그러나, Zn, Pb, Cu의 경우 대부분 Igeo class가 2에 집중되어 약간 오염된 수준 (Moderately polluted)으로 나타났으며 특히, As와 Cd의 경우 대부분 Igeo class가 각각 3 (Moderately/strongly polluted)과 4 (Strongly polluted)에 집중되었고, 이러한 점은 연구지역내에서 As와 Cd가 다른 금속원소에 비해 심하게 오염되어 있는 것으로 나타났다. 또한, 대부분의 원소들에 있어서 높은 Igeo 값을 나타낸 지역은 마산항내 북쪽의 하천 입구 쪽(Sts. 1-3)과 항내 중앙부의 저도 서쪽의 부근(St. 20)이었으며 낮은 Igeo값을 나타낸 지역은 대부분 항내 동쪽의 항로 부근(St. 7, St. 10 그리고 St. 21)이었다

결론적으로 마산항 표층 퇴적물은 Silt와 Clay의 함량에 비해 Sand의 함량이 매우 낮고, M_z는 Silt 퇴적물의 M_z인 5.6-7.8

범위였다. 퇴적물중 WC는 43-73% 범위로서, 항로부근의 일부정점을 제외하면 60% 이상의 높은 WC를 보였다. IL과 TOC 및 TN의 함량은 각각 7.2-14.3%, 1.2-3.2%, 0.10-0.28% 범위였으며, 유기물의 C/N 비는 대부분 10 이상이었다. 이는 연구지역내 표층 퇴적물의 유기물이 인근 육상으로부터 기원한 것임을 의미한다. 퇴적물 내 COD와 AVS는 각각 11.3-29.9 mg O₂/g·dry와 0.20-4.47 mg S/g·dry 범위였으며, 대체로 항로 주변해역에서 다소 낮은 농도를 보였다. 퇴적물중 금속원소의 농도는 큰 공간적 변화를 보였으며, 대체로 항로주변해역에서 다소 낮고 유기물 함량이 높은 곳에서 비교적 높은 농도를 보였다. 이는 마산항 표층 퇴적물 내 유기물과 금속원소의 농도분포가 주로 생물기원 물질이나 인위적인 요인에 의해서 조절됨을 의미한다. 한편, 퇴적물중 금속원소의 오염을 정량적으로 평가하기 위해 농축계수와 농집지수를 조사한 결과, Fe와 Ni, Mn을 제외한 모든 금속원소들이 지각내 평균 농도보다 3-18배 정도 농축되어 있고, 연구지역내에서 비교적 오염되어 있거나 심하게 오염되어 있는 것으로 나타났다. 따라서, 마산항내 오염퇴적물에 대한 보다 체계적인 관리가 필요하며, 이를 위해서는 유기물과 금속원소들의 오염경로 및 오염수준을 파악하기 위한 지속적인 모니터링과 퇴적물 내에서 거동과 축적에 대한 보다 근본적인 요인에 대한 연구가 요구된다.

사 사

이 연구는 국립수산과학원(해양오염퇴적물 조사 정화·복원체계 구축, RP-06-ME-007)의 지원에 의해 운영되었습니다.

참 고 문 헌

Balkis, N. and M.N. Cagatay. 2001. Factors controlling metal distributions in the surface sediments of the Erdek Bay, Sea of Marmara., Turkey. Environ. Int., 27,1-13.

Cho, K.J., M.Y. Choi, S.K. Kwak, S.H. Im, D.Y. Kim, J.G. Park and Y.E. Kim. 1998. Eutrophication and seasonal variation of water quality in Masan-Jinhae Bay. J. Kor. Soc. Oceanogr., 3, 193-202.

Cho, Y.G. and K.Y. Park. 1998. Heavy metals in surface sediments of the Youngsan Estuary, west coast of

- Korea. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 7, 549-557.
- Cho, Y.G., C.B. Lee and M.S. Choi. 1994. Characteristics of heavy metal distribution in surface sediments from the South Sea of Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 29, 338-356.
- Cho, Y.G., S.O. Ryu, Y.K. Khu and J.Y. Kim. 2001. Geochemical composition of surface sediments from the Saemangeum tidal flat, west coast of Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 6, 27-34.
- Choi, M.G., H.B. Moon, S.S. Kim and J.S. Park. 2005. Evaluation of sewage pollution by coprostanol in the sediments from Jinhae Bay, Korea. *J. Kor. Fish. Soc.*, 38, 118-128.
- Choi, M.S., J.H. Chun, H.J. Woo and H.I. Yi. 1999. Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 8, 593-600.
- Fang, T.H. and E. Hong. 1999. Mechanisms influencing the spatial distribution of trace metals in surface sediments off the south-western Taiwan. *Mar. Pollut. Bull.*, 38, 1026-1037.
- Folk, R.L. 1968. Petrology of Sedimentary Rock, Hemphill's, 1-170.
- Hong, J.S. and J.H. Lee. 1983. Effects of the pollution on the benthic macrofauna in Masan Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18, 169-179.
- Hong, J.S. 1987. Summer oxygen deficiency and benthic biomass in the Chinhae Bay system. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18, 169-179.
- Horowitz, A.J. 1991. A Primer on Sediment-trace Element Chemistry. Lewis Publishers, 1-136.
- Hyun, S., J.W. Choi, J.S. Choi and T. Lee. 2003a. Surface sediment characteristics and benthic environments in the mouth of Jinhae Bay, Korea. *J. Kor. Fish. Soc.*, 36, 700-707.
- Hyun, S., T. Lee, J.S. Choi, D.L. Choi and H.J. Woo. 2003b. Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 8, 380-391.
- Hyun, S., W.H. Paeng and T. Lee. 2004. Characteristics of surficial sediment and benthic environments based on geochemical data in Gwangyang Bay, Korea. *Kor. J. Environ. Biol.*, 22, 93-102.
- Jeon, S.G. and Y.G. Cho. 2002. Some heavy metal concentration of surface sediments from the south-western coast of Korea. *J. Environ. Sci.*, 11, 1299-1305.
- Jin, Y.H., K.T. Kim, C.S. Chung, S.H. Kim. D.B. Yang, G.H. Hong and K.W. Lee. 2000. Behavior of trace metals in Masan Bay, Korea during oxygen deficient period. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, 3, 56-64.
- Jung, H.S., C.B. Lee, Y.G. Cho and J.K. Kang. 1996. A mechanism for the enrichment of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Banweol intertidal flat, Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, 32, 782-787.
- Kang, C.K., P.Y. Lee, J.S. Park and P.J. Kim. 1993. On the distribution of organic matter in the nearshore surface sediment of Korea. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 26, 557-566.
- Kang, H.S. and K.W. Lee. 1996. Trace metal concentrations and sedimentation rates of Kwangyang, Masan and Ulsan Bay sediments. *J. Kor. Soc. Water Qual.*, 12, 455-461.
- Kim, J.H., S.D. Chang and S.K. Kim. 1986. Variability of current velocities in Masan Inlet. *J. Kor. Fish. Soc.*, 19, 274-280.
- Lee, D.I. and C.K. Park. 2003. The ecological modeling for estimation of total allowable pollutant loading capacity in Masan Bay. *J. Kor. Soc. Water Qual.*, 19, 575-583.
- Lee, M.K., W. Bae, I.K. Um and H.S. Jung. 2004. Characteristics of heavy metal distribution in sediments of Youngil Bay, Korea. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 26, 543-551.
- Lee, S.H. and K.W. Lee. 1983. Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea.*, 18, 49-54.
- Lim, H.S. and J.S. Hong. 1994. Ecology of the macrozoobenthos in Chinhae Bay, Korea. 1. Benthic environment. *J. Kor. Fish. Soc.*, 27, 200-214.
- Macdonald, R.W., D.M. Macdonald, M.C. O'Brien and C. Gobeil. 1991. Accumulation of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd), carbon and nitrogen in sediments from Strait of Georgia, B.C. Canada. *Mar. Chem.*, 34, 109-135.
- Martin, J.M. and M. Whitfield. 1983. The significance of river input of chemical elements to the ocean. In: Trace Metals in Sea Water. Wang C.S., E. Boyle, J.D. Burton and E.D. Goldberg, eds. Plenum, New York, 265-298.
- Martin, J.M. and M. Meybeck. 1979. Elemental mass balance of material carried by minor world rivers. *Mar. Chem.*, 7, 173-206.
- MOMAF (Ministry of Maritime Affairs & Fisheries). 2002. Development of intergrated Environmental management system for the coastal area of Korea (I), 1-658.
- Müller, G. 1979. Schwernmetalle in den sedimenten des

- Rheins-Verderyngen Seit. Umschau. 24, 778-783.
- Muller, P.J. 1977. C/N ratio in Pacific deep sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochim. Cosmochim Acta*, 41, 765-776.
- Park, Y.C., H.S. Yang, P.Y. Lee and P.J. Kim. 1995. Environmental characteristics of the seawater and surface sediment in the vicinity of Pusan Harbor area in winter. *J. Kor. Fish. Soc.*, 28, 577-588.
- Presley, B.J., R.J. Taylor and P.N. Boothe. 1992. Trace metal concentration sediments of the eastern Mississippi Bight. *Mar. Environ. Res.*, 33, 267-282.
- Romankevich, E.A. 1984. *Geochemistry of Organic Matter in the Ocean*. Springer Verlag, Berlin Germany, 111-150.
- Sahu, K.C. and U. Bhosale. 1991. Heavy metal pollution around the island city of Bombay, India. Part I: quantification of heavy metal pollution of aquatic sediments and recognition of environmental discriminants, *Chem. Geol.*, 91, 263-283.
- Stein, R. 1991. *Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments*. Springer Verlag, Berlin, 1-217.
- Taylor, S.R. and S.M. McLennan. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33, 241-265.
- Woo, H.J., H.Y. Kim and K.S. Jeong. 1999. Response of benthic foraminifera to sedimentary pollution in Masan Bay, Korea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 4, 144-154.
- Woo, H.J., J.H. Cho, K.S. Jeong, C.S. Chung, S.J. Kwon and S.M. Park. 2003. Pollution history of the Masan Bay, southeast Korea, from heavy metals and foraminifera in the subsurface sediments. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 24, 635-649.
- Yokoyama, H. 2000. Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal area-a new policy and its potential problems. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult.*, 29, 123-134.
- Yoon, Y.H. 2000. A study on the distributional characteristic of organic matters on the surface sediments and its origin in Keogeumsudo, southern part of Korean Peninsula. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 9, 137-144.
- Yoon, Y.H. 2003. Spatio-temporal distribution of organic matters in surface sediments and its origin in Deukryang Bay, Korea. *J. Environ. Sci.*, 12, 735-744.
- Youn, S.T., Y.K. Koh and S.O. Ryu. 1999. Distribution characteristics of surface sediments and metal elements in Hampyong Bay, the southwestern coast of Korea. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 8, 677-684.

2006년 2월 7일 접수
2006년 4월 28일 수리