

인천주요갯벌의 환경특성 조사



차 례

I. 연구개요	1
II. 조사정점 및 분석방법	3
1. 조사지점	3
2. 시료채취	4
3. 조사항목 및 실험방법	4
III. 결과	8
1. 표층퇴적물	8
2. 주상퇴적물	23
IV. 고찰	26
1. 오염지표간의 상관관계	26
2. 연안지역 오염도와의 관계	28
3. 외국갯벌과의 오염도 비교	31
4. 농집지수를 통한 중금속 오염도 평가	34
5. 갯벌 퇴적물 오염등급	37
V. 결론	43
VI. 참고문헌	46

인천주요갯벌의 환경특성 조사

- 인천연안 갯벌 오염도 현황 파악
- 대규모 개발·간척사업으로 인한 변화 전·후 상황파악을 위한 기초자료 제공
- 갯벌의 보전·이용 및 효과적인 관리를 위한 갯벌 정보체계 구축에 관한 기초연구

I. 연구개요

갯벌이란 '갯가의 넓고 평평하게 생긴 땅'으로 염습지 식생과 함께 해안습지의 일부분이다. 이 지역은 만조 때에는 물 속에 잠기나 간조 때에는 공기 중에 노출되며 조류(潮流)로 운반되는 미사(silt)나 점토(clay) 등으로 이루어진 퇴적물질이 해안에 오랫동안 쌓여 평탄한 지형을 이루어 형성된다.¹⁾

우리나라의 갯벌면적은 2,800km²로 전 국토면적의 약 3%에 해당하며 그 중에서 인천연안의 갯벌면적은 약 745km²로 우리나라 전체의 27%에 해당한다. 갯벌을 비롯한 퇴적물은 진흙, 미사, 모래, 유기물질 및 광물질 등의 혼합물로서 그 형성특성상 다른 환경시료들보다 더 오랜 시간을 대표하는 중·장기적인 오염의 양상을 기록하게 되며 또한 오염물질의 농축고로서 보다 확연한 오염정보를 제시할 수 있다는 점에서 오염평가에 있어 유용한 연구대상이 될 수 있다.

갯벌은 주변지형에 따라 퇴적학적, 수리학적 작용이 서로 다르게 작용하면서 갯벌의 자연적인 생태계를 유지하며 생물의 서식지, 오염정화 등 고유의 기능을 유지하고 있다. 그러나 최근 인간의 사회·경제적 활동에 따라 간척사업에 의하여 앞으로 연안 갯벌의 약 40% 이상이 사라졌거나 사라질

전망이다.²⁾

서해안은 조차가 크고 넓은 대륙붕이 발달하여 연안에 갯벌이 잘 발달되어 있다. 그 중에서도 인천연안 갯벌은 복잡한 리아스식 해안과 반폐쇄성 해역으로 조석은 전형적인 반일주조로 최대조차가 약 10m, 평균 7m이상으로 낮은 수심, 그리고 한강으로부터 유입되는 다량의 토사 등 제반조건에 의해 우리나라에서도 가장 갯벌이 잘 발달한 지역이며 캐나다 동해안, 미국 동해안, 북해연안, 아마존 하구 등지와 함께 세계 5대 갯벌의 하나로 알려져 있다.¹⁾

갯벌은 일반적으로 퇴적물의 구성에 따라 모래갯벌, 펄갯벌 및 혼성갯벌로 구분되고, 또한 생성위치에 따라 해변 갯벌과 하구역 갯벌로 구분되며 이러한 갯벌들의 물리·퇴적학적 환경차이가 갯벌 생태계 내에서의 물질순환 및 거동 등에 큰 영향을 미치게 된다.

본 연구는 인천 주요 갯벌에 대한 물리·화학적 조사를 수행하였고 이 결과를 바탕으로 향후 인천연안의 오염에 대한 감시 및 비교 평가 자료로서 유용하게 제공되어지고 갯벌보호지역 지정 등 효율적인 갯벌관리방안을 수립하는데 있어 기초자료로 활용되어 연안 환경보전에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

Ⅱ. 조사정점 및 분석방법

1. 조사지점

인천 주요갯벌의 환경특성을 파악하기 위하여 2008년 5~6월에 총 47개 정점에서 표층퇴적물을 채취하였고 47개 정점 중 9개의 대표지점을 선정하여 주상퇴적물을 별도로 채취하여 분석하였다. 조사정점은 Fig. 1에 표시한 바와 같고 지리적으로 강화도, 영종도, 영흥도를 포함하였으며 강화도의 경우 다시 장화리, 동막, 황산도 3지역으로 구분하여 조사를 실시하였다.



[Fig. 1] 인천 주요 갯벌 조사지점

2. 시료채취

강화도 남단은 장화리, 동막, 황산도의 3개 지역으로 나누어 각 지역별로 10개 지점에서 시료를 채취하였고, 영흥도 남단에서 10개 지점 그리고 영종도 남단에서 7개 지점을 정하여 총 47개의 정점에서 시료를 채취하였다. 표층퇴적물의 경우 전 정점에서 채취되었으며 47개 정점 중 대표 정점 9개를 선정하여 주상퇴적물을 채취하였다.

각 정점별로 약 300m 간격으로 육지에서 바다를 향해 걸어 들어가며 채취하였다. 표층퇴적물은 지점별로 가능한 한 표층 약 2cm이내의 퇴적물을 약 100g 정도씩 플라스틱 봉지에 담고 주상퇴적물은 직경 7cm의 PVC 재질의 Push core로 약 50cm 깊이의 퇴적물을 채취하였다. 각각의 시료는 Portable GPS를 이용하여 각각의 정점을 기록한 후 실험실로 운반하였다.

3. 조사항목 및 실험방법

3-1. 입도

일반적으로 입자크기는 입자가 통과할 수 있는 가장 작은 체의 눈금으로 표시하거나, 입자의 침강속도와 같은 침강속도를 가지는 구의 지름, 혹은 입자의 장축으로 나타낼 수 있다. 이러한 입도를 측정할 수 있는 방법에는 체거름법, 전기저항법, 침강법, 레이저산란법 등이 있다. 본 연구에서는 레이저산란법을 적용한 Microstrac 사의 X-100 장비(Fig. 2)를 이용하여 측정하였고, 장비의 측정범위는 0.04~700 μ m 이다.



[Fig. 2] 입도분석장비

3-2. 함수율

퇴적물의 입도와 고화정도를 잘 나타내주는 함수율을 구하기 위해 습시료 약 20~30g을 취하였다. 이를 미리 무게를 측정한 도가니에 담아 전기정온건조기를 이용하여 110℃에서 24시간동안 건조시키고 12시간을 추가로 건조시킨 뒤 항량을 유지한 후 그 무게를 재어 건조 전과의 무게차이를 구하여 건조 전의 원 시료 무게에 대해 백분율(%)로 나타내었다.

3-3. 강열감량

강열감량은 퇴적물을 고온으로 가열한 후 그 무게차이를 통해 퇴적물 중 유기물량을 측정하는 방법으로 유기물질 중 가장 많은 양을 차지하며 비교적 그 측정이 간편한 탄소를 이용하는 것이 간편하면서도 정밀한 값을 얻을 수 있다. 습시료 약 100g을 완전히 건조시킨 후 건조된 시료를 막자사발을 사용하여 곱게 분마한다. 이 때 분마된 시료는 230 메쉬(0.063mm) 크기의 체를 모두 통과하여야 한다. 전처리된 시료 약 50g을 취해 전기로를 이용하여 550℃의 온도로 2시간동안 강열한 후 그 무게 차이를 백분율로 나타내었다.

3-4. 산화발성황화물(AVS)

해저 퇴적물내 산 휘발성 황화물이 높다는 것은 퇴적물 내 산소의 고갈 및 결핍을 의미하며, 이는 저층수질 및 저서 생태계에 나쁜 영향을 줄 뿐 아니라 환경을 평가하는데 있어서 중요한 의미를 가진다. 산 휘발성 황화물의 정량은 적당량의 산을 가하여 퇴적물내의 황화물을 황화수소 형태로 바꾼 후 발생하는 황화수소를 측정하는 방법으로 이번 연구에서는 해양환경공정시험방법의 일종으로 검지관에 흡수되는 황의 양을 정량하는 방법인 황검지관법을 적용하였다.

3-5. 화학적 산소요구량(COD)

해저퇴적물 중 유기물량은 퇴적물의 환경을 평가하는데 중요한 척도 중의 하나로 사용된다. 일반적으로 유기물량의 측정은 강열감량법이나 유기탄소량 측정법 등을 이용하여 직접 정량하는 방법이 주로 사용된다. 반면 화학적 산소요구량(COD: Chemical Oxygen Demand)은 유기물이 산화될 때 환경에 미치는 영향을 알아내기 위해, 유기물이 산화될 때 소비되는 산소량을 측정하는 방법이다. 즉, 화학적 산소요구량은 퇴적물내 유기물을 강한 산화제로 산화시킬 때 소모되는 산소량으로 정의한다. 산화제로는 과망간산칼륨 혹은 중크롬산칼륨을 이용하나, 측정범위가 넓은 과망간산칼륨법을 보다 많이 이용하는데 본 연구에서도 역시 해양환경공정시험방법 중 해저퇴적물 편에 제시된 과망간산칼륨법을 사용하였다.

3-6. 총유기탄소(TOC)

퇴적물의 유기물량을 정량적으로 측정하는 일은 매우 어려우며, 따라서 일반적으로 유기물을 대표하고, 비교적 측정이 용이한 유기탄소를 측정한다. 유기탄소량 측정에는 여러 가지 방법이 이용되는데 이 방법들의 공통

된 원리는 유기탄소를 시약이나 고온 등으로 산화시켜 분해된 유기물 속의 탄소량을 알아내는 것이다. 이번 연구에서는 강열감량 분석을 위해 막자사발로 분마하여 전처리된 시료를 약 40~50g 취해서 비분산 적외선 분석법을 적용하는 SHIMADZU사의 SSM-500A를 사용하여 분석하였다.

3-7. 중금속

이번 연구에서 Al, Hg, Cu, Zn 등의 퇴적물 내 중금속 함량은 강열감량 분석을 위해 전처리된 약 0.2g의 분말시료를 180℃ 가열판에서 질산/과염소산 원액으로 산분해하고 건조시킨 다음 0.1N 질산으로 용출하여 유도결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-OES)를 이용하여 분석하였다.



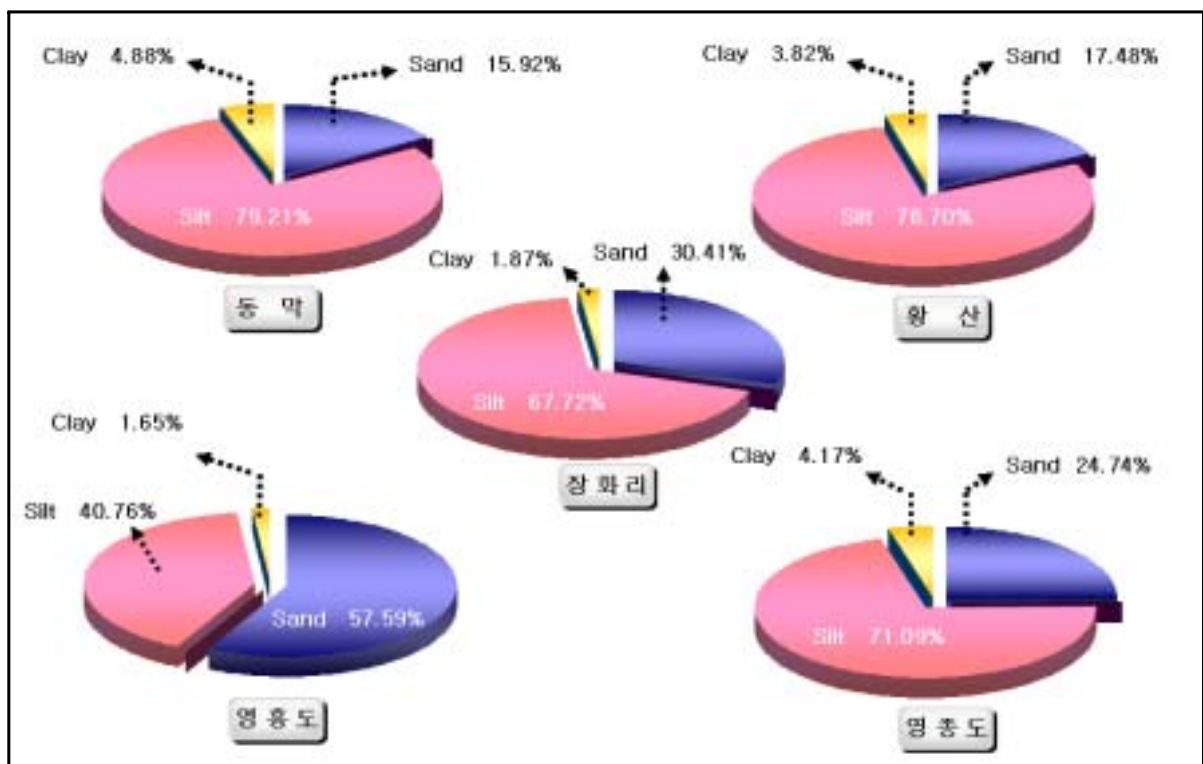
[Fig. 3] ICP-OES

Ⅲ. 결과

1. 표층퇴적물

1-1. 입도

연안 퇴적물의 입도는 유기물 함량에 크게 영향을 주는데 서해연안은 모래와 펄이 고르게 분포하고 있다. 일반적으로 해양의 입도는 세립하여 $\Phi(-\log_2[\text{입자직경}])$ 로 제시하며, 입도(Φ)가 커질수록 세립해짐을 의미한다. 입도분석을 실시하여 퇴적물을 sand, silt, clay의 3가지 성분으로 나눠본 결과 대부분의 지역에서 실트성분이 우세하게 나타났다. 영흥지역의 경우, 다른 지역과는 달리 모래성분이 50%이상을 차지하고 실트성분도 그와 비슷한 범위로 분포하는 혼성갯벌의 구조를 보였고, 동막과 황산의 경우, 모래성분이 20%이하로 실트성분이 우세한 펄갯벌의 구조를 보였다. 인천연안 갯벌의 경우, 조수간만의 차가 크고 계절풍의 영향에 따른 침식과 퇴적의 반복으로 니질퇴적물이 우세하게 나타나는 것으로 판단된다.

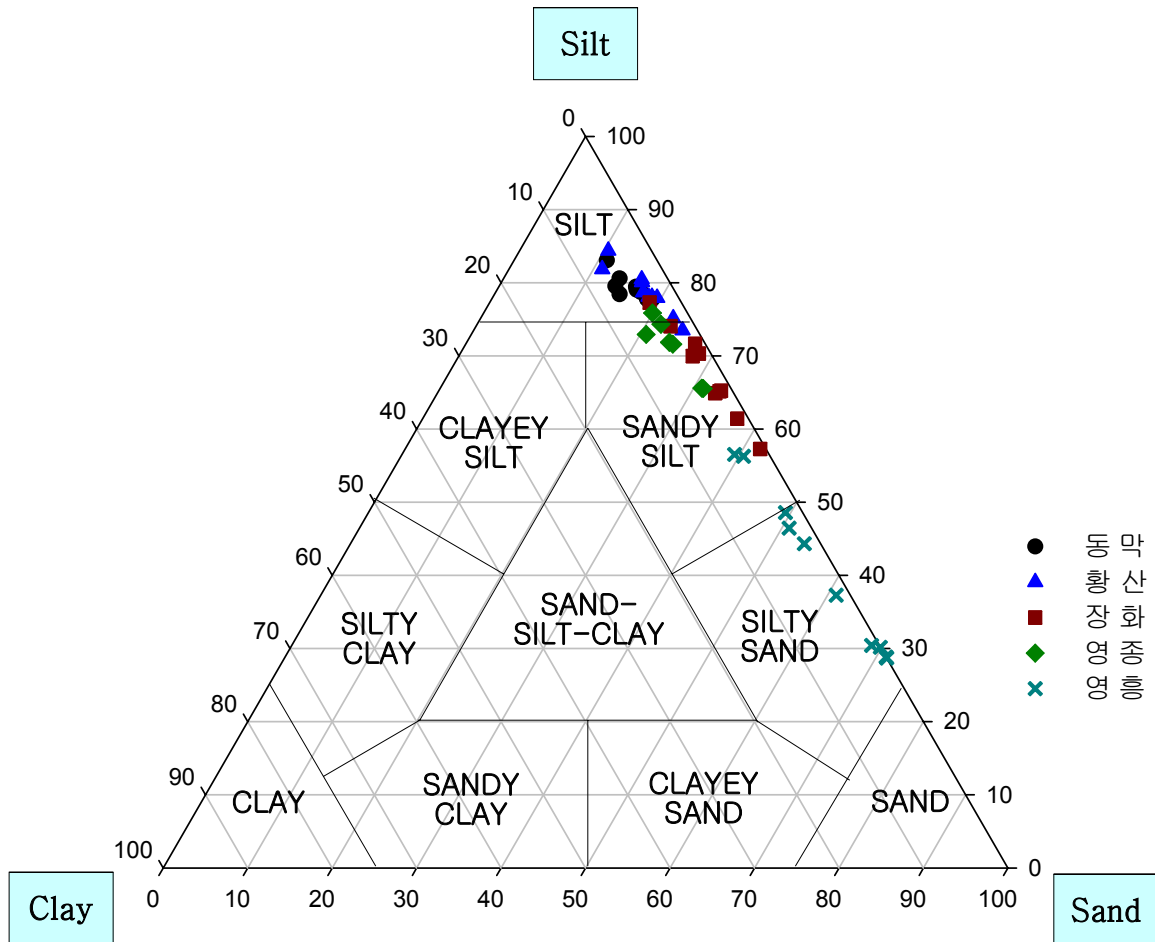


[Fig. 4] 지역별 입도조성

연구지역 47개 지점에 대한 전체평균입도는 4.1 ϕ (58.6 μ m)이며, 최소평균입경 4.9 ϕ (32.5 μ m), 최대 평균입경 3.3 ϕ (102.7 μ m)로 나타났으며, Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 모래성분이 가장 많았던 영흥도 지역의 평균입경이 3.7 ϕ (77.7 μ m)로 가장 크게 나타났다(Table. 1).

[Table. 1] 입도분석결과

Sampling Site	Constituent	Unit	Range		Average
			MIN	MAX	
동막	Sand	%	11.01	19.03	15.92
	Silt	%	77.76	83.05	79.21
	Clay	%	3.20	6.76	4.88
	Mean size	μ m	32.5	43.0	38.6
황산도	Sand	%	10.49	24.74	17.48
	Silt	%	73.50	84.39	78.70
	Clay	%	1.76	7.11	3.82
	Mean size	μ m	33.1	49.0	41.3
장화리	Sand	%	18.95	42.04	30.41
	Silt	%	57.27	77.27	67.72
	Clay	%	0.69	3.78	1.87
	Mean size	μ m	39.7	68.4	53.3
영흥도	Sand	%	39.38	71.30	57.59
	Silt	%	28.70	56.52	40.76
	Clay	%	0.00	4.10	1.65
	Mean size	μ m	55.4	102.7	77.7
영종도	Sand	%	20.00	31.17	24.74
	Silt	%	65.53	75.86	71.09
	Clay	%	3.30	4.15	4.17
	Mean size	μ m	40.3	51.3	45.8



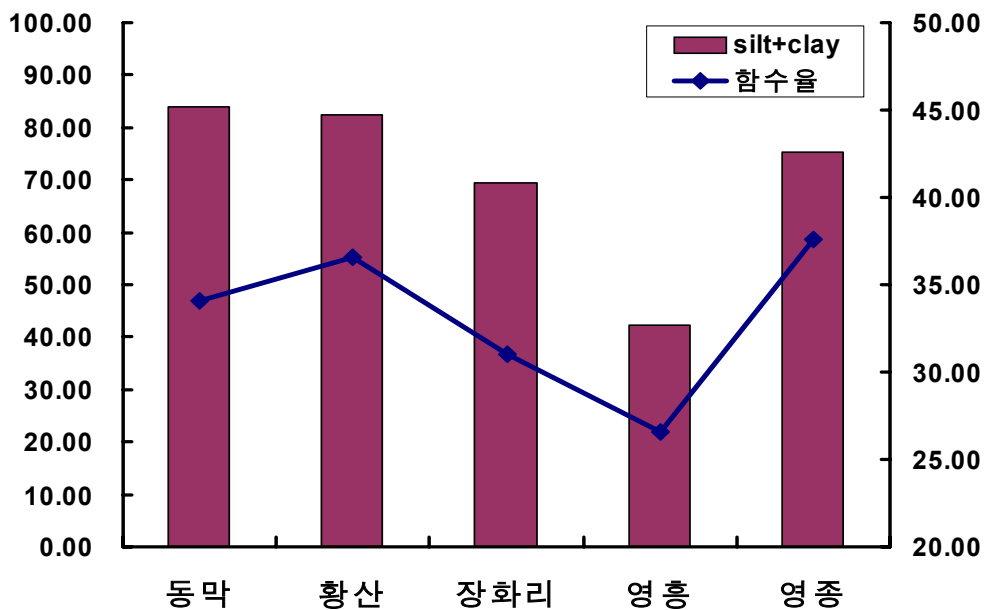
[Fig. 5] sand-silt-clay 삼각도표

sand-silt-clay의 삼각도표를 이용한 입도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 삼각도표에 나타낸 바와 같이 조사대상지역에서는 전체적으로 실트질이 우세하게 분포하는 가운데 사질이 추가된 경향을 나타내었고 영종지역의 경우 다른 지역과는 달리 사질과 실트질이 비슷한 범위로 Silty Sand 영역의 퇴적물로 주로 구성됨을 볼 수 있다. 황산과 동막지역에서 Silt성분이 우세하게 분포하고 장화리와 영종지역은 주로 Sandy Silt영역의 퇴적물 구성이 주를 이루는 것으로 나타났다.

1-2. 함수율

해양퇴적물의 함수율을 조절하는 주요 요인은 퇴적물 구성물의 입자 표면의 물리·화학적 특성과 입자의 형태 등이다. 함수율의 지역별 평균분포는 27~38%로 전체평균 33.2%로 나타났다. 강화남단 동막지역의 함수율은 평균 $34.08 \pm 3.29\%$, 범위는 28.76~39.39%, 장화리지역은 평균 $30.98 \pm 3.36\%$, 범위는 27.02~38.86%, 황산지역은 평균 $36.61 \pm 1.92\%$, 범위는 30.72~43.68%의 분포를 보였다. 영흥지역의 경우는 함수율 평균 $26.61 \pm 4.77\%$, 범위는 23.65~29.95%, 영종지역은 평균 $37.56 \pm 3.47\%$, 범위는 33.62~43.98%의 분포를 보였다.

퇴적물내의 함수율과 니질(silt+clay)의 함량은 퇴적물의 이화학적 특성을 결정하는 중요한 인자로서 퇴적물의 밀도와 유기물이 집적되어 보존될 수 있는 정도를 나타내는 항목이다. 이러한 함수율과 입도조성의 관계를 살펴보면 입경 $63\mu\text{m}$ 이하인 silt와 clay의 함량을 해당 퇴적물의 니질함량으로 볼 때 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 니질함량이 높을수록 퇴적물에 존재하는 수분함량이 많음을 알 수 있고 비교적 다른 지역에 비해 굵은 입자들로 구성되어 있는 영흥지역에서 함수율이 가장 낮게 나타났다.



[Fig. 6] 함수율과 입도조성

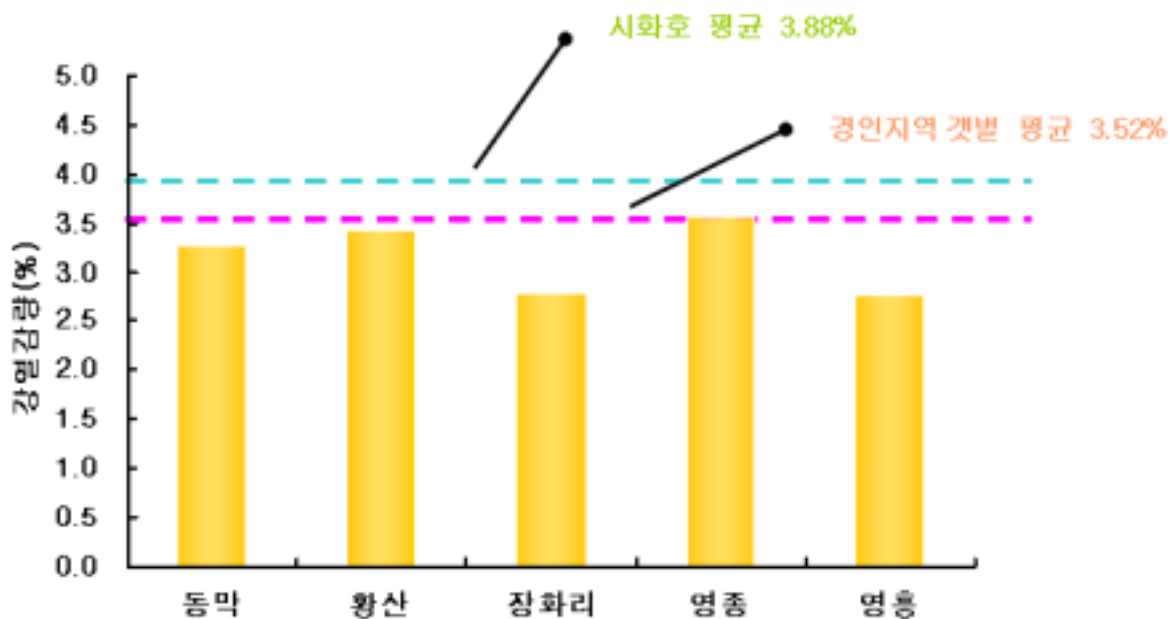
1-3. 유기물 분포 특성

1) 강열감량

퇴적물에 존재하는 유기물의 총량을 의미하는 강열감량의 경우, 전체 조사대상지역의 평균은 3.16%로 범위는 1.66~4.27%였다.

동막지역의 강열감량은 평균 $3.26 \pm 0.39\%$, 황산지역 평균 $3.43 \pm 0.35\%$, 장화리 지역의 경우는 $2.78 \pm 0.39\%$ 로 나타났고 강화지역의 전체평균은 $3.15 \pm 0.46\%$ 로 측정되었다. 영흥지역의 평균값은 $2.77 \pm 0.73\%$, 영종지역은 $3.56\% \pm 0.37\%$ 로 나타났다. 대상지역 중 강화의 장화리와 영흥지역이 낮은 수준으로 나타나 유기물의 유입 및 축적의 영향이 상대적으로 적은 것으로 보인다.

국토해양부에서 2003년에 경인지역 갯벌에 대해 실시한 조사와 비교해본 결과 영종을 제외한 모든 지역에서 경인지역 갯벌(석모도 연안, 송도, 아산만 등) 평균인 3.52%보다 낮은 수준의 농도로 관측되었다.



[Fig. 7] 강열감량

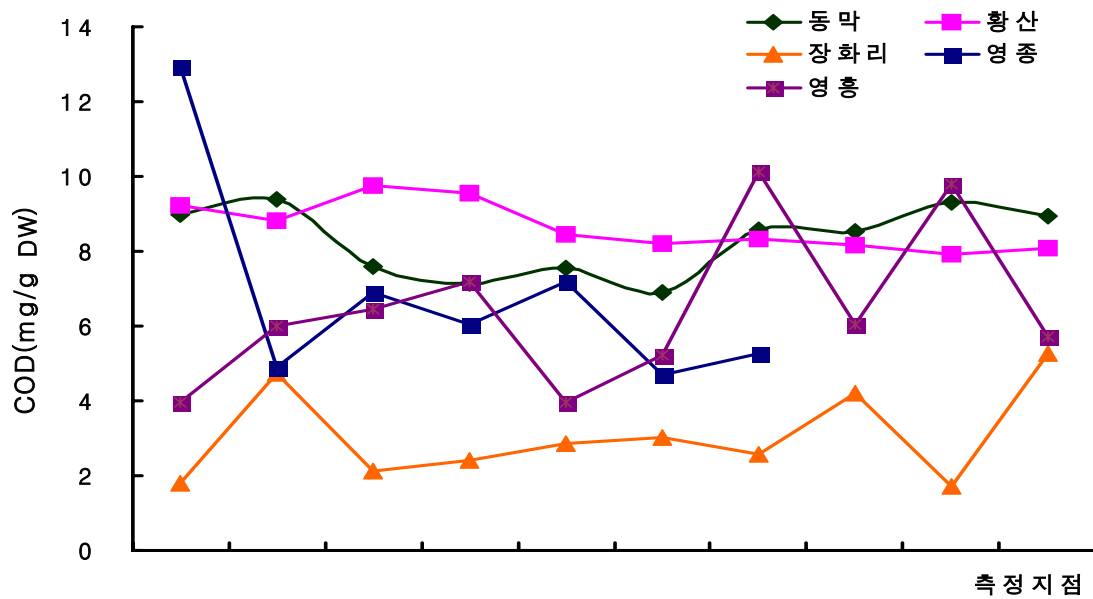
2) 화학적 산소요구량(COD)

유기물 지표인 화학적 산소요구량(COD)에 대한 조사대상지역 전체 평균은 6.7mg/g dry weight으로 측정범위는 1.7~12.9mg/g dry weight의 분포로 나타났다. 이 중에서 강화의 대표조사지역인 동막은 평균 8.3 ± 0.9 mg/g dry weight, 황산도 앞 갯벌 8.7 ± 0.7 mg/g dry weight, 장화리 갯벌의 경우는 3.1 ± 1.2 mg/g dry weight로 강화지역 전체평균은 6.7 ± 2.8 mg/g dry weight로 나타났다. 영흥지역은 6.4 ± 2.1 mg/g dry weight, 영종의 경우는 6.8 ± 2.9 mg/g dry weight로 주요갯벌 세 개 지역 강화, 영흥, 영종 지역의 평균값이 비슷한 수준을 보였다.

[Table. 2] 지역별 평균 COD

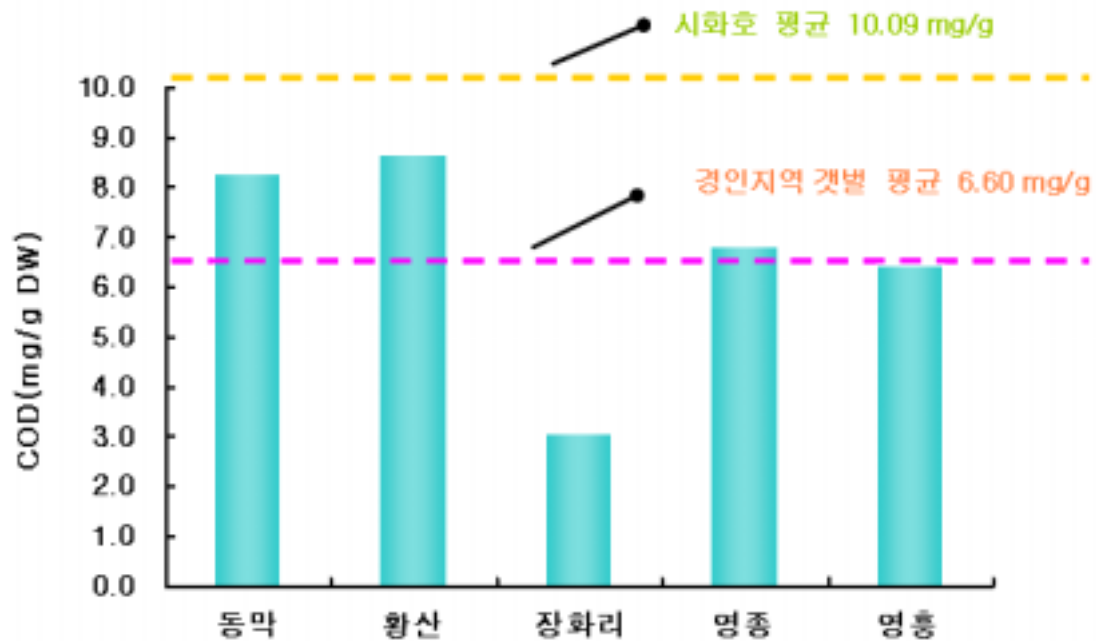
		COD(mg/g dry weight)
강화	동막	8.3
	황산	8.7
	장화리	3.1
영종		6.8
영흥		6.4
평균		6.7

전체 47개 측정지점에 대한 COD 결과를 그래프로 나타내어 Fig. 8에 나타내었다. 강화에 위치한 장화리 갯벌의 경우 10개 지점의 시료 모두 5mg/g dry weight 이하로 측정되어 가장 양호한 상태를 보였다.



[Fig. 8] 조사대상지역 COD 분포

국토해양부에서 2003년에 실시한 조사와 비교해본 결과 동막, 황산, 영종의 경우는 경인지역 갯벌 평균인 6.6mg/g dry weight보다는 높은 수준의 농도를 보였으나 시화호 평균인 10.1mg/g dry weight보다는 낮게 나타났다. 관광객 등 사람의 왕래가 잦은 동막지역과 한강하구의 영향을 받는 황산지역의 경우 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 수준의 COD값이 관측되어 외부에 기인한 유기물의 이차적 공급 및 유입이 있는 것으로 보인다. 일반적으로 퇴적물의 COD는 어장 노화를 일으키는 분해성 유기물 지표로 활용되는데 전 조사지점에 대해서 일본 수산환경수질기준을 참고하여 비교해보면 양식장 적지 기준인 20mg/g dry weight보다 낮게 나타나 본 연구대상 지역은 생물이 서식하기에 적합한 저서생태환경을 나타낸다고 할 수 있다.



[Fig. 9] 지역별 평균 COD

3) 산화발성황화물(AVS)

갯벌 중 황 축적은 무산소 상태에서 박테리아에 의한 황산염의 환원에 의해 생성된 황화수소가 철과 반응하여 황화철이 형성됨으로써 일어나며, 저층수에 산소가 존재하지 않을 경우에는 수층에서도 이러한 과정이 일어난다. 그러므로 축적된 황의 양은 저층수의 산소존재량, 황화물과 반응할 수 있는 철, 황산염의 농도, 산화될 수 있는 유기물의 양 등에 의해 결정된다. 이러한 사실에 따라 퇴적물 내 산화발성황화물(AVS)의 농도는 퇴적환경의 건강도를 나타낼 수 있는데 전체 평균값을 보면 $0.028 \pm 0.025 \text{ mg S/g dry weight}$ 로, 범위는 $0.000 \sim 0.108 \text{ mg S/g dry weight}$ 이었다. 동막지역 평균은 $0.039 \pm 0.024 \text{ mg S/g dry weight}$, 황산지역 $0.010 \pm 0.014 \text{ mg S/g dry weight}$ 로 나타났고 장화리 지역은 $0.025 \pm 0.015 \text{ mg S/g dry weight}$ 로 나타났다. 영흥지역의 경우는 $0.023 \pm 0.017 \text{ mg S/g dry weight}$ 이었고 영종지역은 $0.051 \pm 0.037 \text{ mg S/g dry weight}$ 로 관측되었다. COD와 마찬가지로 일본 수산환경수질기준을 참고하여 비교해보면 양식장 적지 기준인 $0.2 \text{ mg/g dry weight}$

보다 낮게 나타나 양호한 생태환경을 유지하고 있는 것으로 사료된다.

4) 총유기탄소(TOC)

총유기탄소의 전체 평균은 $0.465 \pm 0.139\%$ 로 농도범위는 $0.012 \sim 0.763\%$ 로 측정되었다. 동막은 $0.548 \pm 0.080\%$, 황산 $0.461 \pm 0.066\%$, 장화리는 $0.363 \pm 0.089\%$ 로 나타났고 영흥지역은 $0.408 \pm 0.200\%$, 영종지역은 $0.577 \pm 0.107\%$ 이었다. 다른 유기오염지표와 마찬가지로 전체적으로 장화리 지역에서 낮은 수준의 농도가 관측되었고, 동막 및 영종지역에서 0.5%이상의 수준을 보였다. 다른 연구에서 조사된 타지역 결과와 비교해보면 아산만의 경우 0.92%, 시화호 0.94%로 본 연구대상지역의 경우는 상대적으로 낮은 수준을 보이며 양호한 상태를 나타내었다.

1-4. 중금속 분포 특성

중금속은 일반적으로 자연수중에 극미량으로 존재하며, 생물에게 필수 원소로 작용하는 경우도 있으나 환경 중에 유입되면 분해되지 않는 특성을 가지고 있으므로 지속성 오염물질로 분류되고 있다. 연안 지역의 도시 및 산업화에 의하여 발생된 중금속은 하천, 대기, 직접 유입 등 여러 경로를 거쳐 연안 해역으로 유입되고 있다. 연안 해역, 특히 만과 같은 곳은 이류와 확산이 외양에 비해 제한되므로 중금속과 같은 오염물질이 더욱 축적될 가능성이 높다. 해양으로 유입된 중금속은 수중의 생지화학적 과정에 의하여 입자화되며, 결국 저층의 퇴적물에 축적되며, 저층에 서식하는 생물에 영향을 미칠 수 있다.³⁾

퇴적물 내에서 미량 금속들은 대부분 저질입자들과 강하게 상호 반응하여 존재하게 되는데 하구 또는 연안퇴적물내의 금속농도는 단지 투입량에 의해서만 결정되어지지 않고 입자의 물리적 수송과정, 금속흡착에 기여하는 입자표면에서의 화학반응, 산화환원반응, 입자형성과 금속의 흡착·탈착에 영향을 미치는 수중용액 내 화학작용 등의 차이에 의해서도 영향을 받게 된다.⁴⁾

일반적으로 퇴적물 입자가 작을수록 표면적이 넓어져, 더 많은 물질이 흡착할 수 있는 물리적 면적이 증가할 뿐만 아니라 이온교환용량이 커져 용존 금속들이 더욱 쉽게 퇴적물에 흡착될 수 있다. 특정 중금속이 농축된 광물의 영향을 제외하고 대부분 오염물질의 분포 및 축적은 퇴적물의 입자크기에 의해 크게 좌우된다.⁵⁾

중금속에 대한 분석결과를 살펴보면, 수은(Hg)은 0.004~0.050 $\mu\text{g/g}$ (평균 0.022 $\mu\text{g/g}$)의 범위로 강화 황산지역에서 0.038 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높고, 영흥지역이 0.008 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮았다. 전체적으로 강화의 황산, 동막, 장화리 지역에서의 평균농도가 영종 및 영흥지역보다 높은 수준을 보였다.

카드뮴(Cd)은 0.02~0.40 $\mu\text{g/g}$ (평균 0.15 $\mu\text{g/g}$)의 범위였으며, 대부분의 지역에서는 전체평균인 0.15 $\mu\text{g/g}$ 과 비슷한 수준의 농도를 보이며 공간적으로 증가 혹은 감소하는 경향이 매우 미약하며, 그 변화의 폭 또한 지역적인 차이를 볼 수 있

을 만큼 크지 않았다. 동막의 경우는 $0.09\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮은 수준의 농도를 나타냈다.

크롬(Cr)은 $3.12\sim 20.47\mu\text{g/g}$ (평균 $11.50\mu\text{g/g}$)의 범위였으며, 동막이 $8.36\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮고 황산이 $14.46\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 농도를 보였다. 전체 47개 지점에 대해서 동막의 여러 조사지점에서 $3\sim 5\mu\text{g/g}$ 의 낮은 수준의 농도분포를 보였고 황산의 H-1, H-2지점에서는 $20\mu\text{g/g}$ 이상의 높은 수준의 함량을 나타냈다.

구리(Cu)는 $3.96\sim 23.29\mu\text{g/g}$ (평균 $11.14\mu\text{g/g}$)의 범위로 동막에서 최소평균, 황산에서 최대평균값을 보이며 크롬과 유사한 분포를 나타내었고 동막, 황산, 영종 지역에서 $20\mu\text{g/g}$ 내외였다.

망간(Mn)은 $87.31\sim 591.94\mu\text{g/g}$ (평균 $206.75\mu\text{g/g}$)의 범위였으며, Cd, Cr과 같이 동막에서 $144.31\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮고 황산에서 $301.80\mu\text{g/g}$ 으로 높은 농도를 보였다.

니켈(Ni)의 경우 $3.58\sim 14.83\mu\text{g/g}$ (평균 $9.05\mu\text{g/g}$)의 범위로 지역별 평균값의 차이가 크게 나타나지 않았고 강화의 동막지역이 $6.69\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮은 수준의 함량을 나타냈다.

납(Pb)은 $4.11\sim 23.08\mu\text{g/g}$ (평균 $12.09\mu\text{g/g}$)의 범위로 강화 황산도 평균값이 $16.44\mu\text{g/g}$, 장화리에서 $9.81\mu\text{g/g}$ 으로 각각 최고 및 최저 평균농도를 보였다. 영종의 경우 전체 7개 정점의 농도편차가 크지 않고 비슷한 수준을 나타냈다.

아연(Zn)은 $71.99\sim 201.96\mu\text{g/g}$ (평균 $116.64\mu\text{g/g}$)의 범위였으며, 장화리 평균이 $125.03\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높았고 전체 47개 지점에서 영흥도 YH-3에서 최저값, 영종도 YJ-5지점에서 최고함량을 보였다.

전반적으로 각 중금속 원소에 대하여 동막지역에서 47개 지점 중 가장 최소함량을 갖는 지점이 주로 관찰되었으며 한강하구의 영향을 받는 황산지역에서 높은 수준의 농도를 보임을 알 수 있었다.

[Table. 3] 연구대상지역 중금속 조사 결과

조사지역		Hg	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
강화	동막	D-1	0.030	0.05	6.01	6.38	124.95	5.33	7.60	92.44
		D-2	0.026	0.02	3.12	3.96	87.31	3.58	4.11	79.60
		D-3	0.024	0.20	7.15	12.68	146.04	6.36	13.61	105.38
		D-4	0.021	0.07	6.32	5.45	108.05	5.32	6.91	113.42
		D-5	0.024	0.15	15.88	11.23	235.06	11.52	15.01	131.18
		D-6	0.023	0.17	17.41	19.72	225.56	12.44	18.90	154.24
		D-7	0.031	0.05	4.08	4.20	109.96	3.81	7.15	104.44
		D-8	0.025	0.11	10.30	9.09	162.45	7.85	11.21	117.36
		D-9	0.025	0.08	9.15	7.54	156.14	7.04	10.34	108.75
		D-10	0.022	0.05	4.19	4.38	87.61	3.64	7.37	108.67
		Mean	0.025	0.09	8.36	8.46	144.31	6.69	10.22	111.55
	황산	H-1	0.043	0.25	20.23	22.01	295.82	14.81	20.25	135.52
		H-2	0.043	0.24	20.47	19.07	345.45	14.83	23.08	112.98
		H-3	0.039	0.10	8.89	9.97	147.29	6.40	21.01	74.64
		H-4	0.050	0.10	9.88	11.16	148.87	7.32	9.72	117.51
		H-5	0.042	0.17	14.61	15.83	237.46	10.54	15.45	88.28
		H-6	0.036	0.19	15.63	16.19	315.11	11.27	12.33	131.46
		H-7	0.045	0.16	15.74	17.21	359.43	13.37	14.34	142.32
		H-8	0.024	0.17	13.54	14.75	318.04	10.25	15.50	129.27
		H-9	0.029	0.22	10.82	23.29	258.56	8.74	17.50	88.42
		H-10	0.033	0.15	14.76	12.07	591.94	12.32	15.20	109.28
		Mean	0.038	0.17	14.46	16.15	301.80	10.99	16.44	112.97
	장화리	J-1	0.023	0.20	11.99	10.27	199.39	9.77	9.24	90.67
		J-2	0.032	0.19	13.70	11.96	246.54	11.01	11.02	108.93
		J-3	0.022	0.14	12.34	6.65	171.16	9.31	8.84	95.17
		J-4	0.018	0.14	10.96	7.52	152.52	9.06	8.34	82.83
		J-5	0.024	0.14	14.26	9.28	215.18	9.87	9.96	146.19
		J-6	0.020	0.15	13.98	9.83	189.97	9.82	10.42	148.12
		J-7	0.019	0.13	11.68	9.02	174.39	9.22	8.64	131.76
		J-8	0.031	0.22	16.52	10.22	254.04	12.37	14.29	169.42
		J-9	0.018	0.13	11.82	7.68	174.10	8.91	9.22	138.03
		J-10	0.025	0.11	11.48	8.45	175.90	8.31	8.16	139.20
		Mean	0.023	0.15	12.87	9.09	195.32	9.76	9.81	125.03
영흥	YH-1	0.007	0.17	9.35	8.13	168.44	7.54	13.13	91.33	
	YH-2	0.010	0.13	8.61	8.00	158.65	7.14	10.58	115.79	
	YH-3	0.006	0.09	5.96	10.52	94.44	4.61	8.88	71.99	
	YH-4	0.009	0.15	10.42	9.03	184.22	8.26	12.42	120.58	
	YH-5	0.004	0.16	10.68	8.14	179.83	8.21	7.85	94.22	
	YH-6	0.006	0.13	9.77	7.16	154.88	7.83	8.32	80.39	
	YH-7	0.010	0.19	12.44	16.17	190.99	10.59	15.09	92.11	
	YH-8	0.010	0.18	13.86	11.56	210.72	10.86	11.38	181.25	
	YH-9	0.013	0.18	9.72	6.59	176.73	8.06	9.02	113.79	
	YH-10	0.020	0.13	12.92	7.85	208.54	10.27	12.37	171.86	
	Mean	0.010	0.15	10.37	9.31	172.75	8.34	10.90	113.33	
영종	YJ-1	0.017	0.40	15.01	13.49	263.59	11.53	13.19	101.26	
	YJ-2	0.018	0.11	14.97	14.35	262.66	12.23	14.39	95.55	
	YJ-3	0.014	0.12	13.52	12.38	229.97	10.91	13.88	109.21	
	YJ-4	0.014	0.09	9.06	19.19	241.43	8.33	13.73	91.14	
	YJ-5	0.016	0.13	8.32	11.88	187.89	7.86	12.33	201.96	
	YJ-6	0.028	0.13	11.72	15.43	216.77	9.75	13.11	127.94	
	YJ-7	0.013	0.11	7.40	6.77	134.57	5.66	10.87	115.17	
	Mean	0.017	0.16	11.43	13.36	219.55	9.47	13.07	120.32	

크게 강화, 영종, 영흥 3개 지역으로 구분하여 비교해보면 Zn의 경우는 지역에 따른 농도차이가 거의 없었고 Cd를 제외한 대부분의 중금속의 함량이 영흥지역에서 가장 낮게 나타났다. 강화의 중점조사지역을 따로 살펴보면 동막 지역 황산지역의 경우 지리적으로 인접하여 있음에도 불구하고 중금속 함유량의 차이가 뚜렷한 것을 볼 수 있는데 이는 동막과 황산사이의 동검도 지역에 설치된 보 형태의 다리로 인해 황산지역으로의 해수유입이 원활히 이루어지지 못하는 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 황산지역의 경우 입도구성이 세립하여 유기물이나 중금속 등이 흡착되기 쉬운 퇴적물의 구조적 특징과 한강하구와 가장 근접하게 위치한 지리적 여건도 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 중금속 함량의 원인이 된 것으로 보여진다.

[Table. 4] 지역별 평균 중금속 농도

unit : ppm

		Hg	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
강 화	동막	0.025	0.094	8.4	8.5	144	6.7	10.2	112
	황산	0.038	0.174	14.5	16.2	302	11.0	16.4	113
	장화리	0.023	0.154	12.9	9.1	195	9.8	9.8	125
	평 균	0.029	0.141	11.9	11.2	214	9.1	12.2	117
영종		0.017	0.155	11.4	13.4	220	9.5	13.1	120
영흥		0.008	0.151	10.4	9.3	173	8.3	10.9	113
평균		0.022	0.146	11.5	11.3	207	9.0	12.1	117

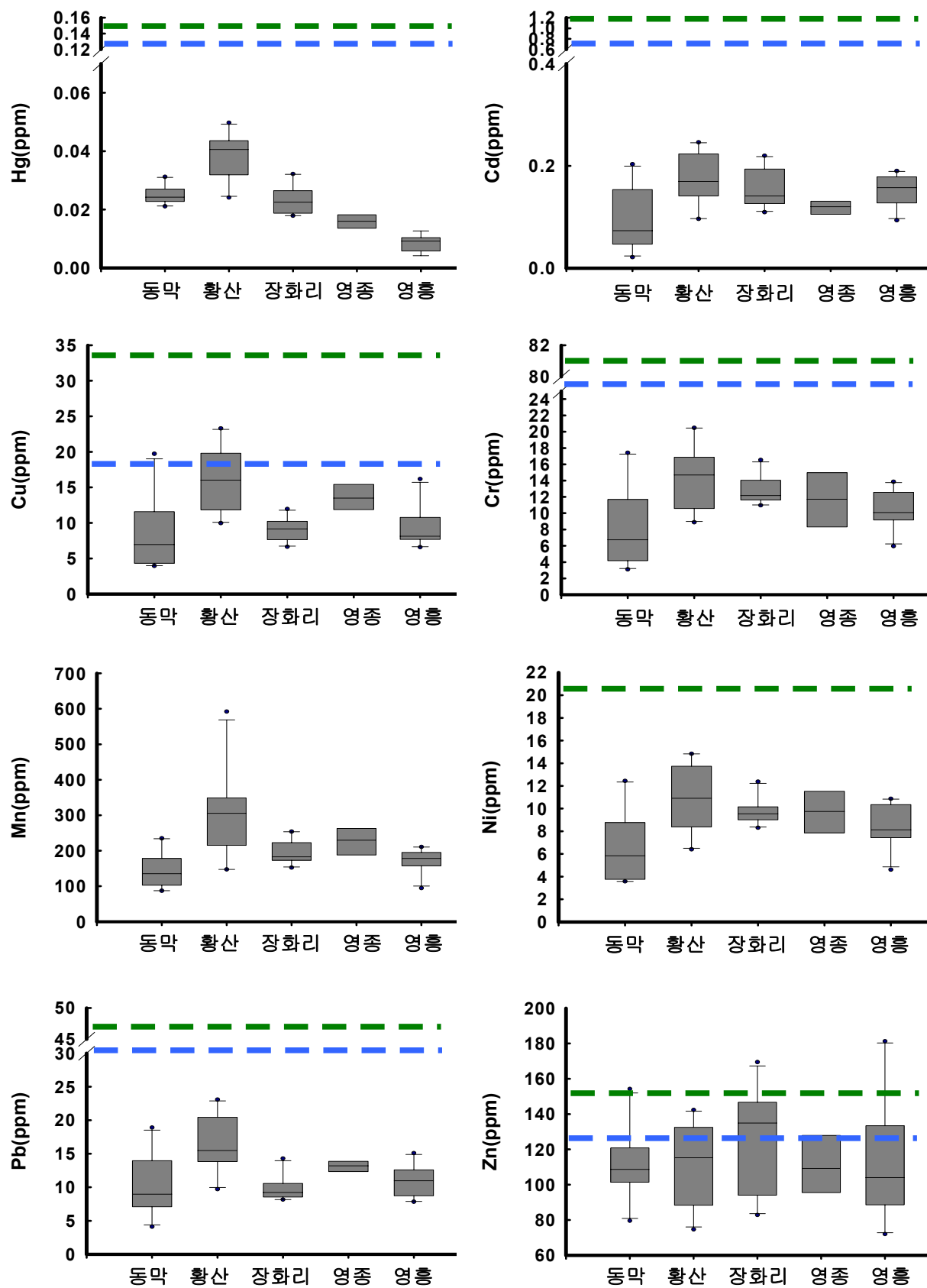
인천주요갯벌의 중금속 함량을 서남해안 타 지역 퇴적물의 연구조사 결과와 비교하여 Table. 5에 제시하였다. Zn을 제외한 중금속들이 타지역에서보다 낮은 수준으로 나타났고 Cu의 경우는 반월조간대와 비교시 최대 10배 낮은 농도를 보였다. Zn은 진해만에서의 연구결과보다는 다소 낮은 농도를 보였으나 기타 다른 지역보다는 높은 농도로 관측되었다.

[Table. 5] 지역별 중금속 조사결과 비교

unit : ppm

	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Reference
인천갯벌	12	11	207	12	117	이번 조사결과
금강하구	67	23	655	—	79	조 등(1993)
영산강하구	77	23	673	28	96	조와 박(1998)
경기만	—	33	693	31	—	Lee et al.(1985)
진해만	59	30	386	37	128	Lee and Lee(1983)
광양만	67	19	909	35	95	조 등(2000)
반월조간대	—	112	345	40	—	Jung et al.(1996)

이번 연구에서 측정된 각각의 중금속의 농도를 외국의 해양퇴적물 기준과 비교하여 Fig. 10에 제시하였다. 파란점선은 캐나다의 환경기준이고, 초록점선은 미국 해양대기청(NOAA)에서 제시한 환경기준이다. Hg, Cd, Cr의 경우 전지역에서 외국의 해양퇴적물 환경기준보다는 낮은 수준의 농도를 보였고 구리의 경우는 황산지역에서 캐나다의 환경기준보다 높은 수준의 농도를 나타냈다. Ni과 Pb은 기준치보다 낮은 수준의 농도를 보였고 Mn의 경우 외국의 환경기준이 따로 제시되어 있지 않아 비교할 수 없었다. Zn의 경우는 미국 해양대기청(NOAA)의 기준을 넘지는 않았으나 대부분의 지역에서 캐나다의 환경기준을 웃도는 수준의 농도를 보였다.



[Fig. 10] 중금속별 농도분포

2. 주상퇴적물

2-1. 입도

인천주요갯벌의 퇴적작용을 파악하기 위하여 강화에서 5개, 영종도 2개, 영흥도 2개 지점으로 총 9개 지점에 대하여 약 50cm깊이의 주상퇴적물을 채취하였다.

퇴적층 깊이에 따른 입도구조변화(Table. 6)를 살펴보면 동막에 대한 주상퇴적물의 구성은 silt가 79~80%로 대부분을 차지하며, clay는 5~6%, sand는 14~16%의 구성비를 보였다. 함수율은 20~40%의 범위를 보였다. 황산도는 silt가 76~80%로 퇴적물의 주를 이루고 clay는 3~6%, sand는 16~21%의 구성비를 보였다. 평균입경은 하부로 갈수록 세립화되며 함수율은 26%내외로 큰 변화가 없었다. 장화리의 퇴적물 구성은 silt성분이 71~80%로 대부분을 차지하고 clay는 3~6%, sand는 16~21%의 구성비를 보였다. 평균입경은 상부와 중부에서 $47\mu\text{m}$ 로 같은 수준을 보였고 하부에서는 이보다 세립한 $39\mu\text{m}$ 로 나타났다. 함수율은 27% 내외로 하부에서 상부로 변화가 거의 없었다. 영흥은 퇴적물의 구성이 깊이에 따른 큰 차이를 보이지 않았고 다른 지역과는 달리 sand가 69% 내외로 대부분을 이루고 있으며, 함수율은 21~26%범위로 상층에 비해 하부에서 낮은 수준을 보였다. 영종은 62~73%의 범위로 silt가 주 성분을 이루고 sand 25~39%, clay 1~4%의 범위를 보였다. 평균입경은 깊이에 따른 뚜렷한 구분을 보이지 않았으며 함수율은 26~33%로 상층보다 하층에서 낮은 수준을 보였다. 동막을 제외한 대부분의 지역에서 상부에 비해 중·하부의 clay함량이 높았다.

[Table. 6] 주상퇴적물의 입도조성

		Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	평균입경(μm)	함수율(%)
동막	상	13.7	80.4	5.9	34.9	28.0
	중	15.5	79.9	4.6	38.3	39.6
	하	16.1	79.1	4.8	39.1	19.6
황산	상	21.4	75.6	3.1	47.0	25.0
	중	15.2	79.1	5.7	37.8	27.2
	하	16.1	79.1	4.9	38.9	26.4
장화리	상	26.0	71.1	2.3	46.5	28.7
	중	24.0	73.2	3.0	46.5	27.8
	하	16.1	79.7	4.6	39.3	29.7
영흥	상	71.4	28.4	0.2	84.8	26.1
	중	69.9	29.3	0.8	89.5	21.3
	하	70.3	29.3	0.4	88.5	22.1
영종	상	39.0	63.8	1.2	54.2	32.6
	중	24.6	72.8	2.6	48.6	26.1
	하	30.2	61.9	3.9	56.3	26.9

2-2. 중금속 결과

각 지점에서 채취한 주상퇴적물에 대한 깊이별 중금속 분석결과는 Table. 7과 같다. 전반적으로 상부에서 하부로 뚜렷한 변화를 보이지 않는데 이는 인천연안의 경우 조수간만의 차가 최대 10m로 매우 커 퇴적층이 교란되어 나타난 현상으로 추정된다.

[Table. 7] 주상퇴적물 중금속 결과

unit : ppm

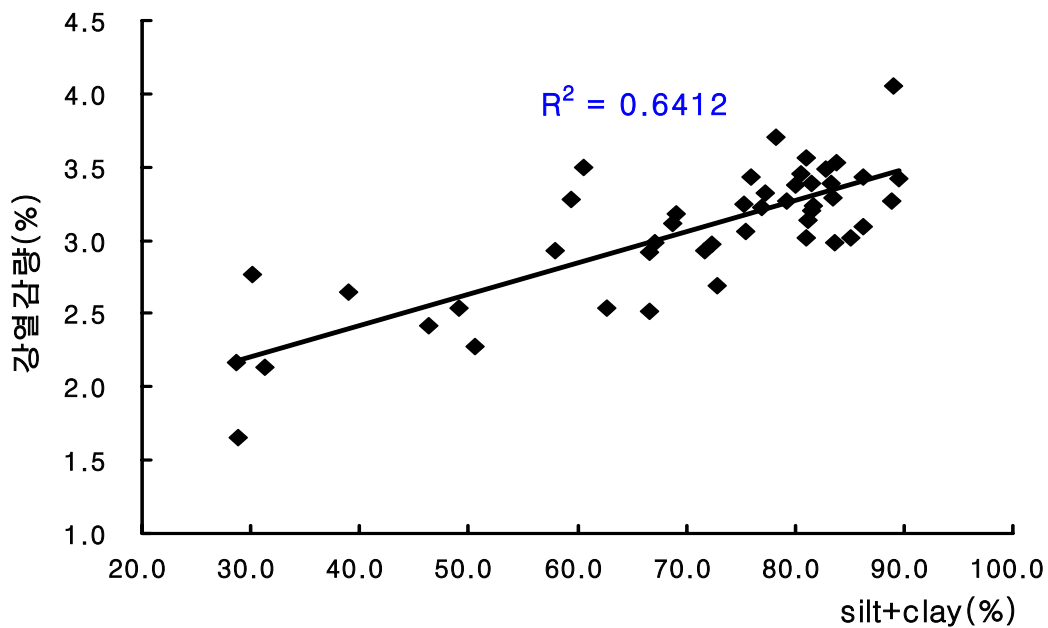
조사지점		Hg	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
동막	상	0.033	0.122	13.5	11.1	218	9.8	13.1	113
	중	0.040	0.117	14.8	10.7	268	11.1	11.6	130
	하	0.011	0.066	11.5	4.9	194	8.4	8.0	116
황산	상	0.034	0.096	13.0	8.6	223	9.2	9.7	141
	중	0.046	0.112	17.0	11.5	259	12.1	12.5	137
	하	0.030	0.097	15.2	9.5	219	11.0	13.1	146
장화리	상	0.025	0.137	12.7	9.7	193	9.3	11.3	126
	중	0.028	0.112	13.5	9.3	203	9.6	10.6	121
	하	0.027	0.138	14.8	10.1	246	10.9	12.8	143
영흥도	상	0.013	0.076	9.8	4.7	133	7.2	8.4	109
	중	0.010	0.077	9.6	4.2	130	7.2	8.1	133
	하	0.010	0.107	9.8	4.7	138	7.8	8.4	151
영종도	상	0.018	0.116	11.8	9.0	217	8.7	10.1	128
	중	0.016	0.077	10.7	6.0	183	7.8	8.3	102
	하	0.027	0.139	14.0	9.5	206	9.9	12.2	136

IV. 고찰

1. 오염지표간의 상관관계

1-1. 강열감량과 입도조성

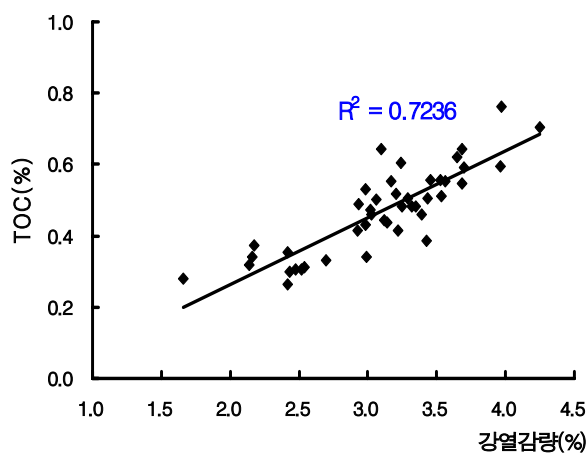
일반적으로 퇴적물의 세립성분 함량이 높아짐에 따라 유기물 함량이 점차 증가하는 입도관련성은 국내외 여러 연구를 통해 알려진 현상으로 이번 연구에서 조사된 전체 표층퇴적물의 결과를 통해 상관관계 분석을 해 본 결과 퇴적물에 존재하는 유기물의 총량을 나타내는 강열감량과 입경 63 μm 이하인 silt+clay 함량의 상관성은 Fig. 11과 같이 높은 것으로 나타나 인천갯벌 퇴적물에서도 유기물 함량이 입도의 영향을 받고 있음을 보였다.



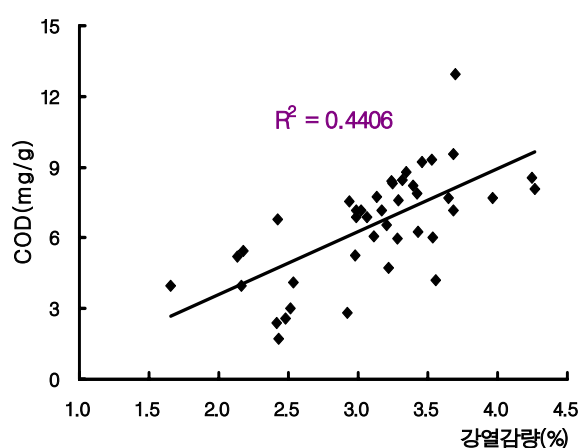
[Fig. 11] 강열감량과 입도와의 관계

1-2. 유기물지표간의 관계

퇴적물에 존재하는 유기물질의 양을 간접적으로 평가할 수 있는 지표에는 여러 가지가 있는데 이들 지표간의 상관관계를 도출해보았다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 TOC와 강열감량, COD와 강열감량의 관계를 나타낸 것으로 본 연구에서 조사된 강열감량은 COD에 비해 TOC와 상대적으로 더 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 강열감량은 분해성 유기물의 함량이 높은 경우에 높게 되는데 COD는 이와 달리 난분해성 유기물의 지표이기 때문인 것으로 생각된다. 노(2006)²⁾는 연구에서 COD와 강열감량의 비로부터 퇴적물의 평가에 대해서 언급하였는데, 이는 COD/IL 의 값을 1을 기준으로 하여 기율이 1보다 크면 퇴적물 중 유기물은 외부기원의 유기물 유입에 의해 형성된 피산화성 유기물을 나타내며, 기율이 1이하인 경우는 자연해수 중의 생물생산 등에 의한 자생성 유기물을 나타내는 것으로 평가하였다. 이를 바탕으로 Fig. 13의 COD와 강열감량의 비를 보면 그 기율이 1이상으로 인천지역 갯벌퇴적물은 외부에서 2차적으로 공급에 의해 생성된 유기물로 구성된 것으로 추정할 수 있다.



[Fig. 12] TOC와 강열감량의 관계



[Fig. 13] COD와 강열감량의 관계

2. 연안지역 오염도와의 관계

본 연구원 해양조사과에서 분기마다 실시하고 있는 연안지역 오염도 조사지점 중 이번 연구대상지역과 근접하여 있는 곳을 선별하여 그 조사결과를 자료로 활용하였다. 강화도의 경우, 강화 남단의 서쪽 끝에 위치한 '선수 앞바다'와 동쪽 끝자락에 있는 '초지리 앞바다' 지점을, 영종도는 '인천공항 하단', 영흥도는 '영흥도 남방' 지점의 자료를 이용하였다. 이번 연구에서 갯벌의 시료채취는 5~6월에 이루어졌음을 감안하여 해수 오염도의 경우는 연안지역의 최근 10년동안의 분기별 평균데이터 중 2분기 조사결과를 참고로 하였고 반기마다 조사되는 퇴적물의 경우, 1999~2008년까지의 조사결과에 대한 산술평균값을 구하여 참고하였다. 이러한 자료들을 활용하여 연구대상지역 주변의 수질개황을 살펴보고 퇴적물 결과를 비교해 보았다.

2008년도 2분기에 실시한 연안지역의 오염도를 살펴보면, COD는 지점에 따른 차이를 보이지 않았으나 한강담수의 영향을 받는 강화 초지리 앞바다의 경우 TN, TP의 농도가 다른 지역에 비해 높게 나타났다. 중금속 농도를 보면 Pb, Cd의 경우는 지점별로 동일한 수준이거나 큰 차이를 보이지 않았고, Cu는 인천공항 하단과 초지리 앞바다에서 다소 높은 농도가 관찰되었는데 갯벌퇴적물에 대한 중금속 조사 결과 역시 Cu의 경우 영종지역이 가장 높은 수준을 보이고 영흥지역에서는 낮은 수준으로 나타나 유사한 양상을 보이는 것을 볼 수 있다. Zn은 영종지역에서 다른 지역보다 높은 농도를 보이고 Cr, As, Hg은 관련 지점 모두에서 검출되지 않았다.

[Table. 8] 인천 연안지역 해수 오염도

unit : mg/l

측정지점	COD	T-N	T-P	Cu	Pb	Cd	Zn
인천공항 하단	1.9	0.253	0.025	0.011	0.005	0.001	0.097
영흥도 남방	1.5	0.215	0.017	0.006	0.006	0.001	0.048
선수 앞바다	2.3	0.807	0.041	0.006	0.006	0.001	0.061
초지리 앞바다	2.7	1.481	0.071	0.008	0.009	0.001	0.057

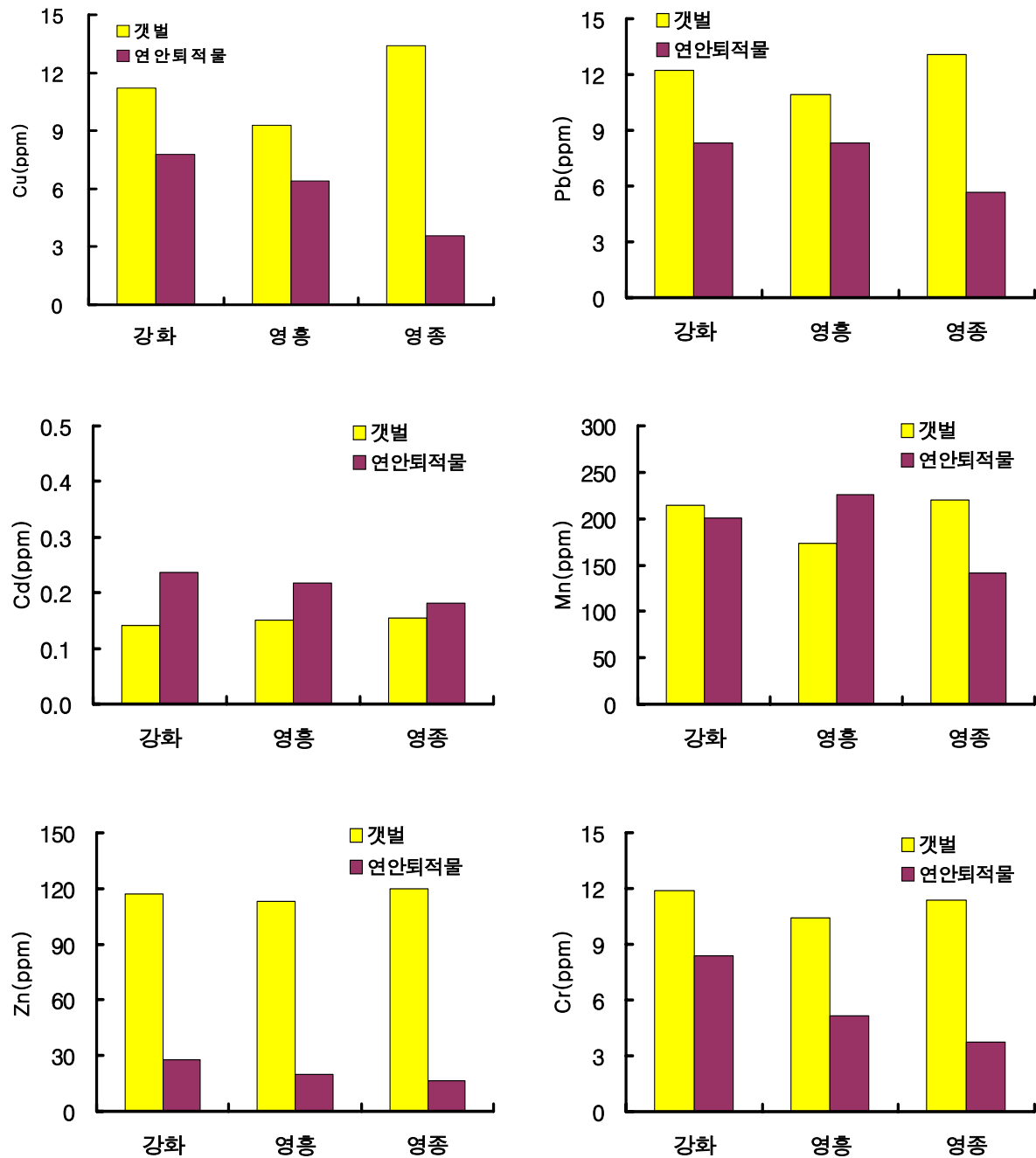
유기물 오염지표인 COD와 강열감량에 대해 연안지역의 퇴적물을 대상으로 최근 10년간 조사한 결과와 갯벌에 대한 이번 조사결과를 비교하여 Table. 9에 나타내었다. 강화지역의 경우 연안퇴적물의 COD 및 강열감량값이 갯벌보다 높게 나타났는데 이는 연안의 경우 한강으로부터의 2차적 오염원 공급이 많을 것으로 예상되는 초지리 앞바다에 대한 결과이고 갯벌은 청정한 지역인 장화리 지역을 포함한 강화지역 주요 3지점의 평균값으로 측정지점의 상이함에 기인한 것으로 생각된다. 갯벌에서 측정된 COD값의 경우 지역별로 편차를 보이지 않았지만 연안퇴적물의 경우는 강화>영흥>영종의 순으로 나타났고, 강열감량은 갯벌의 경우 영흥지역이 가장 낮게 나타난 반면 연안 퇴적물의 경우는 영종지역에서 낮은 수준으로 관측되었다.

[Table. 9] 연안퇴적물과 인천갯벌 유기물 오염도 비교

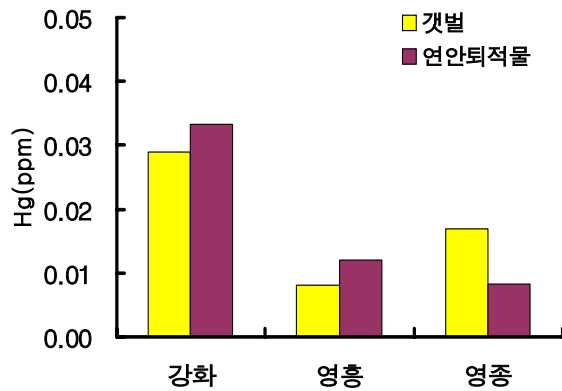
항 목 지 점	연안 퇴적물		인천 갯벌	
	COD (mg/g)	강열감량 (%)	COD (mg/g)	강열감량 (%)
강화 - 초지리 앞바다	11.6	5.6	6.7	3.2
영종 - 인천공항 하단	5.0	2.2	6.8	3.6
영흥 - 영흥도 남방	6.9	2.6	6.4	2.8

최근 10년(1999~2008)동안 실시한 연안지역의 퇴적물에 대한 중금속 조사결과와 본 연구에서 실시한 갯벌에 대한 중금속 분석결과를 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. Cr, Cu, Pb, Zn의 결과를 보면 상대적으로 내륙과 더 가까이 위치한 갯벌에서의 농도가 연안 퇴적물 보다 높은 농도를 보이고 Mn의 경우는 영흥지역에서 연안퇴적물이 갯벌에서의 측정값보다 약간 높은 수치로 나타났다. Cd의 경우는 다른 중금속과는 달리 연안지역에서의 농도가 갯벌에서보다 높은 수준을 보였다. 지역별로 보면 연안퇴적물과 갯벌 모두 Zn에 대해서는 지역별 편차가 크게 나타나지 않았으나 이를 제외한 나머지 중금속들에 대해서 연안지역의 경우는 강화지역에서 가장 높은

농도를 보이고 영흥과 영종은 비슷하거나 영흥에서 조금 높은 수준을 나타냈다. 갯벌 퇴적물의 경우는 지역별로 비슷하거나 Cu, Pb의 경우 상대적으로 영종이 약간 높은 농도를 보였다. Hg의 농도는 연안지역과 갯벌 퇴적물 모두 강화지역에서 그 농도가 높게 나타났다.



[Fig. 14-1] 인천 갯벌과 연안 퇴적물의 중금속 오염도 비교

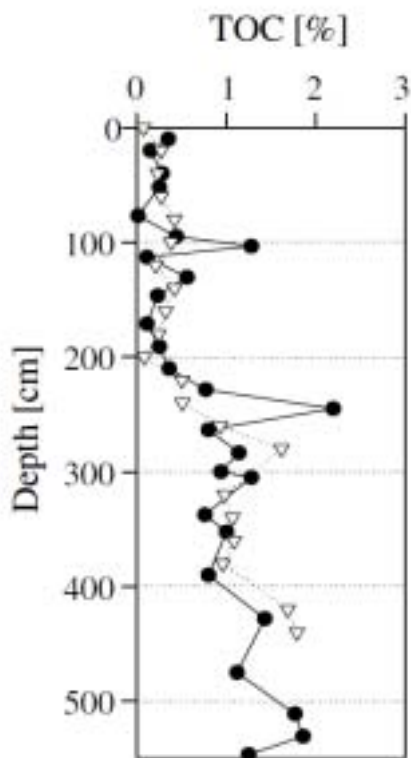


[Fig. 14-2] 인천 갯벌과 연안 퇴적물의 중금속 오염도 비교

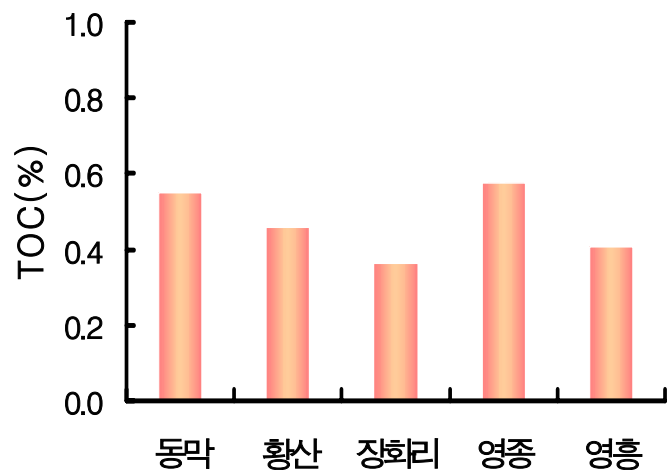
3. 외국 갯벌과의 오염도비교

3-1. 독일갯벌

독일의 Wadden Sea에 발달한 갯벌에서 조사된 TOC 결과를 참고하여 본 연구결과³⁵⁾와 비교하여 보았다. Wadden Sea는 독일의 North Sea와 인접하여 있는 바다로 네덜란드 서부와 덴마크 북동쪽 사이에 위치해있다. 결과를 비교하기 위해 참고한 연구에서는 약 500cm 깊이의 주상퇴적물 시료를 채취하여 깊이에 따른 TOC변화를 살펴보았다. 이번 연구에서는 깊이별 TOC 함량을 조사하지 못하여 직접적인 비교는 불가능하나 독일 갯벌의 주상퇴적물 시료에서의 TOC 함량과 본 연구 표층퇴적물 시료의 TOC 함량을 비교해보고자 각각 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. 독일의 조사결과를 살펴보면 갯벌표면으로부터 210cm 사이의 표층퇴적물에서 TOC 농도는 104cm깊이에서의 1.3%를 제외하면 하층보다 낮은 0.1~0.5% 범위의 농도 분포를 보였는데 Fig. 16에 나타낸 인천주요갯벌의 표층퇴적물에 대한 농도분포 결과와 유사한 수준을 보이는 것을 알 수 있다.



[Fig. 15] 독일 Wadden Sea
TOC 농도분포³⁵⁾



[Fig. 16] 인천 갯벌 TOC 농도분포

3-2. 중금속 오염도 비교

여러 문헌에서 조사된 외국 갯벌에서의 중금속 분석결과와 이번 연구에서 조사된 결과를 Table. 10에 나타낸 바와 같이 비교해보았다.

Cd의 경우, Lanne 등이 제시한 북미 노르웨이 연안의 저질내 평균함량보다는 약간 높은 수준이었다. Cr은 인천갯벌에서는 $11.5\mu\text{g/g}$ 으로 표에 제시된 다른 국외 지역보다 월등히 낮은 수준을 보였고 비오염지역인 캐나다 동부보다 약 7배 낮은 농도로 나타났다. Cu는 노르웨이연안이나 미국대륙 중에서 가장 생산성 높은 하구지역 중 한 곳인 루이지애나 남서부지방 보다 비슷하거나 낮은 수준이었고 홍콩지역과는 약 8배 이상의 현저한 차이를 보이는데, 홍콩지역의 결과는 5지점의 조사결과를 평균치로 오염인자가 많은 홍콩섬과 카오룽 반도 사이의 조사지점에서의 높은 농도로 인한 평균치 상

승 요인으로 인한 결과로 생각된다. Mn의 경우 James 등이 제시한 미국 루이지애나 남서부 연안 퇴적물의 평균 농도범위 상한값보다는 낮은 수준을 보였다. 인천갯벌에서의 Ni, Pb의 농도는 미국이나 캐나다 동부 지역과 비교시에도 낮은 함량을 보였다. Zn의 경우는 북미 노르웨이 연안이나 홍콩 지역 퇴적물 평균함량과는 비슷한 수준을 보이거나 미국 루이지애나와 모로코의 연안 퇴적물 농도에 비해서는 다소 높은 수준을 보였다.

[Table. 10] 외국 연안 퇴적물과 인천갯벌의 중금속 함량 비교

항 목 조사지역	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
인천 갯벌	0.146	11.5	11.3	207	9.0	12.1	117
노르웨이연안 ^{a)}	0.08±0.02	—	17±5.9	—	—	26±9.5	110±27
북극근해 ^{b)}	—	64.0	—	—	22.0	—	—
캐나다 동부 ^{c)}	—	87.0	—	—	26.0	—	—
미국 루이지애나 남서부 ^{d)}		10~30	10~25	200~600	6~20	8~20	30~55
모로코 ^{e)} (아틀란틱 오션)	—	96.9	30.4	—	29.1	—	49.8
홍콩 ^{f)}	—	—	89.56	—	—	33.94	124

a) Lanne, R.W.P.M.(1992)

b) Cambell, J. A and Loring, D. H.(1980)

c) Loring, D. H.(1978)

d) James N. Beck, Joseph Sneddon(2000)

e) M. Maanan et.al (2004)

f) Xiang-dong Li et.al(2008)

조사지역내 퇴적물에 대한 중금속 함량 수준을 국외의 다른 지역들에 대한 연구결과들과 비교할 때 전체적으로 인천주요갯벌은 중금속 오염의 영향을 크게 받지 않은 것으로 평가되었다.

4. 농집지수를 통한 중금속 오염도 평가

중금속에 대하여 자연적인 상태에 비해 인위적인 영향을 어느 정도 받았는지 평가하기 위해 농축계수(Enrichment factor)를 구하는데 이는 퇴적물 중의 중금속이 얼마나 농축되었는지를 판단하는 지표로 사용된다. 농축계수가 1이하인 경우는 중금속에 의한 오염이 거의 되지 않은 상태로 보고, 농축계수가 1을 초과하면 인위적 영향을 받고 있는 것으로 판단할 수 있다. 기준원소로는 원소기원에 대하여 보존성이 강한 원소인 Al을 선택하였고 이를 통해 농축계수를 산정하는 방법은 아래식과 같다.

$$\text{농축계수} = \frac{(\text{시료중의대상원소함량} / \text{시료중의알루미늄함량})}{(\text{지각중의대상원소함량} / \text{지각중의알루미늄함량})}$$

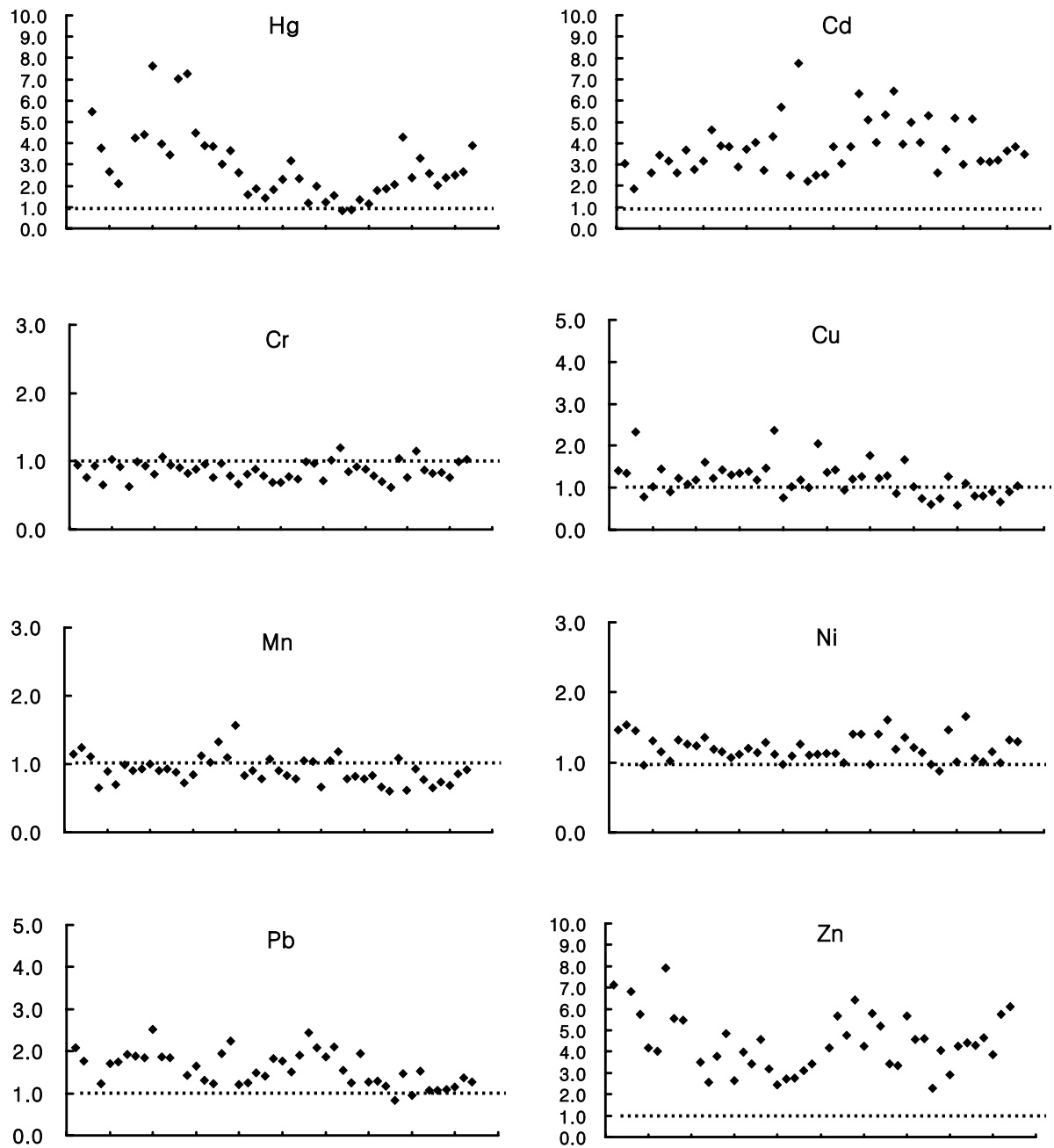
식에서 제시된 지각중의 대상원소 및 알루미늄 함량은 그 지역에서 역사적으로 오염되지 않은 자연적인 농도를 적용하여야 하지만 인천주요갯벌의 자연적 농도는 현재까지 연구된 바가 없어 이번 연구에서는 일반적으로 활용하는 Taylor (1964)가 제시한 지각 중의 원소함량을 적용하였다.

[Table. 11] 중금속별 농축계수

농축계수	Hg	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
동 막	5.8	3.6	0.9	1.3	1.0	1.3	2.0	6.7
황산도	4.3	3.8	0.9	1.4	1.0	1.2	1.9	3.5
장화리	2.8	3.8	0.9	0.9	0.8	1.2	1.2	4.3
영흥도	2.1	3.7	0.8	1.3	0.9	1.1	1.6	4.3
영종도	1.4	4.8	0.9	1.2	0.9	1.3	1.7	4.8

Table. 11에 나타난 지역별 평균 중금속 농축계수 분석결과를 살펴보면 Cr, Mn 은 전지역에서 농축계수가 1이하로 거의 오염되지 않은 것으로

보이고 Cu, Pb, Ni의 경우는 1~2의 범위로 인위적인 영향이 다소 있는 것으로 판단된다. Hg, Cd은 일부지역에서는 4이상의 농축계수를 보이며 중금속이 농축되고 있음을 지시하며 Zn은 전지역에서 4이상의 값을 보이며 다른 금속에 비해 외부에서의 이차적 공급 및 오염의 영향이 있는 것으로 나타났다. 좀 더 자세히 살펴보기 위해 표층퇴적물 47개에 대한 각각의 중금속별 농축계수를 Fig. 17에 나타내었다.



[Fig. 17] 전체 조사지역에 대한 중금속별 농축계수

전체 정점에 대한 각 중금속의 평균 농축계수는 $Zn > Cd > Hg > Pb > Ni \approx Cu > Mn > Cr$ 의 순이었으며, 농축계수가 높게 나타난 Hg, Cd, Zn이 다른 금속들에 비해 지점에 따른 값의 변화폭도 크게 나타났다.

5. 갯벌 퇴적물 오염등급


이번 연구에서 조사한 결과를 바탕으로 현재의 인천갯벌퇴적물의 환경적 상태를 보다 객관적으로 파악하기 위해서 오염도 등급을 산정하여 보았다. 아직 국내에는 갯벌에 대한 객관화된 오염도 기준이 제시되어 있지 않으므로 국토해양부에서 시행된 『갯벌생태계 조사 및 지속가능한 이용방안 연구(2005. 6)』¹¹⁾에서 제시한 갯벌 등급기준을 참고로 하여 인천 주요 갯벌의 퇴적물 오염도 등급을 산정하였다. 앞서 언급한 국토해양부의 연구에서 제시된 갯벌 등급 평가를 위한 기준항목은 모두 5개로 갯벌 퇴적환경, 염생식물, 대형저서생물, 갯벌 오염, 바다 조류 이며, 각 항목에는 기준을 만들어 종합적으로 분석하여 5개의 등급으로 나누어 결정되었다. 본 연구에서는 제시된 여러 가지 항목 중 갯벌오염도 항목만을 대상으로 하여 등급을 결정하였다. 갯벌 퇴적물에 대한 오염도 등급 산정은 아래 Table. 12와 같이 COD와 AVS를 기준으로 하여 나뉘지며 각각의 항목은 7등급으로 구분되고 두 항목의 등급별 점수를 합하여 최종적으로 퇴적물 오염도에 대해서 Table. 13에 따라 5등급으로 나뉘지게 된다.

[Table. 12] COD와 AVS에 대한 퇴적물 오염도 등급

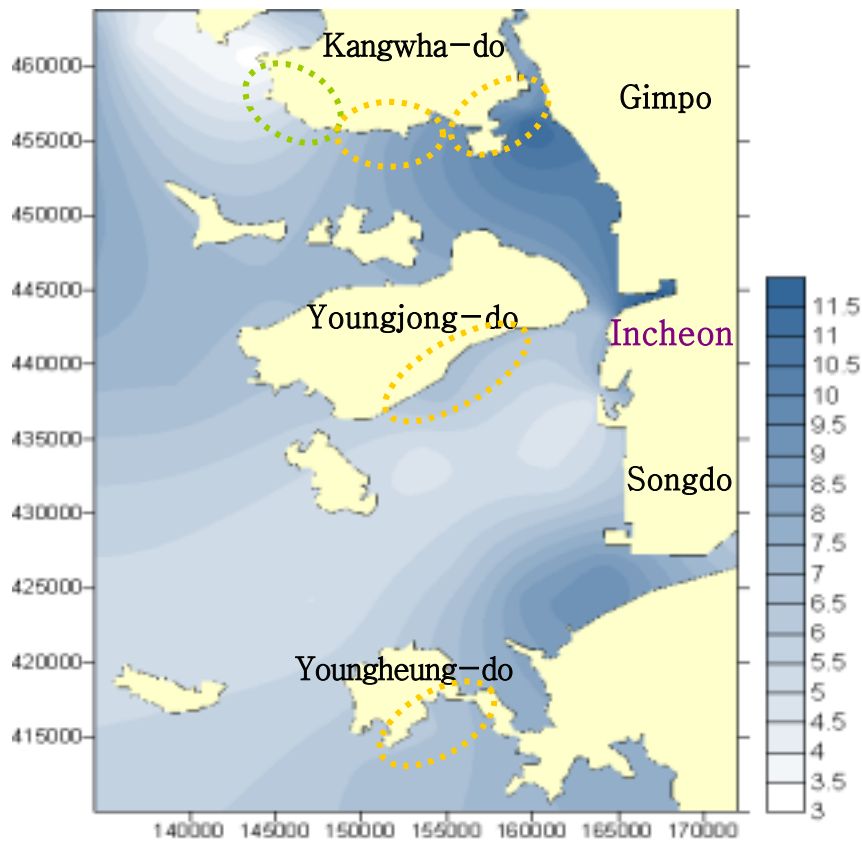
구분	COD(mg/g · dry weight)							AVS(mg/g · dry weight)						
	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	6등급	7등급	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	6등급	7등급
	5이하	5	10	15	20	25	30	0.05	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
점수	0	8.3	16.7	25.0	33.3	41.7	50.0	0	8.3	16.7	25.0	33.3	41.7	50.0

[참고] 국토해양부 2005. 6

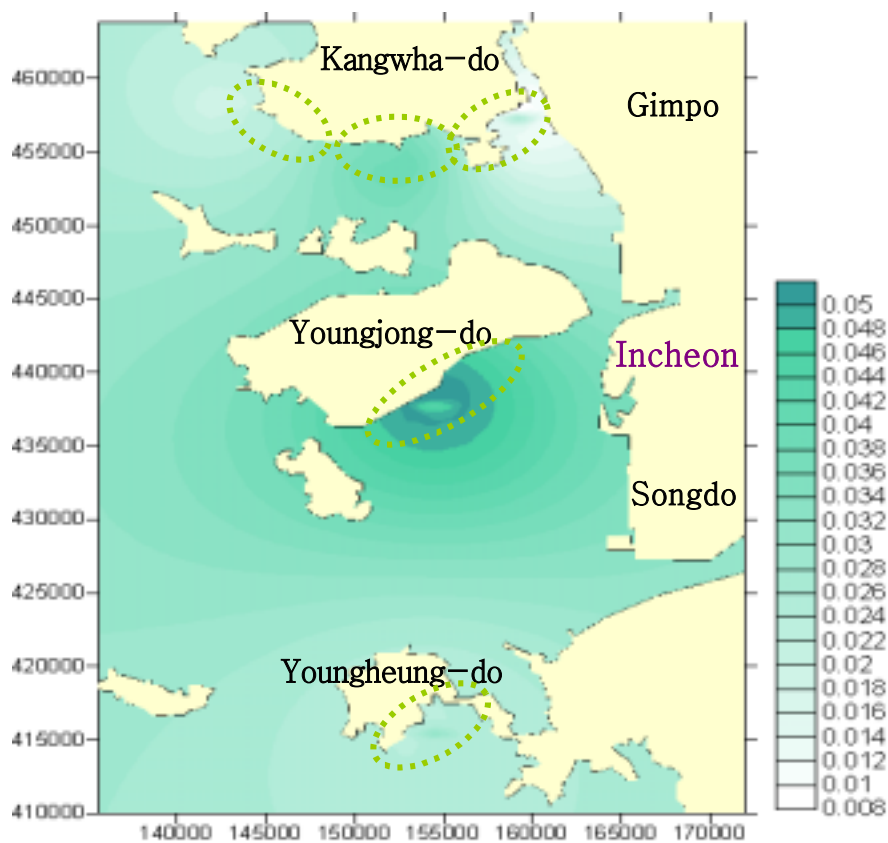
[Table. 13] 갯벌 퇴적물 오염도 등급

등 급	점 수	비 고
I	0~20	<div style="text-align: center;">  </div>
II	20~40	
III	40~60	
IV	60~80	
V	80~100	

[참고] 국토해양부 2005. 6



[Fig. 18]
COD 등농도 분포도



[Fig. 19]
AVS 등농도 분포도

COD와 AVS에 대한 지역별 등급을 살펴보기 위해서 등농도 지도를 Fig. 18~19에 각각 나타내었다. 항목별 등급을 보면, 평균 COD의 경우 Fig. 18에 연두색 점선으로 표시된 강화 장화리지역에서 I 등급으로 나타났고, 나머지 지역에서 대해서는 II 등급(노란색 점선)으로 산정되었으며, 지역별 평균 AVS는 전 조사대상지역 모두 I 등급으로 나타났다. Fig. 20~26은 전체 조사대상지점 47개에 대한 각 지점마다의 COD 및 AVS의 등급지도를 나타낸 것으로 1등급은 연두색(●), 2등급은 노란색(●), 3등급은 주황색(●)으로 표시하였다. COD에 대한 등급지도는 본 연구에서 조사된 갯벌의 현황과 우리원에서 수행된 연안지역 오염도 조사 결과를 비교하기 위하여 등급별 색상은 동일하게 표시하고 갯벌지점과 구별하기 위해 사각형태로 표시하였다. 강화 장화리 지역의 경우 한 지점을 제외한 나머지 9개 지점에서의 COD값이 1등급 수준의 낮은 농도를 나타내었고, AVS에 대하여는 동막지역의 일부 2개 지점에서만 2등급 수준의 농도를 보였다.



[Fig. 20]
강화지역 COD 등급지도

갯벌		연안	
1등급	●	1등급	■
2등급	●	2등급	■
3등급	●	3등급	■



[Fig. 21]
강화지역 AVS 등급지도

갯벌		연안	
1등급	●	1등급	■
2등급	●	2등급	■
3등급	●	3등급	■



[Fig. 22]
영흥지역 COD 등급지도

갯벌		연안	
1등급	●	1등급	■
2등급	●	2등급	■
3등급	●	3등급	■



[Fig. 23]
영흥지역 AVS 등급지도

갯벌		연안	
1등급	●	1등급	■
2등급	●	2등급	■
3등급	●	3등급	■

영흥도의 경우, COD에 대하여 대부분의 조사지점에서 2등급 수준의 농도 분포를 보였고, 영흥도 남서쪽 끝자락에 위치한 연안지역 조사지점에 대해서도 2등급으로 나타나 유사한 결과를 보였다.

Fig. 24~25의 영종도 지역에 대한 결과를 살펴보면, COD와 AVS 모두 각 조사지점에 대해 1~3등급의 다양한 분포를 나타냄을 볼 수 있는데, 이는 송도 인근의 매립현장 및 인천대교 건설 등의 공사가 이루어지는 주변환경의 영향을 받은 것으로 생각된다.



[Fig. 24]
영종지역 COD 등급지도

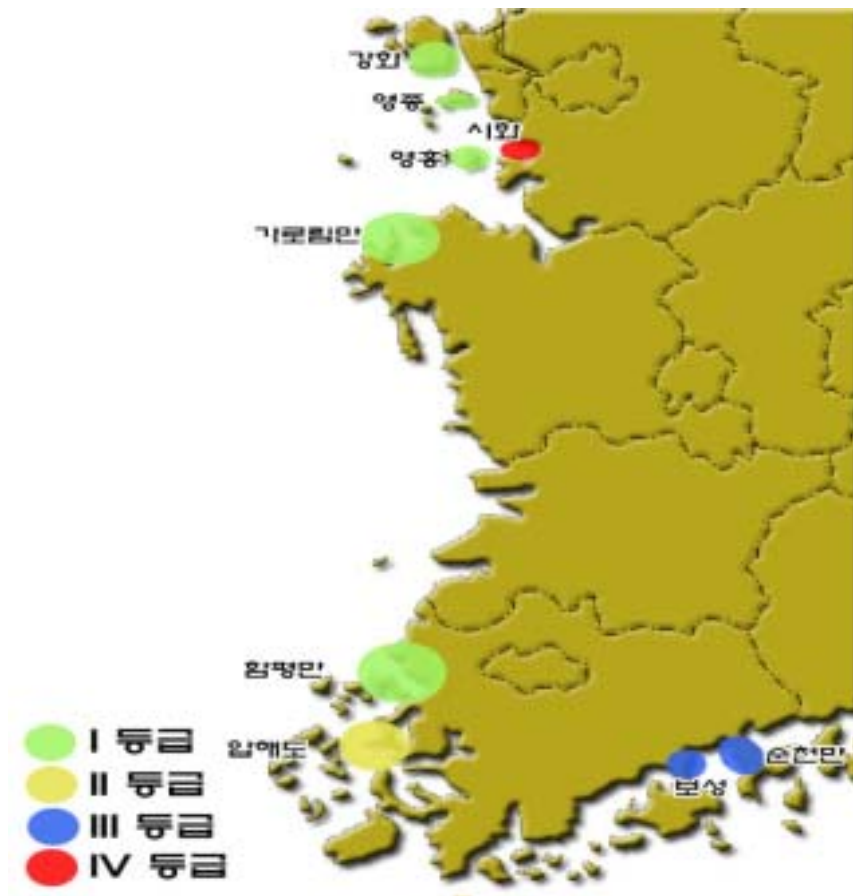
갯벌		연안	
1등급	●	1등급	■
2등급	●	2등급	■
3등급	●	3등급	■



[Fig. 25]
영종지역 AVS 등급지도

갯벌		연안	
1등급	●	1등급	■
2등급	●	2등급	■
3등급	●	3등급	■

COD와 AVS에 대한 각 항목별 점수를 합하여 최종 퇴적물 오염등급을 산정한 결과 본 연구에서 조사된 인천 강화, 영종, 영흥 지역 모두 가장 청정한 상태인 I 등급의 환경으로 산정되었다. 다른 지역 갯벌퇴적물의 오염도 등급과 비교해보기 위하여 국토해양부에서 조사된 서남해안 연안의 결과⁶⁾와 함께 갯벌 퇴적물 오염등급지도를 Fig. 26에 도시하였다. 인천 주요갯벌과 함께 충청도 가로림만, 전라도 함평만이 I 등급의 청정한 상태를 보이고, 전라 압해도 갯벌은 II등급, 보성, 순천만 갯벌은 III등급으로 나타났고 시화호에서는 IV등급으로 가장 불량한 퇴적물 오염환경을 보였다.



[Fig. 26] 인천연안 갯벌과 서남해안 갯벌의 오염등급지도

V. 결론

인천 주요 갯벌에 대한 퇴적물의 구조적 특징과 이화학적 분석을 수행하여 오염현황을 파악해보았다.

표층퇴적물에 대한 입도분석 결과, 전체적으로 silt질이 우세하게 분포하는 가운데 사질이 추가된 경향을 나타내었고 영흥지역의 경우 다른 지역과는 달리 사질과 실트질이 비슷한 범위로 분포하는 경향을 보인다. 강화지역의 경우, 강화 남서부에 위치한 장화리의 갯벌 퇴적물이 모래함량이 30%로 평균입경이 가장 크고, 남부에 위치한 동막, 남동부의 황산지역은 모래함량 20% 미만으로 서쪽에서 동쪽 방향으로 입도의 세립화가 진행되는 것으로 판단된다.

함수율을 조절하는 주요인으로 알려져 있는 $63\mu\text{m}$ 이하의 니질(silt+clay) 함량과 함수율의 관계를 살펴보면 니질함량이 높을수록 수분함량이 많고 다른 지역보다 니질함량이 낮은 영흥에서 최저 평균 함수율을 나타냄을 볼 수 있었다.

COD와 강열감량 등 유기물 오염지표 관측결과, 전체적으로 장화리에서 낮은 수준을 보였고 연구대상지역 모두 시화호나 경기연안 다른 지역에 비해 낮은 농도로 관측되었고 일본의 수산환경기준과 비교시에도 기준이내로 나타나 양호한 저서생태환경을 갖는 것으로 판단된다.

중금속 분석결과, 대부분의 중금속이 황산지역에서 상대적으로 높은 농도를 보이는데 이것은 상대적으로 작은 평균입경을 갖는 퇴적물의 구조적 특성과 이차 오염원인 한강하구로부터의 부유 퇴적물 유입의 가능성이 높고 동검도에 설치된 다리로 인한 원활한 해수유입의 차단 등의 지리적 위치 특성에 기인한 것으로 보인다. 그러나 외국의 연안퇴적물 환경기준과 국내 다른 지역 조사결과와 비교해 볼 때 중금속에 의한 인천갯벌의 오염은 미미한 수준인 것으로 사료된다. 그리고 중금속 원소 중 Zn은 농축계수가 4이상으로 높고 서남해안 타 지역조사 결과와 비교해볼 때도 높은 수준을 보였는데 우리 연구원에서 지속적으로 조사되고 있는 인천 연안 및 특정지역의

퇴적물에서도 Zn이 전반적으로 높은 값을 보이는 것을 고려해 볼 때 , Zn은 인위적 경제활동으로 인한 오염보다는 지각의 침식환경 등 자연적 요인에 의해 지배되는 것으로 생각된다. 따라서 정확한 원인 파악을 위해서는 인천 연안 중 가장 오염이 되지 않았다고 생각되는 청정한 해역의 퇴적물을 채취하여 Zn의 배경농도를 측정해 보는 것이 필요할 것으로 판단된다.

47개 정점 중 대표지점 9곳을 선정하여 채취한 주상퇴적물 분석결과, 입도와 중금속 등에 대해 전반적으로 상부에서 하부로 뚜렷한 변화를 보이지 않는데 이는 인천연안의 경우 조수간만의 차가 최대 10m로 매우 커 퇴적층이 교란되어 나타난 현상으로 추정되며, 향후 인천 갯벌 퇴적물에 대한 조사시에는 조사지점과 시료깊이를 100cm 이상으로 하여 보다 정밀하고 체계적인 분석이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

퇴적물에 존재하는 유기물의 총량을 나타내는 강열감량과 입경 $63\mu\text{m}$ 이하인 니질(silt+clay)함량간의 유의한 정의 상관성을 보여 인천갯벌 퇴적물에서의 유기물 함량이 입도의 영향을 받고 있는 것으로 사료된다.

연안지역 해수질과 갯벌 퇴적물에 대한 오염도 비교결과 Cu, Pb의 경우 영종지역에서 가장 높은 수준을 보이고 영흥 지역에서 낮게 나타나는 유사한 양상을 보인다. 이러한 추세로 볼 때 Cu, Pb은 퇴적물의 입도구조 등의 특성에 의한 축적은 그 영향이 적을 것으로 예상되며 Pb은 육상오염원 뿐 아니라 대기를 통한 유입에 의한 영향이 크게 작용하는 중금속인 것으로 볼 때 Cu, Pb의 경우는 외부 오염원에 의한 영향을 다소 받는 것으로 판단된다.

이렇게 조사된 인천 주요 갯벌의 환경상태를 보다 객관적으로 나타내보고자 국토해양부에서 제시된 COD와 AVS 결과를 활용한 갯벌 퇴적물에 대한 오염도 등급기준에 따라 등급을 산정해 본 결과 강화, 영종, 영흥 모두 가장 청정한 상태인 I 등급으로 나타났다.

인천 주요갯벌의 환경적 특성을 조사해본 결과, 대상지역들은 유기물 및 중금속에 대한 오염이 거의 없는 청정한 생태환경을 보이는 것으로 판단되며 이를 보호하기 위한 노력이 계속되어야 할 것으로 생각된다. 앞으로 보다 심도 있는 갯벌의 환경적 특성 조사를 위해서는 넓은 인천연안 갯벌을 대표할 수 있는 다양한 채취지점의 확대 선정 및 조차가 큰 인천연안특성을 고려하여 약 100cm이상 깊이의 coring을 통한 주상퇴적물 시료분석 등에 대한 추가연구가 계속되어야 할 것으로 생각되고, 중금속 오염에 대한 보다 확실한 원인분석을 위해서는 무엇보다도 인천연안의 중금속 배경농도에 대한 조사가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

VI. 참고문헌

1. 인천연안 갯벌의 현황과 보전방안, 이대영, 인천발전연구원, 1999.7
2. 한국 서해 강화갯벌의 퇴적물 특성, 우한준, 한국해양연구원
3. 진해만 표층수와 표층퇴적물 중의 중금속 분포, 김경태, 한국해양연구원 해양환경연구본부, 해양환경안전학회 춘계학술발표대회, 2007
4. 서해 중부연안 조간대 퇴적물내 중금속 분포 및 특성, 황갑수, 군산대 토목환경공학부, 한국환경위생학회지, 제29권(제5호), 2003
5. 영일만 해역 표층퇴적물의 금속분포특성, 이미경, 한양대학교 토목환경공학과, 대한환경공학회, 2004
6. 경인지역 갯벌 오염현황조사, 해양수산부, 2003
7. 가막만 표층퇴적물 중 유기물량의 시·공간적 분포 특성, 노일현, 여수대 해양시스템학부, 2006, 한국해양환경공학회지
8. 강화도 갯벌 퇴적물의 산소요구량과 탈질소화의 계절변화, 안순모, 부산대 해양학과, 2005, 해양학회지[바다]
9. 강화도 남단 갯벌의 혐기성 유기물 분해능과 황산염 환원력 및 저서 동물이 이에 미치는 잠재적 영향, 목진숙, 한국해양연구원 해양생물자원연구본부, 2005, 해양학회지[바다]
10. 강화도 장화리 조간대의 퇴적특성, 오재경, 인하대학교 해양학과, 한국지구과학회지, 2006.
11. 갯벌 생태계 조사 및 지속가능한 이용방안 연구, 해양수산부, 2005.6
12. 갯벌의 돌말류(규조류) 및 엽록소-a 분포, 해양수산부
13. 가마미 해수욕장(전남 영광) 갯벌의 미세조류 분포에 관한 연구, 이학영, 전남대 생명과학부, 한국환경과학회지, 2003
14. 공소만 조간대에서 Salts, DIP, TDN의 물질수지, 정용훈, 군산대학교 해양학과, 2006, 해양학회지[바다]
15. 공극수 모델로 추정된 강화도 갯벌의 탈질산화 작용, 나태희, 부산대학교 해양학과, 2005, 해양학회지[바다]
16. 광양만 및 여수해만 표층퇴적물의 지화학적 특성과 중금속 오염, 현상민, 한국해양연구원 남해연구소, 해양학회지[바다], 2003
17. 광양만 표층퇴적물의 중금속 함량 및 분포, 조영길, 목포대학교 해양자원학과, 2000, 해양학회지[바다]
18. 남해 대륙붕 표층퇴적물 중 중금속 원소의 분포특성, 조영길, 서울대학교 해양학과, 1994, 한국해양학회
19. 득량만 표층퇴적물 중 유기물의 시공간적 분포 및 기원, 윤양호, 여수대학교 해양시스템학부, 한국환경과학회지, 제12권(제7호), 2003
20. 법성만 갯벌의 지형 및 퇴적물의 입도특성분석, 이윤화, 경북대학교, 한국지형학회지, 2005
21. 새만금 갯벌의 입도조성과 유기물질 분포특성, 유선재, 군산대학교 토목환경공학부, 2003, 한국수산학회지
22. 새만금 조간대 표층 퇴적물의 성분원소 함량과 지화학적 특성, 조영길, 목포대학교 해양자원학과, 2001, 해양학회지[바다]
23. 서남해안 연근해저 퇴적물의 중금속 함량 및 분포, 전수경, 목포대학교 해양자원학과, 한국환경과학회지, 제11권(제12호), 2002
24. 시화호 퇴적물의 수은분포, 나공태 외, 한국해양연구소, 한국해양환경공학회 춘계학술대회,

2000

25. 전남 무안 갯벌퇴적물에 관한 광물학적 및 생지화학적 연구, 노열, 전남대 지구환경과학부, 한국광물학회지, 2007.3
26. 제주도 해안의 부착규조류와 군집구조의 생태학적 특성, 이준백, 1999, 제주대학교 해양과학대학
27. 조간대성 해빈 퇴적물의 이동양상에 관한 연구(I . 한국남해안의 득량만), 류상옥, 목포대학교 갯벌연구소, 한국지구과학회지, 제27권(제2호), 2006.4
28. 진해만 입구해역의 표층퇴적물 특성과 저서환경, 현상민, 한국해양연구원 남해연구소, 한국수산학회지, 2003
29. 천수만 연안해역 표층퇴적물의 지구화학적 조직특성, 서만석, 군산대학교 해양생산학과, 한국수산학회지, 1998
30. 천수만 황도갯벌의 퇴적환경, 우한준, 한국해양연구원 해저환경자원연구본부
31. 한강하구역의 수질 및 퇴적물 특성의 공간적 분포, 신영규, 국립환경과학원, 경관생태과, 한국지형학회지, 제12권(제4호), 2005
32. 한국동해안 영일만 표층 퇴적물의 금속함량과 공간변화 특성, 엄인권, 한국해양연구원 극지연구본부, 한국지구과학회지, 2003.8
33. 한국 서해 천수만 선현세 간월도 퇴적층의 퇴적환경, 임동일, 한국해양연구원 해양환경기후연구본부, 2002, 해양학회지[바다]
34. 한반도 남해안 광양만 표층퇴적물 입도의 시·공간적 변화, 류상옥, 전남대학교 지구환경과학부, 2003, 해양학회지[바다]
35. Origin and composition of organic matter in tidal flat sediments from the German Wadden Sea, Elke Freese, Jurgen Koster, Jurgen Rullkotter, 2008, Organic Geochemistry, vol. 39, pp.820~829
36. Abundance of Chemical elements in the continental crust : a new table, Taylor, S. R. , 1964,
37. THE RELATIONSHIP BETWEEN ADSORPTION OF HEAVY METAL AND ORGANIC MATTER IN RIVER SEDIMENTS, Jih-Gaw Lin and Shen-Yi Chen, 1998, Environment International, Vol. 24. No. 3, pp. 345-352
38. The distribution of heavy metals in the Sidi Moussa lagoon sediments (Atlantic Moroccan Coast), M. Maanan, B. Zourarah, C. Carruesco, A. Aajjane, J. Naud, 2004, Journal of African Earth Sciences Vol. 39, pp. 473~483
39. Use of atomic absorption spectrometry for the determination of metals in sediments in south-west Louisiana, James N. Beck, Joseph Sneddon, 2000, Microchemical Journal, Vol. 66, pp. 73~113
40. Accumulation characteristics of heavy metal Pb, Cu, Zn in Wanggang tidal flat based on Renyi theory, Yu Wenjin, Zou Xinqing, Zhu Dakui, 2007, Acta Ecologica Sinica, Vol. 27, No. 8, pp. 3162-3171
41. The spatial and temporal distribution of heavy metals in sediments of Victoria Harbour, Hong Kong, Chloe Wing-yee Tang, 2008, Marine Pollution Bulletin, Vol. 57, pp. 816-825