

## 시화호 형도 갯벌의 지화학적 특성 분석

이 준 호\*+ / 정 갑 식\*\* / 우 한 준\*\*\* / 조 진 형\*\*\*\* / 이 승 용\*\*\*\*\* / 장 석\*\*\*\*\*

### Analysis of Geochemical Characteristics in the Intertidal Zone of Hyung-Do, Shi-Hwa Lake

Jun Ho Lee\*+ / Kap Sik Jeong\*\* / Han Jun Woo\*\*\* / Jin Hyung Cho\*\*\*\*  
/ Seung Yong Lee\*\*\*\*\* / Seok Jang\*\*\*\*\*

**요약** : 시화호 형도 근처 조간대(帶, intertidal zone) 지역 갯벌의 퇴적환경을 알아보기 위해 10개 정점 표층 및 2개 정점 주상퇴적물에 대한 입도, 함수율, 휘발성산화합물(Acid Volatile Sulfide; AVS), 총유기탄소(Total Organic Carbon; TOC) 및 중금속(Al, Fe, Mn, Cu, As, Pb, Zn, Ni, Cd 및 Cr) 항목에 대해 분석 하였다. 표층 퇴적물은 대체로 분급이 불량(분급도, 0.60~2.31φ)한 sandy Silt, slightly gravelly muddy Sand, silty Sand 및 Sand 등의 퇴적상으로 구분되며, 평균입도는 2.95~6.00φ로 극조립 실트(Silt)에 해당한다. 표층 퇴적물의 Al 함량은 1.54%, Fe은 1.75%, Cu는 9.1ppm, As는 1.1ppm, Pb은 18.8ppm, Ni은 11.0ppm, Cd은 0.02ppm 그리고 Cr은 30.1ppm으로 측정되었으며, 주상 퇴적물 또한 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) 기준의 ERL(Effective Range Low, 저서생물에 독성을 보이는 초기 10% 농도)을 초과 하지 않았다. 주상퇴적물의 과잉 방사능 납(<sup>210</sup>Pbex)의 분포를 통해 퇴적물을 추정 한 결과, 급격한 퇴적물의 다량 유입에 의해 수직적으로 방사능(activity)이 유사한 값을 나타내고 있어 정확한 퇴적률(apparent sedimentation rate)은 추정할 수 없었다. 그러나 2개 코어 상부 35cm 에서 퇴적물의 급격한 유입 및 환경적 영향등으로 금속 농축계수(Enrichment factors; EF) 계산값은 비교적 높게 나타났다.

**핵심용어** : 시화호 퇴적환경, 연안대, 표층 및 코어 퇴적, 농축계수, 중금속

**Abstract** : In order to understand the sedimentary environment of the southern intertidal zone of Shihwa Lake, west coast of Gyeonggi-do, 10 surface and 2 core sediment samples were analysed for grain size, water content, AVS (Acid Volatile Sulfide), TOC (Total Organic Carbon), concentrations of metals (Al, Fe, Mn, Cu, As, Pb, Zn, Ni, Cd, and Cr). The surface sediments are generally poorly sorted (0.60~2.31 φ) sandy Silt, slightly gravelly muddy Sand, silty Sand, Sand with mean grain size of 2.95 to 6.00 φ. The sediments contain Al (1.54%), Fe (1.75%), Cu (9.1ppm), As (1.1ppm), Pb (18.8 ppm), Ni (11.0 ppm), Cd (0.02 ppm), and Cr (30.1 ppm) on the average. Heavy metals are concentrated less than ERL (Effect Range-Low), verified by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). In the core sediments, they are also less than the ERL. Based on the uniform vertical distribution of excess radioactivity of <sup>210</sup>Pb, the core sediments seen to have been actively mixed biologically or rapidly deposited after the construction of Shi-Hwa Seawall. The 'enrichment factor' of metals, normalized to Al, shows that the upper sediments of 35 cm in depth are more polluted. In fact was significant in 2 core sediment samples in 35 cm below layer.

**Keywords** : Shi-Hwa Lake sedimentary environment, Intertidal zone, Surface and core sediments, Enrichment factors, Heavy Metals

+ Corresponding author : leejh@kordi.re.kr

\* 정회원 · 한국해양연구원 해양방위연구센터 · 박사과정 · E-mail : leejh@kordi.re.kr

\*\* 정회원 · 한국해양연구원 해양방위연구센터 · 이학박사 · E-mail : ksjeong@kordi.re.kr

\*\*\* 정회원 · 한국해양연구원 해양방위연구센터 · 이학박사 · E-mail : hjwoo@kordi.re.kr

\*\*\*\* 비회원 · 한국해양연구원 해양방위연구센터 · 이학박사 · E-mail : jcho@kordi.re.kr

\*\*\*\*\* 비회원 · 한국해양연구원 해양방위연구센터 · E-mail : sy8988@kordi.re.kr

\*\*\*\*\* 비회원 · 한국해양연구원 해양방위연구센터 · E-mail : sjang@kordi.re.kr

## 1. 서 론

경기도 안산시·시흥시·화성시에 걸쳐 있는 약 56.5km<sup>2</sup>의 인공호수인 시화호는 농어촌진흥공사가 시화지구 대단위 간척종합개발 사업의 일환으로 1987년 4월부터 1994년 1월 24일까지 6년 만에 걸친 공사 끝에 시화방조제 완공 후 ‘죽음의 호수’로 불릴 정도로 수질이 악화되었으며, 잘못된 연안개발정책으로 인한 환경파괴를 극적으로 보여주고 있다. 또한 환경보전을 고려하지 않는 간척 매립의 피해를 실증해 보임으로써 새만금 방조제의 건설에 제동을 걸게 하는 결정적인 계기를 제공하였다. 시화 방조제 건설로 인해 조성된 시화호 남북측 간석지에 대한 개발이 추진되면서 시화지구 개발 사업으로 조성된 공단과 신도시의 수질 환경오염이 가중되어 후속대책으로 지속적인 수질개선 노력 결과 1997년 20.8mg/l에 달하던 화학적산소요구량(COD)이 2000년에는 3.9mg/l로 줄어들어 점차 개선되고 있지만, 여전히 악취, 수질오염 등 환경문제가 해결되지 않고 있는 상태이다(해양수산부, 2004; 국토해양부, 2009). 그리고 2007년 반월공단, 신길천 주변, 호수 중앙지역 표층퇴적물에서 중금속이 높게 축적되었으며, Cu, Pb를 제외하면 Al과 상관성이 높은 결과를 나타내었다. 그리고 조력발전소 건설지역과 가까운 지역에서는 Cr, Ni, Cd, Zn 등의 중금속 항목들은 ERL(저서생물에 독성을 보이는 초기 10% 농도)을 초과하였다고 보고 되고 있다(해양수산부, 2007). 최근 2009년 시화호의 중금속 환경은 전반적으로 외해수 유입에 따라 오염도가 다소 개선되고 있으나, 공단 주변 및 수심이 깊은 곳에서 높은 농도를 보이고, 축적 과정을 반영하는 퇴적물에서는 여전히 높은 농도를 나타내고 있어 외해수의 유입에 의한 효과가 제한적인 것으로 판단된다(국토해양부, 2009).

연안환경에서 퇴적물의 지화학적인 특성을 이

해하는데 있어 퇴적환경, 생태계, 오염현황 등 6개 분야 15개 대분류 항목의 중점조사 항목으로 나누어지며, 오염현황에 중금속(Cu, Cd, Pb, Zn, Fe 및 Mn) 및 유기물(COD, AVS, TC 및 TN)들로 분류된다. 그리고 연안습지의 유형과 면적, 일반적인 생물상, 조사 지역 위치 및 어업활동 등 조사를 위한 일반조사 항목으로 분류된다. 따라서 시화호 형태의 습지주변은 유역권으로 보았을 때 한강서해권의 인구가 밀집되어 그 중요성이 강조되고 있어 과학적 지식에 근거한 습지환경 특성 파악이 중요시 되고 있다(환경부, 2007).

우리나라에는 해양 퇴적물 관리를 위한 기준이 마련되어 있지 않아, 미국 NOAA의 ERL(Effect Range-Low) 및 ERM(Effect Range-Median)과 비교하였다(Long 등, 1995), ERL과 ERM은 각 매체간의 평형관계, 생물의 독성평가 및 퇴적물의 오염물질과 생물에 대한 영향 등 각각적인 오염평가 방법을 포괄적으로 함축하여 제시한 것으로 생물학적인 반응이 측정된 방법과 오염물질의 농도에 따른 반응 정도가 포함되어 있다. 따라서 ERL과 ERM은 오염질의 농도 증가에 따른 생물 영향의 정도를 순서대로 나열하였을 때 각각 하위 10%와 50%에 해양생물에 위해영향을 미치는 기준을 의미한다(국토해양부, 2009).

이번 연구는 시화호 서측 남양면과 송산면 일원 약 54.69km<sup>2</sup> 면적의 생태환경과 관광·레저 사업, 그리고 주거가 어우러진 친환경 복합도시 송산 그린시티(Green City) 사업 및 시화호 북측 멀티 테크노밸리(Multi-Techno Valley; MTV) 사업(화성시문화재단, 2009)등으로 시화호 남측에 위치한 형도는 시화방조제 건설이전의 퇴적층과 방조제 건설 이후 농로 건설로 인한 급격한 퇴적물 유입으로 대규모의 환경변화가 되었으리라 판단된다. 따라서 2010년 6월 시화호 형도근처 표층퇴적물 및 주상퇴적물 정점을 선정하여 퇴적물 특성을 파악하여 퇴적환경 및 중금속 농도 특성 등을 알아보고 어떠한 항목 및 요인들이 크게 작용하는 가를 알아보고자 한다(Fig. 1).

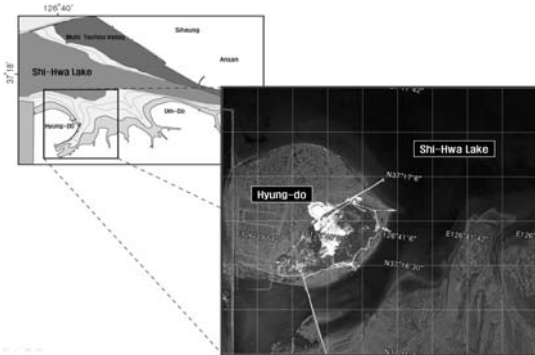


Fig. 1. Location map of Hyung-do in Shi-Hwa Lake intertidal zone (<http://maps.google.co.kr>, 2011)

## 2. 연구지역 개관

### 2.1. 형도

시화호 중앙부 남측에 위치한 형도(衡島)는 경기도 화성시 송산면 독지리에 딸린 섬으로 면적은 약 0.64 km<sup>2</sup>이다. 또한 형도는 남서쪽 송산면 독지리 해안으로부터는 약 2km 거리에 있으며 지명 이름은 바닷물이 어느 정도 들어왔나 알아보는데 기준이 되는 섬이라 하여 저울섬이라고도 하였다. 옛날에는 봉수대가 있던 섬으로 시화호 간척사업으로 섬과 육지 사지에 도로가 생겼다. 섬은 대체로 둥근 모양이며 최고점 섬 중앙 고도는 약 126.5m이다(해양수산부, 2004). 여기에 위치한 990,000m<sup>2</sup> 규모의 형도 앞 습지는 천연기념물이자 멸종 위기 동물들이 다수 서식하거나 도래하는 곳으로 황새(천연기념물 199호)를 비롯한 큰고니(천연기념물 201호), 저어새와 노랑부리저어새(천연기념물 205, 205-2호) 및 검은머리물떼새(천연기념물 236호) 등 희귀 철새들의 서식지이다. 이외에 이 형도 지역 시화호 건너편 복합도시 송산그린시티(Green City)사업은 시화호 남측간척지를 동북아 경제성장에 대비한 미래형 레저 복합도시로 개발하겠다는 중장기적인 개발사업이다. 지난 2008년 3월에 송산그린시티 개발계획을 고시

해 2010년 1월 전체적인 환경영향평가가 완료된 상태다. 이 개발계획은 2007년부터 2022년까지 16년간에 걸쳐 진행되며 사업면적은 총 55.82km<sup>2</sup>이다(화성시문화재단, 2009).

### 2.2. 현장조사 시기 및 지형적 특성

현장조사는 시화호 배수갑문 조작운영 계획에 따라 2010년 6월 15일부터 16일까지 표층퇴적물 및 주상퇴적물을 샘플링 하였다. 기존 연구결과에 의하면 시화호로 유입되는 하천 내 퇴적물 및 지속성 유기오염물질의 농도는 공단유역을 흐르는 하천에서 최고 농도를 보였으며, 농업지역에 비해 최대 400배 이상 높았다. 따라서 시화호로 유입되는 하천수 및 하천 퇴적물내 높은 농도의 중금속 및 지속성유기오염물질은 강우시 재부유(resuspension)되어 시화호로 직접 유입이 되어 주요한 오염원으로 시화호 퇴적환경뿐만 아니라 서식하는 해양생물에서 영향을 미치기 때문에 지형학적으로 형도는 시화호 중앙부 남측에 해당하므로 모니터링의 일환으로 그 위치가 시화호 환경변화와 상대적으로 연관된다(국토해양부, 2009). 2009년 형도 북쪽 시화호 내측 표층퇴적물의 유기탄소와 화학적산소요구량(COD)는 상류지역 및 호 중앙지역에서 높은 값을 보였으며, 시화호 저층 퇴적환경은 표층수괴로부터 지속적으로 공급되는 유기물이 퇴적되어 미생물에 의해 분해되면서 퇴적물 내 인산염, 암모니움염 등이 재 용출되며 산소를 소비하여 저층의 용존 산소를 고갈 시키고 있음이 보고되고 있다. 또한 표층퇴적물내 중금속 공간적 분포의 경우 오염원이 존재하는 공단과 신길천 부근, 호수의 중앙에서 높았으며, 배수갑문 주변에서 낮은 농도를 보여 해수화에 의한 효과를 반영하고 있어 시화호 중앙과 가까이 위치한 형도 또한 그동안의 시화호 모니터링 결과값과 상대적으로 비슷할 것으로 예상되나 형도 자체의 세부 결과데이터는 많이 부족한 편이다(국토해양부, 2009).

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1. 표층과 주상퇴적물 채취

시화호 형도 주변의 조하대와 갯벌 지역 표층 퇴적물 분포, 중금속 및 산휘발성황화합물(Acid Volatile Sulfide; AVS), 유기탄소량(Total Organic Carbon; TOC) 특성 등을 파악하기 위하여 형도 북쪽 도로 방조제 2개 정점(S 01, S 02), 북동쪽 4개 정점(S 03, S 04, S 05, S 06), 서쪽 선착장 1개 정점(S 10) 및 송산면 독지리 방향 남동쪽 3개 정점(S 07, S 08, S 09)에서 2010년 6월 15일부터 16일까지 2일간 총 10개 표층 퇴적물 샘플을 채취하였다. 현장 접근 방법은 시화호 배수 갑문 조작운영 계획에 따라 2010년 6월 15일(개방후 수위: 약 -2.69m)~16일(개방후 수위: 약 -2.92m) 사이에 시화호 내부 간조시 채취하였다 (Table 1, Fig. 2). 표층퇴적물 채취시 입도, 유기탄소량 분석용 시료는 폴리에틸렌(polyethylene; PE) 비닐팩에, 중금속 분석용 시료는 미리 산으로 세척된 폴리에틸렌(PE) 통에, 산휘발성황화합물 시료는 20ml 유리병에 옮겨 분석하였다.

북동쪽 1개 정점(PC 06) 및 송산면 독지리 방

향 남동쪽 1개 정점(PC 09) 갯벌의 퇴적층서, 퇴적작용, 입도, 함수율,  $^{210}\text{Pb}$ 의 과잉 방사능 특성, 중금속, 산휘발성황화합물, 유기탄소 및 soft X-ray 등을 파악하기 위해 표층퇴적물 채취와 같은 기간동안 push core 방법으로 약 70~90cm의 주상퇴적물 시료 2개를 채취하였다. 절개한 주상시료의 반절은 곧바로 슬랩작업을 하여 soft X-ray 및 사진촬영을 하였으며 나머지 절반은 깊이별 일

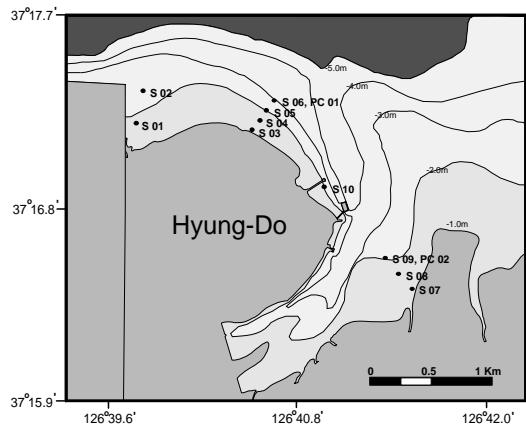


Fig. 2. Sampling locations of surface and push core sediments in Hyung-do intertidal zone.

Table 1. Sampling locations of surface and push core sediments in Hyung-do intertidal zone

Station No.	Longitude (N)	Latitude (E)
S 01	126° 39.7867'	37° 17.3034'
S 02	126° 39.8134'	37° 17.4884'
S 03	126° 40.5567'	37° 17.2700'
S 04	126° 40.5934'	37° 17.3334'
S 05	126° 40.6117'	37° 17.3650'
S 06, PC 01	126° 40.6717'	37° 17.4500'
S 07	126° 41.4817'	37° 16.4934'
S 08	126° 41.3934'	37° 16.5500'
S 09, PC 02	126° 41.3300'	37° 16.5950'
S 10	126° 40.9867'	37° 17.0267'

정한 간격으로 나누어서 함수율, 입도 및 유기탄소량 분석용은 폴리에틸렌(PE) 비닐팩에, 중금속 분석용 시료용은 미리 산으로 세척된 폴리에틸렌(PE) 통에, 산취발성 황화물 시료는 20ml 유리병 옮겨 분석하였다.

### 3.2. 퇴적물 입도, 함수율 및 화학성분 분석

입도 분석의 경우 표층 퇴적물과 주상 퇴적물로부터 분리된 시료는 실험실에서 약 5g을 1L 비이커에 넣어 일차적으로 10% 과산화수소수(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)로 반응시켜 유기물을 완전히 제거한 후, 0.1N 염산(HCl)으로 탄산염을 제거함으로써 쇄설성 퇴적물내 포함되어 있는 조개껍질 등으로 인해 발생할 수 있는 입도분포의 오차범위를 최소화하였다. 유기물과 탄산염이 제거된 각각의 시료는 습식체질(wet sieving)을 통해 4φ(62μm) 이상의 입도를 갖는 세립질 퇴적물(fine fraction)과 그 이하의 조립질 퇴적물(coarse fraction)로 분리하였다. 4 φ 이하의 조립질 시료는 0.5φ 간격의 체가 단계별로 장착된 진탕체질기(Ro-tap sieve shaker)를 이용하여 15분간 체질한 후 입도 등급별로 무게 백분율을 구하였다. 4φ 이상의 세립질 시료는 확산제(0.1%의 칼콘용액)를 넣고 초음파분쇄기와 자기진동기로 시료를 균일하게 분산시킨 후 X-선 자동입도분석기인 Sedigraph 5100(Micromeritics Instruments Corp.)으로 분석하여 입도 무게 백분율을 구하였다. 계산된 각 입도 등급별의 무게 백분율을 이용하여 모우먼트(moment) 방법(McManus, 1988)에 따라 평균입도(mean), 분급도(sorting), 왜도(skewness), 첨도(kurtosis) 등의 통계학적 변수들을 구하였다(해양수산부, 2008; Fork, 1968, Krumbein, 1934; McManus, 1988).

주상퇴적물의 함수율 분석을 위해 평량병 또는 증발접시를 미리 105~110℃에서 1시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에서 방냉하고 항량으로 무게를 정밀히 달고(W<sub>1</sub>) 여기에 시료 적당량을 취하여 평량병 또는 증발접시와 시료의 무게(W<sub>2</sub>)를 정밀히 측정하였다. 다음에 105~110℃의 건조기

안에서 4시간 건조시킨 다음 데시케이터안에 넣어 방냉하고 항량으로 하여 무게(W<sub>3</sub>)를 정밀히 측정하여 식1과 같이 함수율을 구하였다(해양수산부, 2008).

$$\text{함수율}(\%) = (W_2 - W_3)/(W_2 - W_1) \times 100 \quad (1)$$

<sup>210</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra은 한국기초과학지원연구원(KBSI)에서 보유중인 저준위배경방사능 냉각시스템과 10cm 두께의 납차폐체로 구성된 우물형 고순도 게르마늄 감마선 검색기(well-type HPGe gamma detector; GCW3523, Canberra Inc, USA)를 이용하여 측정하였으며, 검색기는 IAEA에서 제공하는 RGSet(RGU-1, RGTh-1, RGK-1)을 이용하여 Kim and Burnett(1983)의 방법에 따라 보정하였다. 시료는 측정용기에 담고 밀폐시켜 <sup>222</sup>Rn과 모핵종인 <sup>226</sup>Ra과 방사평형에 도달하도록 20일 이상 보관(aging) 후 측정하였다. <sup>210</sup>Pb과 <sup>226</sup>Ra은 가능한 1,000 counts 이상이 되도록 측정하였다.

코어의 깊이에 따른 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>(과잉 방사능 납) 분포는 아래의 식 3으로 표현된다.

$$({}^{210}\text{Pb}_{ex})_z = ({}^{210}\text{Pb}_{ex})_{z=0} \cdot e^{(-\lambda t)} \quad (2)$$

여기서 z는 퇴적층 깊이 (cm), z<sub>0</sub>는 퇴적층 표면.

위 식에  $t = \frac{z}{s}$  (s는 퇴적속도, cm/yr)를 대입하여 정리하면 식 4, 식 5로 정리되며,

$$({}^{210}\text{Pb}_{ex})_z = ({}^{210}\text{Pb}_{ex})_{z=0} \cdot e^{-(\lambda/s)z} \quad (3)$$

$$\ln({}^{210}\text{Pb}_{ex})_z = \ln({}^{210}\text{Pb}_{ex})_{z=0} - (\lambda/s)z \quad (4)$$

위 식을 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>의 로그축과 깊이에 대하여 구한 회귀직선식의 기울기(a)에 적용하면 식 6과 같이 표현된다.

$$S = -\frac{\lambda}{a} \quad (5)$$

여기서  $a$ 는 회귀직선식의 기울기( $\text{cm}^{-1}$ ),  $\lambda$ 은  $^{210}\text{Pb}$ 의 붕괴상수( $0.031 \text{ yr}^{-1}$ )이다.

표층 퇴적물과 주상 퇴적물의 중금속 분석을 위해 실험실에서 냉동건조 후 곱게 간 시료를  $105^\circ\text{C}$  오븐에서 하룻밤 동안 건조시킨 후, 고압 용 테프론 용기에 시료 약 20mg과  $\text{HNO}_3$ , HF,  $\text{HClO}_4$ 의 혼합산을 넣고 뚜껑을 닫은 후, 가열판 위에서 용해시켰다. 한국기초과학지원연구원에서 전처리한 시료는 분석 의뢰하여 가열판에서 산을 날려 보낸 후에 전처리한 시료는 1% 질산에 녹여 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Thermo X series) 및 유도결합플라즈마 발광광도계(ICP-AES, JY Ultima2C)로 측정하였다. 분석자료의 신뢰성 확보를 위하여 캐나다 국립연구소(NRC)의 표준퇴적물 비교시료인 MESS-3(분석항목 회수율 95.0%)를 본 시료와 함께 분석하였다.

표층 퇴적물과 주상 퇴적물의 로부터 산화발성 황화물 분석을 위해 습시료 약 2g의 무게를 정확히 측정하여 기체 발생관에 넣은 후 약간의 증류수를 넣고 기체가 새지 않도록 뚜껑을 닫는다. 이어 기체 발생관에 황산 2ml를 넣고 2~3초 기다린 후 펌프를 이용하여 발생하는 황화수소가 검지관에 흡수되도록 한다. 그 후 검지관의 색 변화를 유심히 관찰하여 색이 더 이상 변하지 않을 때 그 지점의 눈금을 읽어 황화물량을 계산하였다(오차율 5.0% 내외).

표층 퇴적물과 주상 퇴적물로의 유기탄소(Total Organic Carbon; TOC) 분석을 위해 냉동 건조 후 분마한 시료를 oven에서  $105^\circ\text{C}$ 로 하루밤 건조시킨 후 desiccator에 두시간 방치한다. 미리 무게를 단 유리 vial에 시료 약 0.5g을 정확하게 무게를 재고 첨가한 후 1N HCl 10ml를 첨가하여 탄산염을 제거한다.  $70^\circ\text{C}$ 에서 하루밤 동안 수분과 잔류염산을 날려 보낸 후  $105^\circ\text{C}$ 에서 2시간 건

조시키고 상온에서 2시간 방치 후 무게를 측정하여 산으로 탄산염을 제거하기 전후의 무게비를 구하여 나중에 측정된 유기탄소 농도를 보정해 준다. 주석박막으로 수 mg의 시료를 말아 CHN 원소 분석기(EA1112)로 측정하였다(Ruttenberg, 1992). 분석결과와 신뢰도를 측정하기 위하여 분석결과와 신뢰도를 측정하기 위하여 캐나다 국립연구소(NRC)의 표준퇴적물 비교시료인 BCSS-1를 같은 방법으로 측정하여 비교(회수율 95.0%)을 비교하였으며, 원소분석기 측정시 20개 샘플분석 마다 Thermo사의 표준퇴적물 시료인 Soil Reference Material for Nitrogen and Carbon 파우더를 이용하여 분석시 오차를 줄이고자 하였다(Carbon Standard Dev. 0.012, Nitrogen Standard Dev. 0.003, 회수율 98.0%).

## 4. 결 과

### 4.1. 표층과 주상퇴적물의 조성

시화호 형도 주변 갯벌의 2010년 6월 표층 퇴적물 특성은 Table 2에 나타내었고, 퇴적상의 분포는 Fig. 3에 나타내었다. 표층 퇴적물의 퇴적상은 총 4개(sandy Silt, silty Sand, Slightly gravelly muddy Sand, Sand)로 구성되어 있었다.

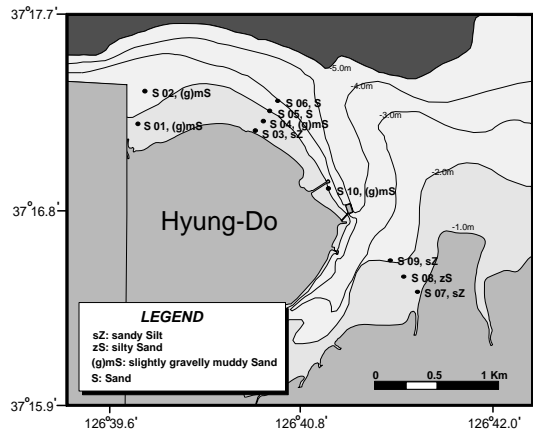


Fig. 3. Distribution of surface sediment types in Hyung-do intertidal zone.

Table 2. Sediment characteristics of surface and push core sediments in Hyung-do intertidal zone

Station No.	Composition (%)				Sediment Type by Folk	Statistical Parameters ( $\Phi$ )				
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Mz	St.De.	Skew.	Kurt.	
Surface	S 01	0.72	67.11	23.01	9.16	(g)mS	4.05	1.97	0.43	1.92
	S 02	0.19	82.99	10.68	6.14	(g)mS	3.40	1.35	0.42	2.46
	S 03	0.00	48.27	40.18	11.55	sZ	4.70	1.94	0.61	1.85
	S 04	0.03	86.00	9.12	4.85	(g)mS	3.38	1.12	0.24	2.21
	S 05	0.00	91.01	5.22	3.77	S	3.14	0.91	0.62	1.71
	S 06	0.00	94.56	2.75	2.69	S	2.96	0.60	0.42	2.40
	S 07	0.00	17.20	64.84	17.96	sZ	6.00	2.31	0.49	1.55
	S 08	0.00	61.16	29.64	9.20	zS	4.20	1.80	0.55	2.12
	S 09	0.00	44.61	42.03	13.36	sZ	5.03	2.05	0.58	1.69
	S 10	0.71	51.56	35.44	12.29	(g)mS	4.79	1.97	0.74	1.78
Core PC 01	0 cm	0.00	98.38	1.08	0.54	S	2.92	0.48	0.33	1.84
	3 cm	0.00	98.78	0.79	0.43	S	2.91	0.48	0.30	1.81
	5 cm	0.00	99.13	0.58	0.29	S	3.03	0.41	-0.12	1.00
	7 cm	0.00	98.75	0.78	0.47	S	2.86	0.43	0.28	1.84
	10 cm	0.00	99.72	0.28	0.00	S	2.80	0.39	0.19	1.77
	15 cm	0.00	98.91	0.68	0.41	S	2.88	0.44	0.31	1.86
	20 cm	0.00	98.86	0.74	0.40	S	2.86	0.46	0.26	1.87
	25 cm	0.00	98.04	1.27	0.69	S	2.97	0.50	0.37	1.42
	30 cm	0.00	98.71	0.86	0.43	S	2.92	0.43	0.39	1.66
	40 cm	0.00	90.99	4.07	4.94	S	3.02	1.13	0.67	4.83
	50 cm	0.00	78.86	14.16	6.98	zS	3.59	1.64	0.46	2.82
	60 cm	0.00	37.18	49.43	13.39	sZ	5.09	2.05	0.43	1.57
	70 cm	0.00	39.91	46.24	13.85	sZ	4.80	2.26	0.35	1.49
	80 cm	0.00	77.10	15.52	7.38	zS	3.62	1.69	0.44	2.90
90 cm	0.53	77.66	14.77	7.04	(g)mS	3.39	1.83	0.53	3.01	
Core PC 02	0 cm	0.00	39.57	45.86	14.57	sZ	5.06	2.11	0.55	1.95
	3 cm	0.00	39.11	48.03	12.86	sZ	4.79	1.90	0.47	1.98
	5 cm	0.00	31.13	51.7	17.17	sZ	5.66	2.39	0.64	1.73
	7 cm	0.00	28.64	52.46	18.9	sZ	6.00	2.62	0.63	1.40
	10 cm	0.00	26.95	58.28	14.77	sZ	5.38	2.05	0.54	1.62
	15 cm	0.00	11.68	68.85	19.47	sZ	6.33	2.31	0.54	1.43
	20 cm	0.00	15.58	61.43	22.99	sZ	6.62	2.73	0.56	1.04
	25 cm	0.00	28.50	50.57	20.93	sZ	6.22	2.68	0.59	1.04
	30 cm	0.00	31.08	45.89	23.03	sM	6.41	2.92	0.52	0.88
	40 cm	0.00	47.92	32.17	19.91	sM	5.34	3.63	0.33	1.22
	50 cm	1.75	29.03	57.71	11.51	(g)sM	5.03	2.43	0.22	2.03
	60 cm	0.00	19.78	53.86	26.36	sZ	6.62	2.86	0.46	0.80
	70 cm	0.00	19.56	55.98	24.46	sZ	6.60	3.06	0.36	1.09

형도 북서쪽 정점(S 03)과 형도 남동쪽 송산면 독지리 방면 정점(S 07, S 08)에서 우세한 모래 실트(sandy Silt) 퇴적상이 분포하고 있었다. 실트 모래(silty Sand)와 자갈이 약간 함유된 펄 모래 (slightly gravelly muddy Sand) 퇴적상은 형도 북쪽의 정점(S 01, S 02)과 형도 남동쪽 송산면 독지리 방면 정점(S 08)에서 분포하고 있다. 모래 (sand) 퇴적상은 형도 북동쪽 정점(S 05)에 일부 분포하고 있었다.

표층 퇴적물의 모래 함량은 17.20%(S 07)에서 91.01%(S 05) 범위로 분포하며, 형도 주변 해안 선 부근 갯벌에서 시화호 조간대 방향(S 01, S 02)으로 모래의 함량이 비례적으로 증가하고 있다. 남동쪽 송산면 독지리 방면으로 갈수록 모래 함량은 상대적으로 감소값을 나타내고 있었다.

표층 퇴적물의 평균 입도는 2.96 $\phi$ (S 06)에서 6.00 $\phi$ (S 07) 범위를 나타내고 있다. 형도 주변 갯벌에서는 대부분 약 3~4 $\phi$  분포를 보이며 송산 면 독지리 부근(S 07)이 가장 세립한 것으로 나타났다. 표층 퇴적물의 분급도는 0.60 $\phi$ (S 06)에서 2.05 $\phi$ (S 09) 범위를 나타내고 있다. 형도 주변 갯벌 표층퇴적물은 약 1~2 $\phi$ 의 불량한 분급도를 보였다.

코어 PC 01은 형도 북동쪽방면에서 약 90cm 길이로 채취 되었다. 주상 퇴적물은 50cm 깊이까지는 모래 퇴적상이 우세하나 60~70cm 깊이에서는 모래 펄실트 퇴적상이었다. 90cm 깊이에서는 자갈이 함유된 펄 모래로 구성 되어 있었다. 모래의 함량은 0~40cm 깊이까지 모두 90% 이상으로 높은 수치를 보였다. 평균입도는 2.80 $\phi$ 에서 4.80 $\phi$ 의 범위이며, 60cm에서 70cm 구간이 다른 층과 비교해 상대적으로 세립하였다. 분급도는 대체로 0~30cm 구간까지 0.35~0.50 $\phi$  범위에 들어 대체로 잘 분류되었으며, 60~70cm 구간에서는 2.0 $\phi$  이상으로 매우 불량하였다. 함수율은 20.35~24.92% 범위로 대체로 전체 층서에서 고른 분포를 보였다. 주상 퇴적물의 사진 촬영 결과, PC 01 주상퇴적물의 경우 45cm 부근에서 1mm 이하의 패각들이 약 5~6개 보였으며 전체

색상은 SM03 정점과 같이 올리브회색(olive gray) 였고 35~45cm 에서는 혐기화 상태로 보이는 어두운 올리브회색(dark olive gray)을 보였다(Fig. 4, Fig. 5).

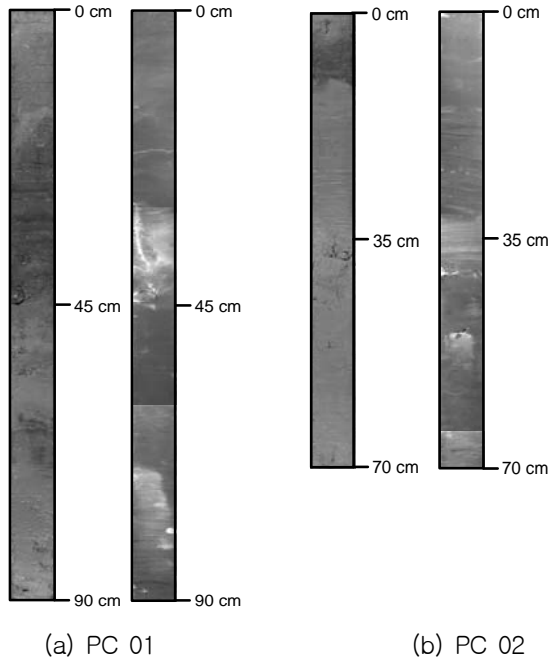


Fig. 4. Photography (left) and soft X-ray (right) of PC 01 (a) and PC 02 push cores (b) in Hyung-do intertidal zone.

코어 PC 02의 경우 25cm 깊이까지는 모래 실트 퇴적상이 우세하나 표층과 30~50cm 깊이에서는 모래 펄 퇴적상 이었다. 60~70cm 깊이에서는 다시 모래 실트 퇴적상으로 구성 되어 있었다. 모래의 함량은 40cm 깊이에서 47.92%로 최대 수치를 보였다. 평균입도는 4.79 $\phi$ 에서 6.62 $\phi$ 의 범위이며, 60cm에서 70cm 구간이 상대적으로 세립하였다. 분급도는 대체로 2.0~4.0 $\phi$  범위에 들어 대체로 불량하며, 70cm 구간은 매우 불량하였다. 함수율은 22.15~26.83% 범위로 대체로 전체 층서에서 고른 분포를 보였다. 그리고 PC 02 주상퇴적물의 40cm 부근에서 직경 1mm 이하의 패각들이 5~6개 보였으며 전체 주상 퇴적물 색



상은 올리브회색(olive gray)이었다. 특히, 표층에서 10cm까지는 혐기성 상태로 관찰되었으며, 어두운 올리브회색(dark olive gray)였다. 입도분포의 경우 주상퇴적물 상부 및 중부층에는 상대적으로 실트성 입자들이 주로 퇴적되어 있었으며, 주상퇴적물 상부 및 중부층에는 조립한 모래 입자들이 퇴적이 우세하였다(Fig. 4, Fig. 5).

#### 4.2. 표층과 주상퇴적물의 화학성분 농도

퇴적물에서의 유기탄소 함량은 퇴적물의 입도, 수심, 퇴적률 등과 밀접한 상관관계가 있다. 일반적으로 퇴적물이 세립할수록 유기탄소의 함량은 증가하고 표층으로부터 유입이 일정할 경우 수심이 증가할수록 수층에서의 분해로 인해 유기탄소 함량은 감소하게 된다. 그리고 퇴적물이 빠를수록 상대적으로 유기탄소의 보존율이 증가한다. 그리고 일반적으로 퇴적물은 입도, 광물 조성, 탄산염 및 유기물 농도의 영향을 많이 받으며(Calvert, 1976; Udden, 1914), 중금속과 유기물의 농도는 입자가 세립 할수록 높아지고 조립 할수록 낮은 농도를 보인다(Horowitz, 1991).

시화호 형도 주변 유기탄소 함량은 0.10~1.67%(평균  $0.26 \pm 0.37\%$ ) 범위로 형도 북쪽 방향 S 02 정점에서 1.67%, 형도 남동쪽 송산면 독지리 S 07 정점에서 1.31%이고 나머지 점점은 1.00% 이하의 유기탄소 함량을 나타냈다. 시화호 형도 주변 조사정점에 대한 표층퇴적물의 산화발성황화물의 평균 농도는 0.02~1.30mg/g(평균  $0.19 \pm 0.39\text{mg/g}$ ) 범위로, 특히 형도 북동쪽 방향 S 10 정점은 0.19mg/g으로 건강기준항목을 세분화하면서 독성유기물질이나 농약성분 물질별로 기준치를 추진한 일본수산환경수질기준(1972) 0.2 mg/g에 근접하였고, 송산면 독지리 방면의 S 07 정점은 일본수산환경수질기준(1972) 0.2mg/g을 초과한 1.3mg/g이었다(국립환경연구원, 2000; 일본수산자원보호협회, 1972). 이는 Table 3과 같이 S 07, S 10 정점에서 퇴적물 중 AVS 농도는 연속적인 유기물 분해과정에 공극수의 질산염, 철·망간산화물, 그리고 황산염의 산소가 이용되어 황화물이 환원된 결과이며, S 10 1개 정점에서만 일본수산환경 수질기준(1972)의 0.2ppm을 근접하는 것으로 나타났다(일본수산자원보호협회, 1972).

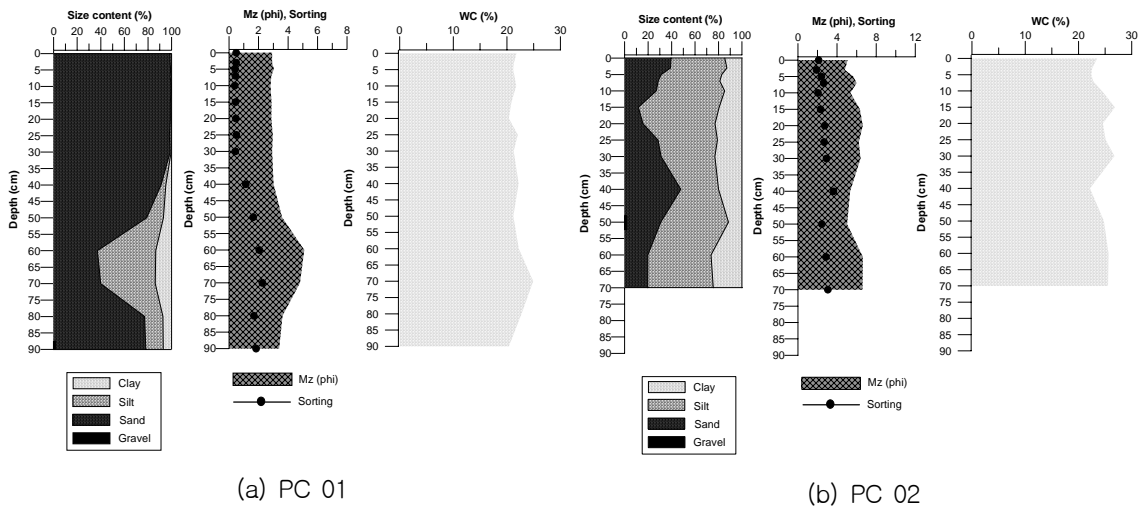


Fig. 5. Textural composition, mean size, sorting and water content of PC 01 (a) and PC 02 push core sediments (b) in Hyung-do intertidal zone.

Table 3. TOC, AVS and metal concentrations of surface and push core sediments (PC 01 and PC 02) in Hyung-do intertidal zone

Station No.	TOC <sup>1)</sup> (%)	AVS <sup>2)</sup> (mg/g)	Al (%)	Fe (%)	Cu (ppm)	As (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	Ba (ppm)	
Surface	S 01	1.67	0.09	3.6	1.9	10.9	4.6	18.4	44.3	11.2	37.3	573.2
	S 02	0.15	0.08	0.8	1.6	7.3	1.4	17.9	35.5	11.1	33.2	569.3
	S 03	0.14	0.02	2.4	2.0	7.6	3.3	19.2	42.7	10.5	45.6	556.0
	S 04	0.10	0.02	0.9	1.7	17.9	1.1	21.7	43.3	9.6	20.5	601.9
	S 05	0.12	0.05	0.8	1.6	4.9	0.8	19.4	32.7	8.7	18.4	627.6
	S 06	0.15	0.11	2.7	1.5	4.4	0.9	18.4	29.9	7.5	24.1	572.6
	S 07	1.31	1.30	1.3	2.1	12.0	1.6	21.8	60.9	16.0	23.1	487.7
	S 08	0.12	0.04	0.9	1.6	6.9	0.5	16.9	41.3	10.9	27.4	545.6
	S 09	0.14	0.03	1.2	1.8	11.0	0.3	16.6	49.7	12.3	40.7	565.3
	S 10	0.23	0.19	1.0	1.8	9.1	1.2	17.4	46.2	12.5	30.6	541.9
Core PC 01	0 cm	0.07	0.11	0.6	1.3	5.0	0.6	19.2	32.4	9.1	18.5	658.8
	3 cm	0.06	0.09	0.5	1.3	5.4	<0.2	19.0	29.6	8.1	16.3	621.2
	5 cm	0.05	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7 cm	0.06	0.05	2.0	1.2	5.0	1.4	17.7	27.5	6.2	22.6	632.8
	10 cm	0.03	0.05	0.9	1.1	4.5	1.1	17.8	29.3	6.3	20.8	643.4
	15 cm	0.03	0.05	0.5	1.1	4.3	<0.2	18.7	28.4	6.6	15.1	664.8
	20 cm	0.06	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25 cm	0.05	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30 cm	0.04	0.05	0.8	1.4	5.0	1.1	19.1	33.3	7.5	24.0	654.8
	40 cm	0.11	0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 cm	0.14	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60 cm	0.16	0.04	4.3	2.2	10.7	6.4	20.3	52.8	16.1	43.9	587.2
	70 cm	0.20	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80 cm	0.04	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
90 cm	0.05	0.05	2.1	1.7	5.7	3.8	20.4	32.4	10.1	34.9	617.9	
Core PC 02	0 cm	0.14	0.11	1.0	1.8	8.8	1.7	17.3	51.0	16.1	44.7	551.5
	3 cm	0.13	0.09	1.0	1.7	9.1	1.3	17.9	51.1	17.6	32.8	538.7
	5 cm	0.11	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7 cm	0.15	0.04	0.9	1.8	9.9	1.2	18.4	53.8	20.7	42.2	543.8
	10 cm	0.26	0.04	1.2	1.9	11.3	1.7	19.4	59.1	19.7	38.3	556.4
	15 cm	0.20	0.04	4.3	2.6	11.9	4.4	20.1	56.1	23.7	62.9	522.9
	20 cm	0.24	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25 cm	0.21	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30 cm	0.25	0.04	1.4	2.3	13.5	2.6	21.3	58.2	20.5	44.0	497.3
	40 cm	0.20	0.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 cm	0.22	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60 cm	3.24	0.04	3.8	2.5	9.7	4.5	18.9	51.5	17.9	54.2	521.5
	70 cm	0.23	0.04	1.2	2.3	10.1	2.4	18.6	52.0	19.3	36.9	475.1

1) TOC : Total Organic Carbon, 2) AVS : Acid Volatile Sulfide

Table 3과 같이 표층퇴적물의 중금속 분석 결과 알루미늄(Al)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 0.8~3.6%(평균 1.5%)의 범위로, S 01 정점에서 가장 낮은 값을 보였으며, S 02 정점에서 가장 높은 값을 나타내었다. 철(Fe)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 1.5~2.1%(평균 1.8%)의 범위로, S 07 정점에서 가장 낮은 값을 나타내었고, S 06 정점에서 가장 높은 값을 나타내었다. 구리(Cu)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 4.4~17.9ppm(평균 9.2ppm)의 범위로, S 06 정점에서 가장 낮은 농도를 나타내었고 S 04에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 2005년 해양수산부에서 해양오염퇴적물의 정화복원 범위를 설정하기 위하여 개발하여 제시한 기준농도에는 상위기준(HL)과 하위기준(LL)이 있다(해양수산부, 2005). 여기서, 상위기준이라 함은 해저퇴적물에서의 함량이 상위기준을 초과하는 경우, 우려대상오염물질로 관리하고, 그 근원과 유입경로 등을 조사하여 해저퇴적물에 동물질이 축적되지 않도록 조치하거나 축적을 감소시킬 수 있는 방안을 강구하고 시행하여야 할 필요가 있다. 하위기준이라 함은 유해화학물질 중 해저퇴적물에서의 농도가 이 기준과 같거나 상위기준 미만일 경우, 감시대상 오염물질로 부르고, 해당지역에 대하여서는 동 물질의 근원을 규명하고, 더 이상의 오염이 진행되지 않도록 방안을 수립 시행할 필요가 있는 농도 기준을 말한다(해양수산부, 2005).

한편, Table 4와 같이 미국의 해양대기청(NOAA)에서는 퇴적물에서의 유해물질의 농도가 저서생물에 미치는 독성에 대한 통계치를 가지고 기준을 설정한 바가 있는데, 저서생물에 대하여 독성이 나타나는 농도범위들 중 초기 10%에 해당하는 값을 ERL(Effect Range-Low, 저서생물에 독성을 보이는 초기 10% 농도), 독성을 나타내는 농도범위들의 중간값에 해당하는 값을 ERM(Effect Range-Median, 저서생물에 독성을 보이는 농도들의 중간값)으로 설정한 바가 있다(권영택, 2004; NOAA Report, 1987). Cu의 해양오염퇴적물의 관리를 위하여 제안된 하위기준(이 이상일 경우 감시대상)은 24.0 ppm이며, 상위기준(이 이상일 경우 우려대상)은 108.0ppm이다. 그리고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값은 34.0ppm이며 ERM값은 270.0ppm이다. 본 조사결과를 위 값들과 비교해 보면 조사가 실시된 모든 정점에서 하위기준(이 이상일 경우 감시대상)인 24.0ppm 이상을 나타내는 정점은 없었다. 비소(As)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 0.3~4.6ppm (평균 1.6ppm)의 범위이다. S 09 정점에서 가장 낮은 농도를 보였으며, S 01 정점에서 가장 높은 농도를 나타내었다. As의 하위기준(감시대상)값은 9.0ppm이며, 상위기준(우려대상)의 값은 41.6ppm이고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값은 8.2ppm이며 ERM 값은 70ppm이다. 본 조사결과를 위 값들과 비교해 보면 모든 정점에서 하위기준(감시대상)값인 9.0ppm 이상을 나타내는 정점은 없었다. 납(Pb)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 16.9~21.8ppm(평균 18.8ppm)의 범위로, S 09 정점에서 가장 낮은 농도를 보였고 S 07 정점에서 가장 높은 농도를 나타내었다. Pb의 기준은 하위기준(감시대상)이 50.0ppm, 상위기준(우려대상)이 220.0 ppm이고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값은 46.7ppm이며 ERM 값은 218 ppm 이다. 모든 정점에서 하위기준(감시대상)값인 50.0ppm 이상을 나타내는 정점은 없었다. 아연(Zn)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 29.9~46.2ppm(평균 42.6ppm)의 범위로, S 06 정점

Table 4. Qualifications of heavy metal concentration in sediments (NOAA, 1987)

Element	Effect Range-Low	Effect Range-Median
	(µg/g)	
Cr	81.0	370.0
Ni	20.9	51.6
Cu	34.0	270.0
Zn	150.0	410.0
As	8.2	70.0
Cd	1.2	9.6
Pb	46.7	218.0

에서 가장 낮은 농도를 나타냈으며 S 07정점에서 가장 높은 농도를 나타내었다. Zn의 국내 하위기준(감시대상)은 200.0ppm, 상위기준(우려대상)은 410.0ppm이며, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값은 150ppm이며 ERM의 값은 410ppm이며, 하위기준(감시대상)값인 200.0ppm 이상을 나타내는 정점은 없었다. 니켈(Ni)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 7.5~16.0ppm(평균 11.0ppm)의 범위로, S 06 정점에서 가장 낮았고 S 07 정점에서 가장 높은 농도를 나타내었다. Ni에 대한 해양오염퇴적물의 관리를 위하여 제안된 하위기준(이 이상일 경우 감시대상)은 23.0ppm 이며, 상위기준(이 이상일 경우 우려대상)은 52.0ppm이다. 그리고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값은 20.9 ppm이며 ERM 값은 51.60 ppm이며 하위기준(감시대상)값인 23.0ppm 이상을 나타내는 정점은 없었다. 카드뮴(Cd)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 0.2ppm 이하의 범위로 나타내었다. Cd의 하위기준(감시대상) 값은 0.68ppm 이며, 상위기준(우려대상)의 값은 4.21ppm 이고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값은 1.20ppm이며

ERM은 약 9.60ppm이며 하위기준(감시대상)값인 0.68ppm 이상을 나타내는 정점은 없었다. 크롬(Cr)의 경우, 표층퇴적물 시료에서 18.4~45.6ppm(평균 30.1ppm)의 범위로, S 05 정점에서 가장 높은 농도를 보였으며 S 03 정점에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 여기서 제시된 Cr의 하위기준은 80.0ppm이며 상위기준은 370.0ppm 이다. 모든 정점에서 하위기준(감시대상)값인 80.0ppm 이상을 나타내는 정점은 없었으며, 미국해양대기청(NOAA)의 ERL 81.0ppm를 넘는 정점은 없었다.

Table 3 및 Fig. 6과같이 퇴적물 깊이별 유기탄소량의 경우, PC 01 주상 퇴적물 정점의 경우 0~70cm까지 아래로 갈수록 증가하는 경향이 보였으며 70cm에서 가장 높은 0.20 %를 보였다. 그리고 PC 02 주상 퇴적물 정점에서는 0~50cm까지 거의 변화가 없이 낮았으며 60cm에서는 가장 높은 3.24 %를 나타내었다. 산화발성황화합물의 경우, PC 01 및 PC 02 주상 퇴적물 모든 표층에서 비교적 높은 값을 보였지만 아래로 갈수록 감소상태를 유지하다가 두 정점 모두 40cm에서 다시 증가하여 각각 0.09mg/g, 0.16mg/g을 보였다.

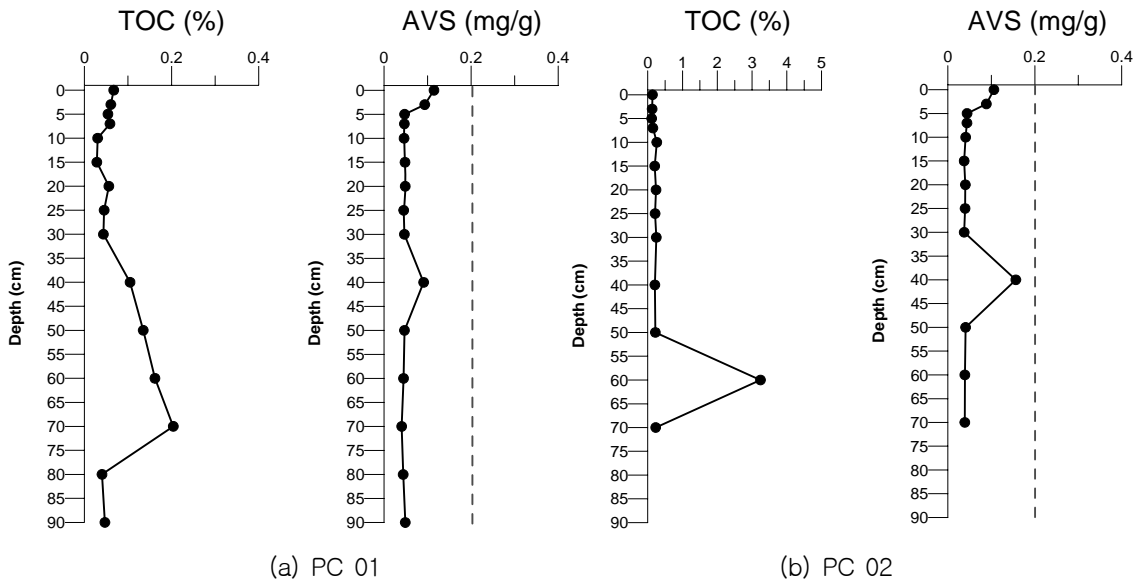
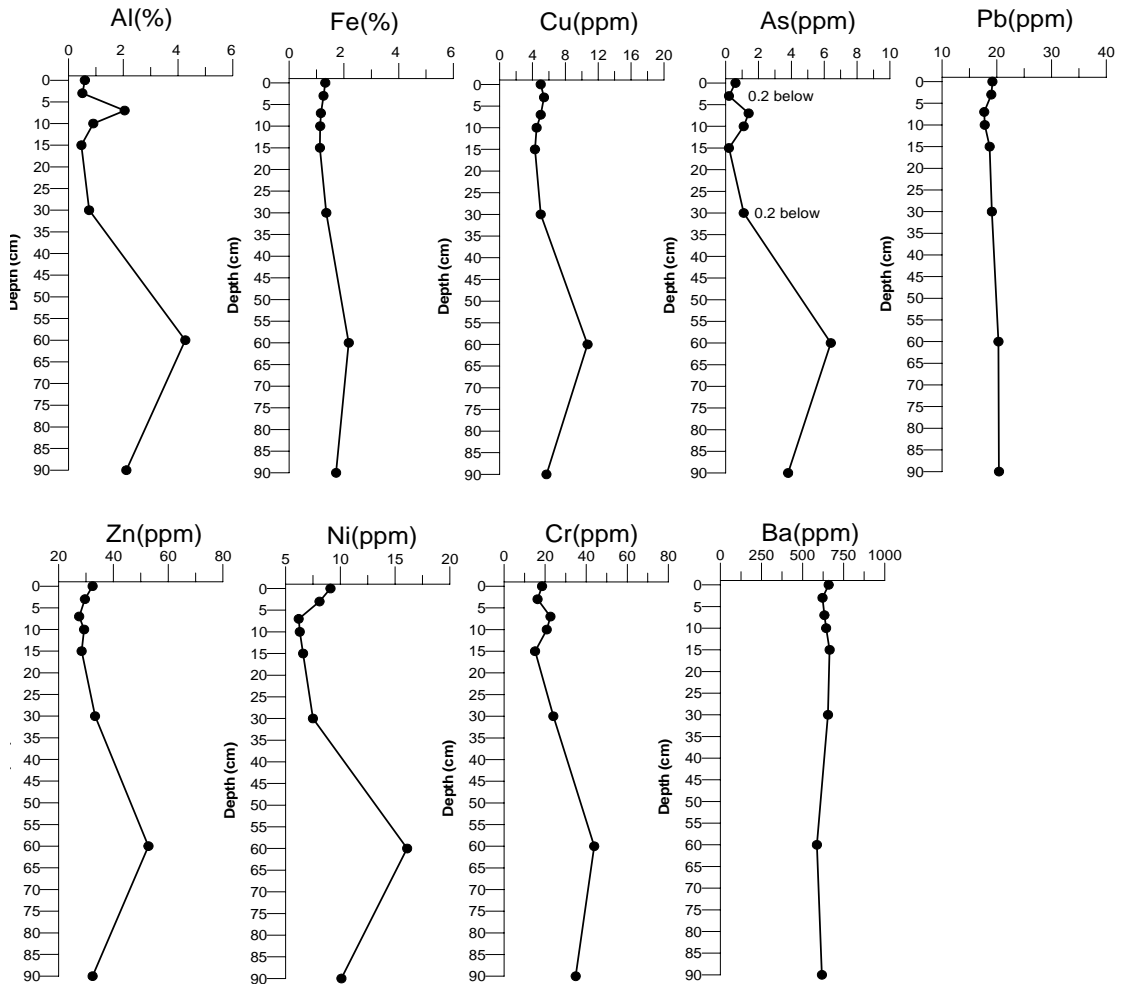


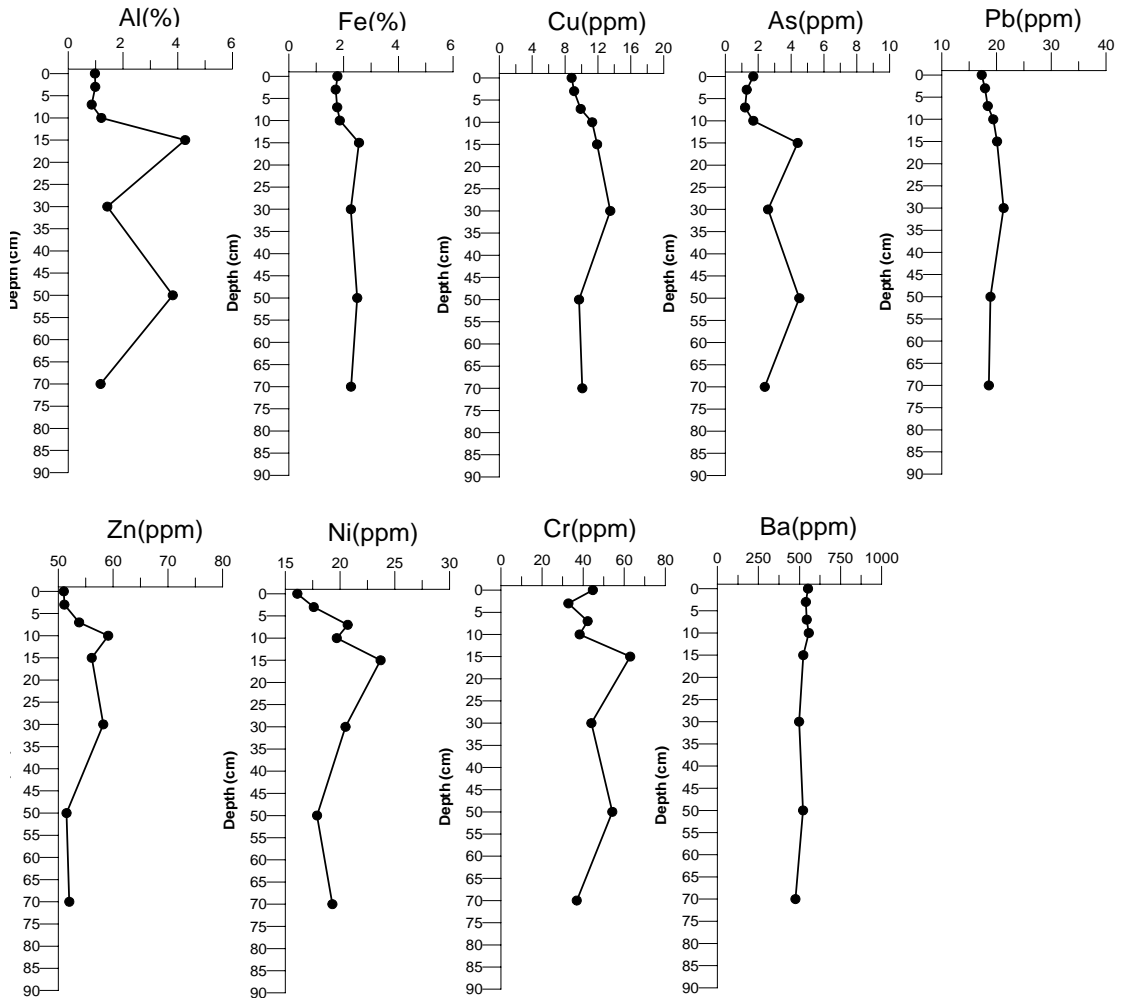
Fig. 6. Compositions of total organic carbon (TOC) and acid volatile sulfide (AVS) of PC 01 (a) and PC 02 push core sediments (b) in Hyung-do intertidal zone (Red dotted line Japanese guide line of 0.2mg/g concentration of AVS).

일본의 안전한 퇴적물 환경기준인 0.20mg/g 이상의 AVS 농도분포를 보인 층은 없었지만, PC 02 주상 퇴적물의 경우 40cm에서 일본의 환경기준인 0.20mg/g에 근접하는 값을 나타내었다. 퇴적물 깊이별 AVS 농도 분포는 표층에서 40cm 까지 하부층으로 갈수록 AVS의 농도가 줄어드는 것으로 나타나 최근 들어 퇴적물의 AVS 농도를 증가시키는 유기물의 입력이 증가해 왔음을 시사하고 있다. 알루미늄(Al)의 경우, 지각속에 다량 존재하는 금속원소이나 두 주상퇴적물 모두 5.0% 이하의 값을 나타내었으며 상부 표층에서 감소하는 분포경향을 나타내었다. PC 01 정점은 60cm에서 가장 높은 4.3%를 보였고, PC 02 정점은

15cm에서 가장 높은 4.3%를 보였다. 철(Fe)의 경우 알루미늄 금속과 같이 지각속에 다량 존재하는 금속으로, 두 주상 퇴적물 정점에서 모두 3.0% 이하의 값을 나타내었으며 상부 표층에서 약간 감소하는 분포경향을 나타내었는데, PC 01 정점은 60cm에서 가장 높은 2.2%, PC 02 정점은 15cm에서 가장 높은 2.6%를 보였다. 구리(Cu)의 경우, 두 주상퇴적물 모두 14.0ppm 이하의 값을 나타내었으며 상부 표층에서 약간 감소하는 분포경향을 나타내었고, 두 정점 모두 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 34.0 ppm을 초과하는 층은 없었다. 비소(As)의 경우, 두 정점에서의 주상퇴적물은 모두 7.0ppm 이하의 값을 나타내었으



(a) PC 01



(b) PC 02

Fig. 7. Metal concentrations in PC 01 (a) and PC 02 push cores (b) in Hyung-do intertidal zone.

며 상부 표층에서 감소하는 분포경향을 나타내었고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값인 9.0 ppm을 초과하는 결과를 보인곳은 없었다. 납(Pb)의 경우, 두 주상퇴적물은 모두 22.0ppm 이하의 값을 나타내었으며 수직변화의 차이가 거의 없었고, 미국해양대기청(NOAA) 기준 ERL 값인 46.7ppm을 초과하는 층은 없었다. 아연(Zn)의 경우, 두 주상퇴적물은 모두 60.0ppm 이하의 값을 나타내었으며 표층에서 감소 경향을 보였고, 미국 해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 150.0ppm 농도

를 초과하는 층은 없었다. 니켈(Ni)의 경우, 두 정점에서의 주상퇴적물은 모두 24.0ppm 이하의 값을 나타내었으며 상부 표층에서 감소하는 분포경향을 나타내었고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 값은 20.9ppm으로 SM03 정점에서만 15cm에서 23.7ppm으로 ERL 기준이상의 농도를 나타내었다. 카드뮴(Cd)의 경우 두 정점에서의 주상퇴적물은 모두 분석기기의 측정한계인 0.2ppm 이하의 값으로 분석이 되었고, 24.0ppm 이하의 값을 나타내었으며 상부 표층에서 감소하는 분포경향을

나타내었다. 그리고 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 1.2ppm을 초과하는 층은 없었다. 크롬(Cr)이 경우 두 주상퇴적물 정점에서 모두 70.0 ppm 이하의 값을 나타내었으며 모든 층서에서 농도 차이는 거의 없었고, 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL 81.0ppm을 초과하는 층은 없었다.

#### 4.3. 주상퇴적물의 과잉 방사능 납( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ) 분포

주상 퇴적물의 퇴적률을 분석하기 위해 어미핵종인  $^{226}\text{Ra}$ 의 값을 뺀 과잉 방사능 납( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ )을 통해 확인한 방사능(activity)은 PC 01 및 PC 02 코어의 경우 각각  $0.171\pm 0.056\sim 1.473\pm 0.087\text{dpm/g}$ ,  $0.710\pm 0.044\sim 1.204\pm 0.074\text{dpm/g}$

의 값을 보였다(Fig. 8). 과잉 방사능 납의 분포를 통해 추정된 결과, 일시적으로 퇴적물의 다량 유입되었거나, 수직적으로 방사능(activity)이 유사하며 퇴적률은 정확히 추정할수 없었다. 또한 저서생물(benthos)의 생물혼합이 예상되었다. 그러나 수직의 과잉 방사능 납( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ )의 방사능이 급격히 차이가 나는 약 35cm 깊이를 기준으로 상부층과 하부층의 퇴적 속도차가 있는 것으로 추정된다. 따라서 35cm 이하 되는 곳은 시화방조제 건설이전의 퇴적층으로 추정되며, 35cm 이상 되는 것은 방조제 건설 및 형도 주변의 방수벽 또는 농로 건설로 인한 급격한 퇴적물 유입이 되어 퇴적 된 것으로 예상된다.

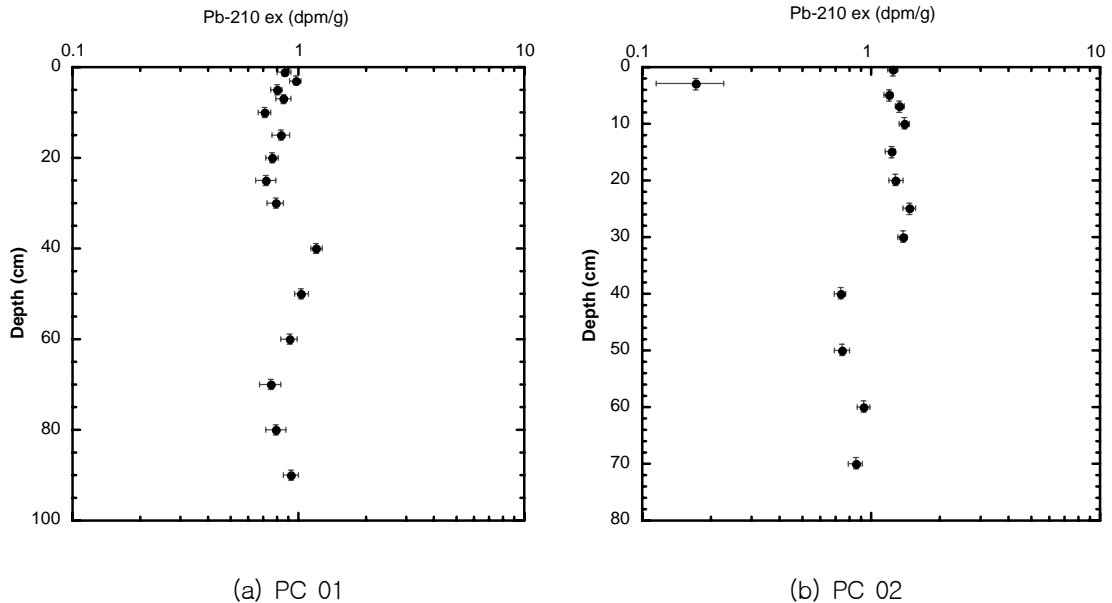


Fig. 8.  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  activity profiles of PC 01 (a) and PC 02 push cores (b) in Hyung-do intertidal zone.

## 5. 토 의

### 5.1. 형도 표층퇴적물의 중금속 농도

2009년 시화 방조제 내측 퇴적물의 금속 함유량을 분석한 결과, Al 6.44~9.10%(평균 7.54%), Fe 2.39~4.51%(평균 3.50%), Mn 350~887μ

g/g(평균 523μg/g), Cr 53.6~106μg/g(평균 83.5 μg/g), Co 9.08~17.4 μg/g(평균 13.6 μg/g), Ni 20.3~48.9 μg/g(평균 35.3μg/g), Cu 22.6~156 μg/g(평균 85.2 μg/g), Zn 102~369μg/g(평균 227μg/g), As 4.99~12.2μg/g(평균 8.91 μg/g), Cd 0.15~0.66(평균 0.41μg/g), Pb 27.6~68.9μ g/g(평균 48.8 μg/g) 그리고 Hg 0.024~0.124μ

g/g(평균 0.064  $\mu\text{g/g}$ )이었다. Al은 퇴적물 내에 % 단위로 존재하는 주요원소이며, 대부분이 퇴적물 내에서 안정성이 높은 광물격자에 존재하기 때문에 일반적으로 중금속 오염과 크게 상관이 없는 것으로 인식되고 있으며, 퇴적물의 입도 보정이 가능한 원소(Al, Fe, Li, Sc, Cs 및 Co 등)중의 하나로 활동되고 있고 높은 농도를 나타낼수록 퇴적물이 더욱 세립해 진다는 것을 의미한다(국토해양부, 2009, Long 등, 1995). 형도 표층 퇴적물의 Al함량 평균은 1.54%, Fe은 1.75%, Cu는 9.1ppm, As는 1.1ppm, Pb은 18.8ppm, Ni은 11.0ppm, Cd은 0.02ppm 그리고 Cr은 30.1ppm으로 2009년 시화 방조제 내측 중금속 결과 보다 형도 퇴적물에 있어서 Al 20.4%, Fe 50%, Cu 10.6%, As 12.3%, Pb 38.5%, Ni 31.2%를 차지해 매우 낮은 값을 보였다. 이는 1994년 시화호 방조제 축조 이후 폐쇄된 시화호 환경은 수질 및 저질 환경의 악화등으로 방조제 건설 전에 비해 퇴적물 내 중금속 함량이 약 2~5배의 증가를 보였다(최 등, 1999; 김 등, 2003). 시화 방조제를 완공한 다음인 1997년 이후 Mn은 2000년까지 감소추세를 보이다가 2001년 큰 폭으로 다시 상승하였고 이후 변동폭이 크지 않은 약간 상승하는 경향을 보였다. 최근에는 2~3년 동안 정체되거나 원소에 따라 약간 감소 혹은 증가하는 등이 큰 변동을 보이지 않았다. 전체적으로 방조제 건설 초기에 비해 상승하였으나(2009, 국토해양부), 형도의 표층 중금속 농도는 시화 방조제 내부 중금속 결과 보다 낮다고 평가되어 진다.

## 5.2. 표층과 주상퇴적물의 지화학적 특성

2009년 서해연안해역에서 모래, 실트, 점토 입자의 평균 함량은 각각 61.0%, 27.0%, 12.0%이다(2009, 국토해양부). 2011년 경기도 서해안 시화호 남측 조간대의 퇴적환경 특성을 평가하기 위한 입도 분석 결과 표층퇴적물은 대체로 분급이 불량(분급도, 0.60~2.31(평균, 1.6) $\phi$ )한 sandy Silt, slightly gravelly muddy Sand, silty Sand, Sand 등의 퇴적상으로 구분되며 평균입도는 2.95

~6.00(평균, 4.16) $\phi$ 로 극조립 실트(Silt)에 해당된다. 자갈, 모래, 실트 및 점토 입자의 함량은 각각 0.00~0.72%(평균 0.17%), 17.20~86.00(평균 64.45%), 2.75~64.03(평균 26.29%), 2.69~17.96(평균 9.10%)로 2009년 국토해양부 서해연안해역과 비교시 형도 갯벌에서 모래 함량 평균 값이 약 3.45% 높게 나왔으며, 반대로 점토 함량은 약 2.9% 낮게 측정되었으나, 이는 형도 퇴적물 갯벌이 서해연안과 비교시 상대적으로 조립하다는 것을 의미한다. 주상퇴적물 PC 02 정점의 평균입도는 4.79~6.62 $\phi$ 의 범위이며, 60~70cm 구간이 상대적으로 세립하였고 분급도는 2.0~4.0  $\phi$  범위에 들어 대체로 불량하며, 70cm 구간은 매우 불량하였으며, 주상퇴적물 SS04-1 평균입도는 2.80~4.80 $\phi$ 의 범위이며, 60~70cm 구간이 다른 층과 비교해 상대적으로 세립하였고 분급도는 0~30cm 구간이 0.35~0.50 $\phi$  범위에 들어 대체로 잘 분류되었으며, 60~70cm 구간은 2.0 $\phi$  이상으로 매우 불량하였다. 두 정점의 주상퇴적물 정점의 AVS의 경우 두정점 모두 표층에서 비교적 높은 값을 보였지만 아래로 갈수록 감소상태를 유지하다가 두 정점 모두 40cm에서 다시 높은값인 각각 0.16mg/g, 0.09mg/g을 보였다. 두 주상퇴적물 정점 모두 알루미늄(Al)은 5.0% 이하, 철(Fe)은 3.0% 이하, 구리(Cu)는 4.0ppm 이하, 비소(As)는 7ppm 이하, 납(Pb)은 22.0 pm 이하, 아연(Zn)은 60.0ppm 이하, 니켈(Ni)은 24.0ppm 이하, 카드뮴(Cd)은 분석기기의 측정한계인 0.2ppm 이하 그리고 크롬(Cr) 70.0ppm 이하의 값을 나타내었으며 모든 층에서 미국해양대기청(NOAA) 기준의 ERL(저서생물에 독성을 보이는 초기 10% 농도) 초과하지 않았다.

표층퇴적물 S 07 1개 정점에서 AVS는 130 mg/g, TOC는 1.31%로 높은 농도(함량)을 보였으며 이는 퇴적물 중 연속적인 유기물 분해과정에 공극수의 질산염, 철·망간산화물, 그리고 황산염의 산소가 이용되어 황화물이 환원된 결과로 판단된다. 그리고 S 10 1개 정점에서만 일본수산환경수질기준(1972)의 0.2ppm을 근접하는 것으로 나

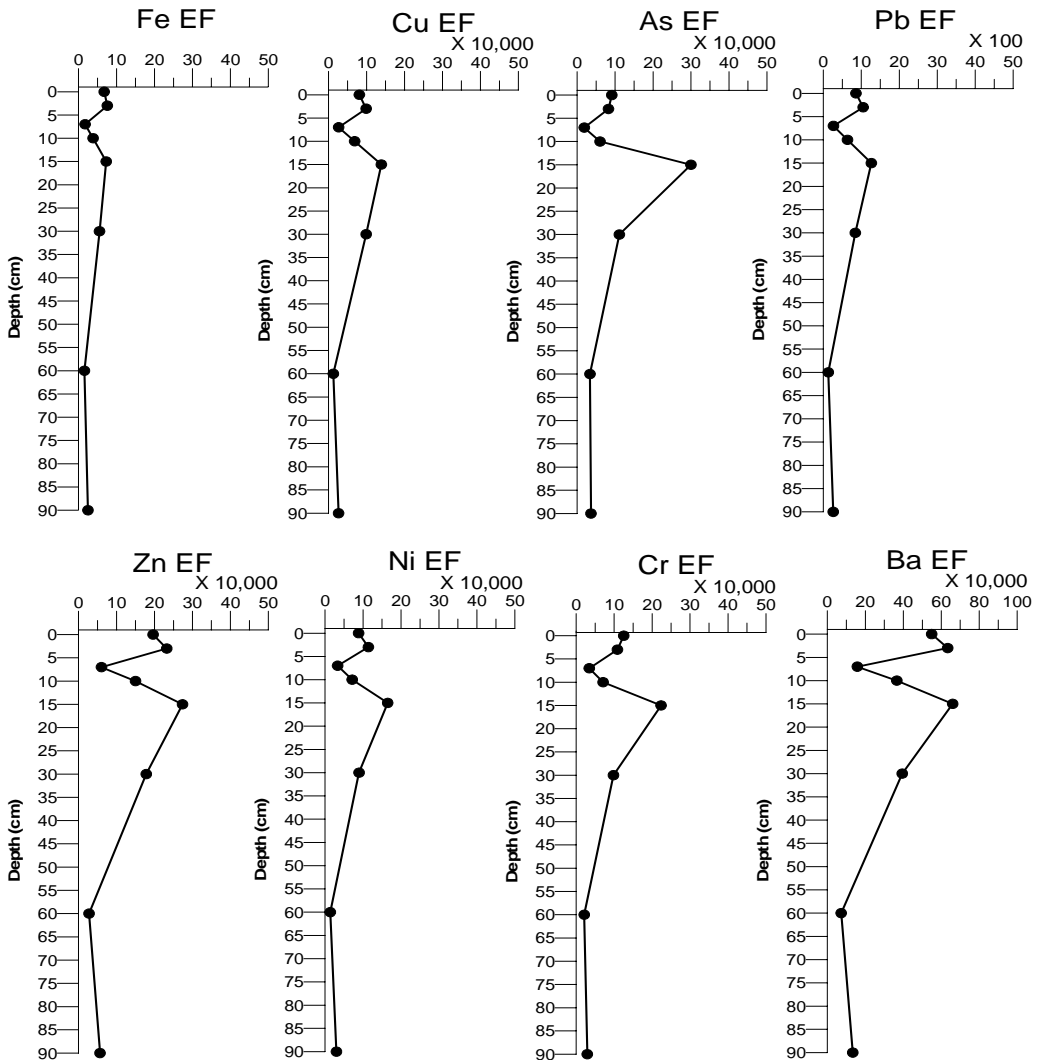


타났는데, 이는 일본수산환경수질기준(일본수산자원보호협회, 1972) 0.2mg/g·dry 초과시 AVS는 유기물 분해가 활발한 환원상태에서 분해정도를 나타내는 지표로서 0.2mg/g·dry 이상 일때 저서 생태계에 악 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(일본수산자원보호협회, 1972).

### 5.3. 퇴적물의 중금속 농축

일반적으로 퇴적물은 입도, 광물 조성, 탄산염 및 유기물 농도의 영향을 많이 받으며(Calvert, 1976; Udden, 1914), 중금속과 유기물의 농도는 입자가

세립 할수록 높아지고 조립 할수록 낮은 농도를 보인다(Horowitz, 1991). 따라서, 시화호 표층퇴적물의 중금속 농도에 따른 영향을 배제하기 위하여 중금속 농도의 금속성분의 배경농도(background)값을 이용하여 금속성분의 농축계수(enrichment factor; EF)인  $(X/Al)_{\text{시료}} / (X/Al)_{\text{background}}$ 를 계산하여(X=금속 성분) 중금속 함량을 Al으로 표준화한 공간분포인 비율을 Fig. 9와 같이 나타내었다. 여기서 배경농도 값은 2005년 Rudnick의 UCC(upper continental crust)를 기준으로 PC 01, PC 02 코어 샘플로부터 금속성분의 배경농도 값을 이용하여 금속성분



(a) PC 01

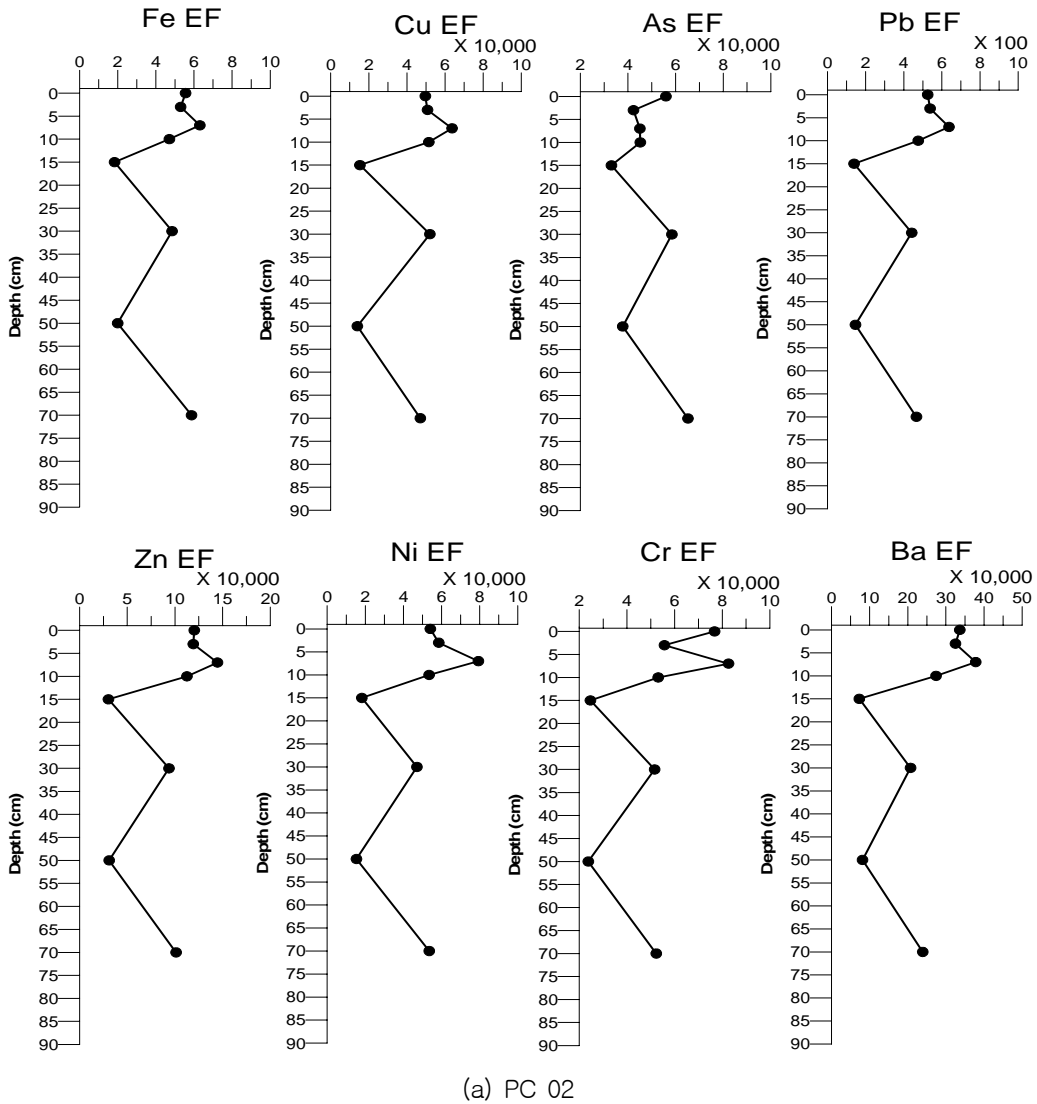


Fig. 9. Profiles of enrichment factors of metals in PC 01 (a) and PC 02 push cores (b) in Hyung-do intertidal zone.

의 농축계수(EF)를 계산하였다(Rudnick, 1995). 농축계수는 어떤 금속이 배경농도에 비해 상대적으로 오염상태의 절대성을 평가하는데 유용하며, 지각과 토양입자의 전형적인 지시원소인 Al 함량을 이용하여 금속함유 정도를 평가하였다. 점토광물은 넓은 표면적과 영구적인 음전하로 중금속과 미량원소를 흡착하는 능력이 탁월하다. 점토광물의 점유율이 커지면 중금속이나 미량원소의 함량이 상대적으로 높아진다. 따라서 점토광물의 구성

비로 오염정도를 판단할 수 있다. 점토광물의 구성비율은 직접 구하기 힘들기 때문에, 점토광물을 대표하는 지시원소인 Al 함량을 이용하여 중금속 원소나 미량원소에 대한 오염 정도를 평가한다 (Kemp et al., 1976; Kin dler and Servin, 1990; Lee et al., 1997; 이평구, 이재영 1997; 이평구 외, 2001). Fig. 9와 같이 PC 01 코어의 경우 농축계수(EF)값이 약 15cm 부근(Fe 7.3, Cu 13.9\*10,000, As 30.0\*10,000, Pb 12.6\*100,

Zn 27.4\*10,000, Ni 16.5\*10,000, Cr 22.4\*10,000, Ba 66.0\*10,000)에서 다른 깊이의 값들 보다 비교적 높은 값을 보이고 있고, PC 02 코어의 경우는 약 7cm 부근(Fe 6.3, Cu 6.4\*10,000, As 4.5\*10,000, Pb 6.4\*100, Zn 14.5\*10,000, Ni 7.9\*10,000, Cr 8.3\*10,000, Ba 37.8\*10,000)에서 높은 값을 보인다. 이는 수직의 과잉 방사능 납( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ )의 방사능 분포에서 급격히 차이가 나는 약 35cm 깊이를 기준으로 상부층과 하부층의 퇴적 속도차가 있는 것으로 추정되었다. 35cm 이하 되는 곳은 시화방조제 건설이전의 퇴적층으로 추정되며, 35cm 이상 되는 것은 방조제 건설 및 형도 주변의 방수벽 또는 농로 건설로 인해 급격하게 퇴적물 유입이 되어 퇴적 된 것으로 예상되어 중금속 농축계수(EF) 계산값도 높게 나타났다고 판단된다.

표층 퇴적물(S 06 제외) 및 주상 퇴적물의 평균 입도 크기에 대한 AI의 상관계수가 각각 0.09로 낮은 상관관계를 보였고, Fe-Al, As-Al, Cr-Al에 대해서는 각각 0.40, 0.77, 0.43으로 다소 상관성이 있었다. TOC와 금속성분들 사이에는 0.04(Pb-TOC)~0.67(Zn-TOC)로 Zn과 TOC에서 가장 높은 값을 보였다. 그리고 AVS와 금속성분들 사이에서는 0.00(Zn-AVS)~0.12(Pb-AVS)로 TOC와 금속성분들 사이보다 더 낮게 나타났다.

## 6. 결 론

시화호 남측에 위치한 형도는 시화방조제 건설 이전의 퇴적층과 방조제 건설 이후 농로 건설에 의해 급격하게 퇴적물이 유입되어 대규모의 환경변화가 발생했으리라 판단된다. 시화호 형도근처 표층퇴적물 및 주상퇴적물 조사 정점을 선정하여 퇴적물 특성을 파악하고, 퇴적환경 및 갯벌의 지화학분석에 대한 중금속 농도 특성 등을 알아보고 어떠한 항목 및 요인(변수)들이 크게 작용하였는지를 알아보고자 하였다. 표층 퇴적물의 Al 1.54%, Fe 1.75%, Cu 9.1ppm, As 1.1ppm, Pb 18.8ppm, Ni 11.0ppm, Cd 0.02ppm 그리고 Cr

은 30.1ppm으로 분석되었으며, 주상 퇴적물은 미국해양대기청(NOAA) 기준인 ERL 초과하지 않았다. 그러나 표층퇴적물 S 07 1개 정점에서 AVS는 130 mg/g, TOC는 1.31%로 높은 함량을 보였는데, 이는 퇴적물 중 연속적인 유기물 분해과정에 공극수의 질산염, 철·망간산화물, 그리고 황산염의 산소가 이용되어 황화물이 환원된 결과로 판단된다. 주상퇴적물의 과잉 방사능 납( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ )의 분포를 통해 추정한 결과, 퇴적물이 다량 유입되어 수직적으로 방사능(activity)이 유사한 값을 나타내고 있기 때문에 정확한 방사능 퇴적률은 추정할 수 없었다. 그러나 금속성분의 배농농도값을 이용하여 금속성분의 농축계수(EF)를 계산하여 산정한 결과, PC 01 코어는 15cm 부근, PC 02 코어는 7cm 부근에서 높은 값을 보였는데, 이는 과잉 방사능 납( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ )의 분포결과와 연계하여 35cm 이하 되는 곳은 시화방조제 건설이전의 퇴적층으로 추정되며, 35cm 이상 되는 것은 방조제 건설 및 형도 주변의 방수벽 또는 농로 건설에 의해 급격하게 퇴적물이 유입되어 퇴적 된 것으로 예상되며, 방조제 건설 등으로 최근에 들어서 중금속 농축계수(EF) 계산값도 높게 나타났다고 판단된다. 그러나 몇몇 금속들간의 상관관계를 제외하고 기타항목간의 상관관계가 높지 않아 시화호 및 형도 주변에 대한 연계연구가 지속적으로 필요하다고 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년 한국해양연구원 “갯벌 기능성 회복을 위한 퇴적/물리/생태학적 핵심 환경요소 연구(PE98462)” 및 2011년 “해양위성센터 기능고도화 사업(PE98620)”의 일환으로 수행된 연구결과를 정리하여 작성된 것입니다.

## 참 고 문 헌

1. 국립환경연구원, **정책 결정자를 위한 수질관련 기준 비교분석**, 38010-67730-37-0010, pp.

- 17-18, 2000.
2. 국토해양부, **시화호 해양환경 개선 사업**, BSPM54791-2138-4, pp. 284-285, 2009.
  3. 김경태, 김은수, 조성록, 박준건, 박청길, 시화호 및 주변 하천 표층퇴적물의 중금속 분포변화, *Ocean and Polar Reserch*, 제25권, pp. 447-457, 2003.
  4. 권영택, 마산만 오염퇴적물 준설토 투기해역의 중금속 오염평가, *한국해양환경공학회지*, 제7권, pp. 75-81, 2004.
  5. 이평구, 박성원, 염승준, 공주 금홍매립지의 중간복토재 및 차수재(논토양)의 중금속 오염과 존재형태 연구, *자원환경지질*, 제34권, pp. 283- 299, 2001.
  6. 이평구, 이재영, 프랑스 A- 71 고속도로변 Retention pond의 기능 평가, *한국토양학회지*, 제2권, pp. 73- 81, 1997.
  7. 일본수산자원보호협회, **수산환경퇴적물 기준**, pp. 88, 1972.
  8. 최만식, 천중화, 우한준, 이희일. 시화호 표층퇴적물의 중금속 및 퇴적상 변화, *한국환경과학회*, 제8권, pp. 593-600, 1999.
  9. 해양수산부, **시화호 해양환경 개선 사업**, BSPM226-00-1607-4, pp. 3, 2004.
  10. 해양수산부, **해양오염퇴적물 조사 정화복원 체계 구축 [II]**, BSPM333000-1805-4, pp. 239-255, 2005.
  11. 해양수산부, **시화호 해양환경 개선 사업**, BSPM44101-1932-4, pp. 182-183, 2007.
  12. 해양수산부, **해양환경공정시험방법**, pp. 1-250, 2008.
  13. 화성시문화재단, **화성 고정리 공룡알화석지 자연유산자원조사 결과 보고서**, BSPG47360-2129-5, pp. 48, 2009.
  14. 환경부, **습지보전기본계획**, pp. 60-80, 2007.
  15. Calvert, S.E., Mineralogy and geochemistry of nearshor sediments. In: *Chemical Oceanography*, Vol. 6 2nd ed., eds. by J.P. Riley and Chester R. Academic Press, London. pp 187-280, 1976.
  16. Folk, R.L, *Petrology of sedimentary rocks* Hemphill's Austin. Texas, pp. 170, 1968.
  17. Google maps, <http://maps.google.co.kr>, 2011.
  18. Horowitz, A., and Presley, B.J., Trace metal concentrations and partitioning in zooplankton, neuston, and benthos from the south Texas outer continental shelf, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 5, pp. 241-225, 1977.
  19. Kemp, A.L.W., Thomas, R.L., Dell, C.I., and Jaquet, J.M., Cultural Impact on the Geochemistry of sediment in Lake Erie, *Journal of Fish Research Board Canada*, Vol. 33, pp. 440- 462, 1976.
  20. Kindler, F.M., and Sevin, H.E., Heavy metals in sediment of Turkish river systems. Natural background and anthropogenic effects, In Broekaert J.A.C.(ed), *Met al Speciation in the Environmental*, pp. 601- 611, 1990.
  21. Kim K.H., and Burnett W.C., Gamma-ray spectrometric determination of uranium-series nuclides in marine phosphorites, *Anal. Chem*, Vol. 55, pp. 1796-1800, 1983.
  22. Krumbein, W.C., Size frequency distributions of sediments, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 4, pp. 65-77, 1934.
  23. Lee, P.K., Baillif, P ., Touray, J.C., and Ildefonse, J.P., Heavy Metal Cont amination of Setting Particles in a Ret ention Pon d along the A - 71 Motorway in Sologne, France, *Society of Total Environment*, Vol. 201, pp. 1- 15, 1997.
  24. Long, E.R., MacDounald, D.D., Smith, S.L., and Calder, F.D., Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical

- concentrations in marine and estuarine sediment, *Environment Management*, Vol. 19, pp. 91-97, 1995.
25. Rudnick, R.L., and Fountain, D.M., Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective, *Rev. Geophys.*, Vol. 33, pp. 267-309, 1995.
26. McManus, J., Grain size determination and interpretation, In *Techniques in Sedimentology*, Tucker M (ed.), Blackwell: Oxford, pp. 63-85, 1988.
27. NOAA, National status and trends program for marine environmental quality, NOAA Technical Memorandum NOS OMA, USA, pp. 8-60, 1987.
28. Ruttenberg, K.C., Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorous in marine sediments, *Limnology and Oceanography*, Vol. 37, pp. 1460-1482, 1992.
29. Udden, J.A., Mechanical composition of clastic sediments, *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol. 25, pp. 655-644, 1914.
- 논문접수일 : 2011년 04월 05일  
○ 심사의뢰일 : 2011년 04월 19일  
○ 심사완료일 : 2011년 07월 13일