

자연습지 우포늪 퇴적물의 연도별 잔류성 중금속 축적도

이 찬 원* / 부 민 호** / 전 홍 표*** / 임 경 원**** / 김 기 호*****

Vertical Distribution of Persistent Heavy metals in Core Sediments from Upo Wetland

Chan Won Lee* / Min Ho Boo / Hong Pyo Jeon / Kyung Won Lim / Ki Ho Kim

Abstract : Sediment cores were obtained from Upo and Mokpo in Upo Wetland and core samples were divided by depth into 20 ~ 21 subsamples. The heavy metal concentrations of Fe, Mn, Zn, AS, Cu, Cd, Ni, Pb, and Cr in the sediments of each depth were determined by ICP-MS. The texture of sediments from Upo Wetland appeared to be clayey silt with average grain size of 7.52 ~ 11.15 μm for physical properties. It was found to have a clear tendency of depth profile with respect to TOC and ignition loss. Organics were stabilized in the range of 0.5 ~ 0.7 % TOC and 8 ~ 9 % ignition loss in 30 years, whereas, the surficial sediments have the highest concentrations of about 3.0 % of TOC and 13 ~ 15 % ignition loss. Those are much higher than the values of the main stream, the Nakdong River, which reflects the deposit of biodegradable organics from plants and other lifes. The vertical distribution of heavy metals in two sediment cores was investigated to elucidate historical trends of heavy metals deposited into Upo wetland. The depth profile concentrations of each heavy metal were compared and discussed with the Concensus-Based Sediment Quality Guidelines for freshwater ecosystems. All the Cd data for the vertical distribution in the sediments were detected above PEC value for Cd, which predict harmful effects on sediment-dwelling organisms expected to occur frequently. The concentrations of Zn, Cu, and Cr in all sediment samples for depth profile were detected below the TEC values, which provided a basis predicting the absence of toxicity by Zn, Cu, and Cr.

Keywords : Core sediment, Heavy metals, Upo wetland, Sediment quality guidelines

1. 서 론

우포늪은 창녕군 유어면, 이방면 및 대합면에 걸쳐 원시생태계를 유지하고 있는 국내 최대의 내륙습지이다. 낙동강 본류의 물이 소하천인 토평천의 골짜기를 따라 거슬러 올라가면서 퇴적물이 쌓여 자연제방이 생기고 그 안쪽에 물의 일부가 남아서 우포, 목포, 사지포의 배후습지가 되었다. 우포도 홍수 때 낙동강물이 역류하면서 수심이

깊어지고 평소에는 낙동강으로 자연 배수되어 수심이 낮아졌다 (박수영 등 2000). 우포늪은 1997년 7월 26일 생태계보전지역 중 생태계특별보호구역 (환경부고시 1997-66호)으로 지정되었으며 국제적으로도 1998년 3월 2일 람사르협약 보존습지로 지정되었다. 그리고 1999년 8월 9일 습지보호지역으로 지정하여 관리하고 있다. 람사르협약에 의하여 생태적으로 습지에 의존하는 조류인 물새들 중 몇 종류의 국제적으로 중요한 군집

+ Corresponding author : forest96@kyungnam.ac.kr
* 정희원 · 경남대학교 환경공학과 교수 · 공학박사
** 일반회원 · 경남대학교 환경공학과 대학원 · 박사수료
*** 일반회원 · 경남대학교 환경공학과 대학원 · 박사수료
**** 일반회원 · 경남대학교 환경공학과 대학원 · 석사
***** 일반회원 · 경남대학교 화학과 대학원 · 박사수료

(알려진 개체의 1% 이상)이 서식하고 있는 우포늪은 람사르 협약에 의하여 국제적으로 중요한 습지로 인정되었다. 세계적으로 개체수가 줄어들고 있는 큰고니, 큰기러기, 가창오리, 청머리오리가 우포늪의 주요 물새로 간주되고 있으며 생물종다양성과 아름다운 경관이 뛰어난 습지이다. 비가 연속적으로 내리는 집중호우나 홍수기가 되면 낙동강의 수위가 평상시보다 7~8m이상 상승하고 상승한 낙동강 본류의 수위는 토평천을 거슬러 올라가 우포습지의 집수역에서 내려오는 물과 함께 습지의 수위를 4~5m이상 크게 상승시킨다. 홍수로 증가한 수위는 3-4 일에서 길게는 10여일 정도까지 머물기도 한다(박수영 등, 2000)

중금속과 잔류성 유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)은 인간의 건강을 위협하고 생태계 내 생물체에 강한 독성을 나타낸다. 또한 자연적인 분해가 느리기 때문에 환경에 오래 잔류하여 생태계 내 먹이사슬을 통하여 생물농축 된다. 또한 일부 물질은 다양한 산업공정에서 부산물로 발생되고 있어 이들이 환경이나 인체 건강에 미치는 피해가 보고되기도 하였다.

2008년 람사르총회가 개최되는 중심습지로서의 우포늪 퇴적물 잔류성 오염물질의 연도별 변화 측정은 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 환경오염 물질의 최종도착지인 퇴적물에서 중금속의 잔류경향을 알아보기 위하여 잘 보존된 퇴적물 주상시료를 쉽게 구할 수 있는 우포늪에서 주상 퇴적물을 채취하여 퇴적물 수직오염 분포를 조사하였다.

2. 재료 및 실험방법

퇴적물 주상시료의 채취를 통하여 과거의 퇴적

경향과 오염물의 수직분포를 조사하기 위해서는 준설이나 피복 등과 같은 인위적인 교란행위가 없었던 우포늪의 퇴적물을 채취하여 실험하였다.

2.1 시료채취

우포늪(Fig. 1)은 우포, 목포, 사지포, 쪽지별로 구성되어 있고 주상퇴적물 시료는 우포(S1) 과 목포(S2)에서 채취하였다. 증력식 주상퇴적물 채취기(Ø20cm ×100 cm)를 이용하여 약 70~80 cm 길이의 주상퇴적물을 채취하고 일정한 크기로 20분획하여 유리로 된 용기에 담았다. 채취된 시료는 현장에서 수소이온농도(pH) 및 산화환원전위(Redox potential, ORP)를 휴대용측정기(IQ150, TQ Scientific Instruments, Inc., USA)를 이용하여 측정하였으며 실험실로 옮겨 분석할 때까지 냉동 보관하였다.

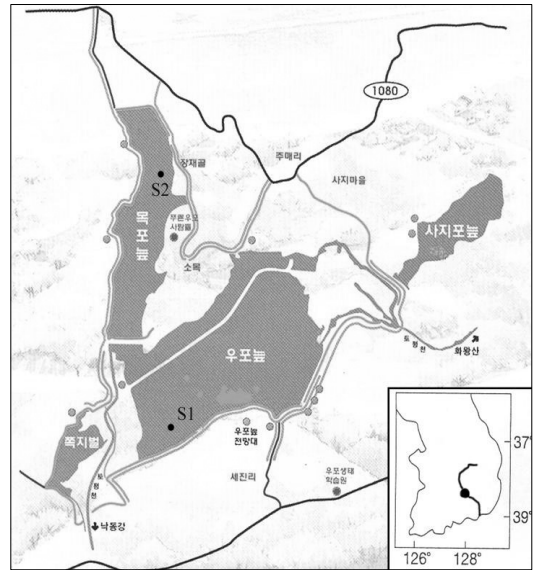


Fig. 1. Sampling sites of Upo wetlands

Table 1. Sampling sites and geographical position

Site	Geographical position		sample length (cm)	Remark
	latitude	longitude		
S1(n=20 fraction)	35° 32' 14"	128° 24' 30"	70	Upo
S2(n=21 fraction)	35° 32' 49"	128° 24' 39"	80	Mokpo

Table 2. CHN analyzer conditions for TOC analysis

Items	Conditions
Instrument	EURO EA(Eurovector)
Column	80/100 Porapack Q, 1.8m
Oven temp(°C)	90
Reactor temp(°C)	1010
Floe rate(ml/min)	He, 110
Oxidation time(sec)	10 sec
Run time(sec)	540

2.2 퇴적물의 물리화학적 특성분석

우포늪 퇴적물의 물리화학적 특성을 위하여 수분함량, 강열감량(Ignition loss, IL), 입도 그리고 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)를 해양오염공정시험방법 (2005) 중 해저퇴적물편(해양수산부고시 제2005-61호)에 의하여 측정하였다. 본 연구에서 입도분포는 퇴적물 입자들에 레이저를 조사하여 회절된 패턴을 입사된 빔의 축과 각도의 함수로서 회절된 빛의 강도를 측정하여 입도 분포를 분석하는 입도분석기(Particle Size Analyzer, LS230 & N4PLUS, Coulter Corporation, USA)를 이용하여 퇴적물의 입도를 분석하였다. 입도분석 후 전체입도 분포에 대한 입자의 평균 크기인 평균입도와 가장 작은 크기의 입자와 가장 큰 크기의 입자에 대한 누적분포곡선상의 누적백분율에서 50%에 해당하는 값(D_{50}) 등은 분석기기 상의 소프트웨어를 이용하여 구하였다. 퇴적물 내 유기물의 함량은 저서환경의 질을 평가하는 척도의 하나로 널리 사용되고 있다. 하지만 퇴적물 내의 유기물은 퇴적물 내에서 다양한 형태와 종류로 존재하며 그 공급원 또한 매우 다양하다. 그런 까닭에 퇴적물의 유기물량을 정량적으로 측정하는 일은 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 유기물을 대표하며, 비교적 측정이 용이한 유기탄소를 측정한다. 유기탄소량 측정에는 여러 가지 방법이 이용된다. 하지만 이 방법들의 공통된 원리는 유기탄소를 시약이나 고온 등으로 산화시켜 분해된 유기물 속의 탄소량을 알아내는 것이다. 한편 역적정법은 산화

제를 사용하여 유기물을 산화시킨 후, 소모된 산화제의 양을 알아내어 유기탄소량으로 환산하는 방법이다. 본 연구에서의 퇴적물 내 유기탄소량 측정은 1M 염산으로 30분간 산 처리 하여 방해물질인 퇴적물 내 carbonate를 제거하기 한 후 CHN 분석기로 Table 2와 같은 조건으로 분석하였다.

2.3 우포 퇴적물의 중금속 분석

동결건조 후 곱게 간 시료를 105 °C 오븐에서 하룻밤 동안 건조시킨 후에 고압용 테프론 용기에 시료 약 25 mg 과 HNO_3 , HF, HClO_4 의 혼합산을 넣고 뚜껑을 닫은 후, 가열판 위에서 용해시켰다. 용해된 시료는 가열판에서 산을 날려 보낸 후에 1 % 질산에 녹여 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, ELAN6100DRC)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 퇴적물의 물리화학적 특성

우포늪 두 지점에서 채취한 주상퇴적물 시료에 대한 물리화학적 특성 분석결과를 Table 3에 나타내었다. 일반적으로 퇴적물에서 대부분의 오염물질의 분포 및 축적은 퇴적물 입자 크기에 의해 크게 좌우된다. 입자의 크기는 유기탄소 또한 오염물질의 퇴적물 내 분포를 조절하는 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있다. 김 등(2005) 등이 팔당호에서 행한 연구에서 퇴적물 입자의 크기가

Table 3. Physio-chemical properties of sediments in the Upo wetland

Sites	pH	Temp. (°C)	D ₅₀ (μm)	Average particle size (μm)	water content (%)	TOC (%)	IL (%)
S1 (n=20)	4.7±0.49	14.61±0.55	4.08±0.74	7.52±2.31	53.42±15.62	1.5±0.8	9.69±1.54
S2 (n=21)	5.16±0.68	14.89±0.34	4.86±1.59	11.15±7.03	51.05±15.51	1.43±0.72	10.73±2.63

작을수록 퇴적물 내 유기물 함량이 높았으며, 유기탄소량도 퇴적물 내 중금속 농도와 밀접한 상관관계에 있다고 보고하였다. 우포와 목포 두 지점의 평균입도는 세립질의 실트(8φ 이하)로 구성되어 있음을 알 수 있다. pH의 경우 다른 지역의 늪과 마찬가지로 약산성을 나타내고 있었는데 이는 다량의 식물사체들의 부식에 의하여 발생하는 부식산의 영향으로 생각된다. ORP 측정은 주상퇴적물의 최상부층에서 실시하였으며, S1과 S2 두 지점 모두 환원적 환경을 이루고 있음을 알 수 있었다. 퇴적물 내 유기물 함량을 알아보기 위하여 TOC와 IL을 측정하였으며 TOC는 우포 0.6~3.1%(평균 1.5%), 목포 0.5~2.7%(평균 1.4%)이었다. IL은 우포 8.6~13.7%(평균 9.7%), 목포는 8.0~15.7%(평균 10.7%)의 범위로 측정되었다.

같은 방법으로 실험한 1998, 1999년의 퇴적물의 강열감량(Ignition Loss) 수치인 11~13%와 비교할 때 2006년의 평균값이 다소 낮았으나 동일한 범위에 속하였다(이찬원 등 2002).

3.2 우포늪 중금속 분석결과

우포늪 퇴적물의 중금속 농도와 TOC 간의 상관관계를 살펴보면 우포(S1)의 경우 Cr, Ni, Cu, Cd는 각각 $r = 0.7509(p<0.001)$, $0.8687(p<0.001)$, $0.8620(p<0.001)$, $0.5938(p<0.006)$ 의 상관관계를 보였으나, 목포(S2)의 경우 중금속과 TOC의 상관관계는 상대적으로 매우 낮았다.

방사선 동위원소 Pb에 의한 퇴적물 조사 결과(부민호 등 2008)에 의하면 우포(S1)는 2.55 cm/year, 목포(S2)는 3.66 cm/year로 나타났다. 이를 바탕으로 퇴적연도별 TOC와 강열감량의 깊

이 수직분포(Depth profile)를 Fig. 2에 보여주고 있다. 중금속의 수직분포는 Fig. 3에 정리하였다.

TOC와 강열감량의 뚜렷한 수직분포 변화에서 보는 바와 같이 약 30년전의 퇴적물 유기물질 함량이 가장 낮고 최근에 퇴적한 시료의 유기물질 함량이 높은 경향을 잘 보여주고 있다. 이는 분해가 용이한 유기물질이 시간의 경과에 따라 점차 분해되었음을 말해주고 있다. 반면에 중금속의 경우 분해가 잘되지 않고 그대로 잔류하고 있기 때문에 오염의 과정을 알 수 있다. 1984년 또는 1985년경에 몇몇 중금속이 최대치를 보이고 있으나 깊이별(년도별)로 일정한 경향을 보여주지 않고 있다.

우포(S1)와 목포(S2)의 중금속 농도를 Table 4에서 비교해 볼 때 Zn과 Pb는 95% 신뢰구간에서 두 지점간의 차이가 있었다. 일반적으로 중금속 평균값이 우포가 높았으며 특히 Zn과 Pb는 통계학적으로 우포의 농도가 높았다. 우포는 예로부터 지형이 주변지역보다 낮아서 흘러 들어오는 물들이 합쳐져서 소용돌이를 형성하였다고 한다. 우포에는 마치 소가 늪에 머리를 대고 물을 마시는 것처럼 보이는 우항산이 있고, 이 소의 목에 해당하는 부분을 소목이라고 한다. 그리고 주변에 소를 풀어 놓고 풀을 뜯게해서 이곳의 늪을 소벌이라고 불렀다고 한다. 목포(나무벌)는 비가 많이 오면 주변의 나무들이 떠내려 오던 곳이라서, 사지포(모래벌)는 모래가 많아서, 쪽지벌은 크기가 작아서 붙은 이름들이다. 이 처럼 각 늪의 이름은 늪의 특성을 알 수 있는 유래를 갖고 있다. 우포늪, 목포늪, 사지포늪, 쪽지벌을 통틀어 우포늪이라고 한다.



Fig. 2. Yearly distribution (depth profile) of TOC and Ignition Loss in Upo wetland

Table 4. Concentrations of Persistent Heavy metals in Core Sediments from Upo Wetland

Metals (in mg/kg DW)	Wetland	Upo	Mokpo
		Average ± Standard deviation	Average ± Standard deviation
Arsenic		12.27 ±1.97	11.90 ±2.67
Cadmium		8.12 ±0.57	7.53 ±0.37
Chromium		34.91 ±5.81	31.86 ±2.77
Copper		27.93 ±4.27	28.01 ±4.46
Lead		39.63 ±3.86	18.64 ±0.70*
Nickel		24.85 ±2.91	23.73 ±1.47
Zinc		100.00 ±11.11	72.88 ±10.15*
Manganese		505.81 ±163.18	503.68 ±69.85
Fe(%)		3.68 ±0.19	3.54 ±0.13

* Following a given parameter indicates significant difference (P<0.05) between Upo and Mokpo

우리나라는 담수 퇴적물에 관한 국가기준이 아직 없다. 퇴적물관리를 위한 외국의 기준들은 매우 상이하게 설정되어 있다. 또한 퇴적물의 오염물질 항목, 기준농도, 기준설정 목적, 오염수준 분류방법, 사용용어 등도 나라마다 다르게 정해져 있다.

Long 등 (1995)은 오염물질의 농도와 실제 관찰되는 생물의 악영향에 근거하여 오염여부를 평

가하는 증거자료가중법을 사용한 기준으로써 퇴적물과 관련된 350여 편의 연구결과를 바탕으로 퇴적물 환경에서 화학물질이 생태계에 미치는 영향에 대한 데이터베이스를 구축하여 종합적인 해석을 통해 오염물질이 생태계에 미치는 기준을 설정하였다. 그 기준은 2단계로 통계적으로 저서생물에 10% 악영향이 나타날 수 있는 농도 ERL (Effect Range Low)과 50% 악영향이 나타날 수

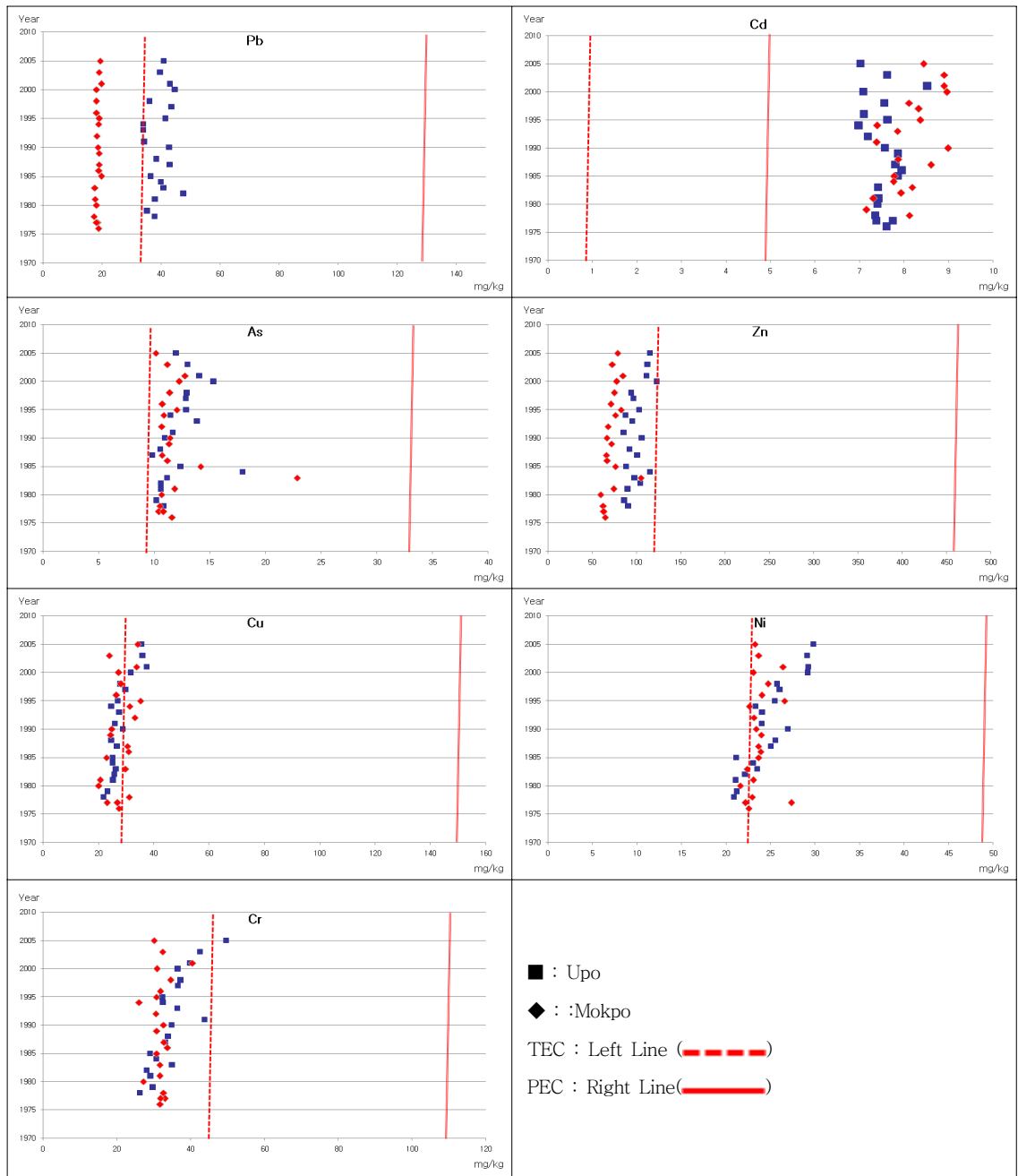


Fig. 3. Depth profile of heavy metals in Upo wetland

있는 농도 ERM(Effect Range Median)으로 설정하였다(Long et al., 1995, 1998). 우포와 목포의 주상퇴적물 중 Cd만 제외한 모든 중금속 평균농도가 ERL보다 낮았다. Cd의 평균농도는 ERL은 초과하지만 ERM 보다는 낮았다.

최근 MacDonald 등 (2000)에 의하여 담수생태계를 위한 퇴적물관리기준 (Sediment Quality Guidelines)을 개발하였다. 특히 담수생태계의 저서생물 서식 보호를 위한 관점에서 많은 환경독성 데이터가 포함된 기존의 퇴적물관리기준들을 활용

하여 Consensus-based TEC (Threshold effect concentration)와 PEC (Probable effect concentration)을 개발하였다. TEC이하의 해당 오염물질 농도에서는 저서생물이 유해한 영향을

받지 않고, PEC이상의 농도에서는 자주 유해한 영향을 받을 것으로 간주하고 있다. MacDonald 등 (2000)에 의하여 개발된 중금속에 관한 퇴적물기준을 Table 5와 Table 6에 정리하였다.

Table 5. Sediment quality guidelines for metals in freshwater ecosystems that reflect TECs

Substance	Threshold Effect Concentrations						Consensus-Based TEC
	TEL	LEL	MET	ERL	TEL-HA28	SQAL	
Metals (in mg/kg DW)							
Arsenic	5.9	6	7	33	11	NG	9.79
Cadmium	0.596	0.6	0.9	5	0.58	NG	0.99
Chromium	37.3	26	55	80	36	NG	43.4
Copper	35.7	16	28	70	28	NG	31.6
Lead	35	31	42	35	37	NG	35.8
Mercury	0.174	0.2	0.2	0.15	NG	NG	0.18
Nickel	18	16	35	30	20	NG	22.7
Zinc	123	120	150	120	98	NG	121

TEL : Threshold effect level; dry weight (Smith et al. 1996)

LEL : Lowest effect level, dry weight (Persaud et al. 1993)

MET : Minimal effect threshold; dry weight (EC and MENVIQ 1992)

ERL : Effect range low; dry weight (Long and Morgan 1991)

TEL-HA28 : Threshold effect level for Hyalella azteca; 28 day test; dry weight (US EPA 1996a)

SQAL : Sediment quality advisory levels; dry weight at 1% OC (US EPA 1997a)

NG : No guideline

Table 6. Sediment quality guidelines for metals in freshwater ecosystems that reflect PECs

Substance	Probable Effect Concentrations					Consensus-Based PEC
	PEL	SEL	TET	ERM	PEL-HA28	
Metals (in mg/kg DW)						
Arsenic	17	33	17	85	48	33.0
Cadmium	3.53	10	3	9	3.2	4.98
Chromium	90	110	100	145	120	111
Copper	197	110	86	390	100	149
Lead	91.3	250	170	110	82	128
Mercury	0.486	2	1	1.3	NG	1.06
Nickel	36	75	61	50	33	48.6
Zinc	315	820	540	270	540	459

PEL : Probable effect level; dry weight (Smith et al. 1996)

SEL : Severe effect level, dry weight (Persaud et al. 1993)

TET : Toxic effect threshold; dry weight (EC and MENVIQ 1992)

ERM : Effect range median; dry weight (Long and Morgan 1991)

PEL-HA28 : Probable effect level for Hyalella azteca 28-day test; dry weight (US EPA 1996a)

NG : No guideline

Table 5와 Table 6에 제시된 해당 중금속기준인 TEC, PEC와 우포(S1)와 목포(S2)의 수직분포 데이터를 비교할 수 있도록 Fig. 3에 제시하였다.

우포 (S1)와 목포 (S2)의 퇴적물 깊이에 따른 연도별 중금속 농도 분포는 연도별(깊이별)로 뚜렷한 경향을 보여주지 않고 일정한 범위를 유지하고 있다. MacDonald 등 (2000)이 제안한 담수퇴적물의 TEC, PEC 중금속 농도기준은 Long 등 (1995)이 제안한 기준보다 더욱 엄격한 중금속 기준치를 보여주고 있다(Table5, Table 6). Cd의 경우 우포 목포 모두 PEC 기준을 초과하여 Cd로 인하여 저서생물이 유해한 영향을 받을 것으로 해석할 수 있다. 그 외에는 TEC보다 낮거나 또는 TEC와 PEC의 범위안에 분포한다(Fig. 3). 따라서 Cd, Pb, Cu, As 등의 중금속 분포변화에 관한 지속적인 모니터링이 필요하다.

퇴적물의 철 (Fe)과 망간 (Mn) 농도는 일반적으로 높지만 저서생물에 미치는 독성도는 낮아 대부분 국가의 퇴적물관리기준 항목에서 제외되어 있다. 우리나라의 토양과 해양퇴적물에서 상대적으로 높은 농도의 철과 망간이 검출되고 강변여과수 정수과정에서도 철과 망간이 높은 것으로 보고 되어 오염 판단의 근거로 고려되는 철과 망간의 천연부존량은 높은 것으로 판단한다.

4. 결 론

우포늪, 목포늪, 사지포늪, 쪽지벌을 통틀어 우포늪이라고 하며 각 늪의 이름은 늪의 특성을 알 수 있는 유래를 갖고 있다. 이 중 크기가 가장 큰 우포늪(S1)과 목포늪(S2)에서 주상퇴적물 시료를 채취하여 잔류성이 강한 중금속 수직분포와 퇴적물의 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

우포와 목포의 주상퇴적물 TOC와 강열감량의 수직분포는 상층의 농도가 높고 하층으로 갈수록 점점 낮아지는 뚜렷한 경향을 보여주고 있다. 약 30 년 전에 퇴적된 TOC와 강열감량의 농도는 각각 0.6%와 8.6%로 안정화되었고 최근에 퇴적된 층에서는 TOC가 약 3.0%, 강열감량은 약14%로

나타나 시간이 지남에 따른 유기물의 분해 정도를 알 수 있다.

우포늪 퇴적물의 깊이에 따른 연도별 중금속 농도를 살펴보면 우포와 목포의 평균값이 비슷하였으나 Zn과 Pb은 95%신뢰구간 차이검증 통계분석 결과 우포의 퇴적물이 목포보다 높았다.

담수퇴적물기준 (Sediment quality guideline)에 의하여 우포늪 주상퇴적물의 중금속 농도의 수직분포를 비교하였을 때, 우포(S1)와 목포(S2)에서 Cd의 농도 분포가 모두 PEC를 초과하고 있어 퇴적물의 Cd에 의하여 우포와 목포의 저서생물에 유해한 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다. 조사된 중금속 중 Zn, Cu, Cr은 거의 저서생물에 유해한 영향을 거의 미치지 않는 수준이었다.

감사의 글

본 연구는 2006년 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

박수영, 윤성운, 이기철, 배덕효, 김형수, 경남발전연구원, 습지학원론, 은혜기획, pp. 287-359, 2000.

우포사이버생태공원 홈페이지,
http://www.upo.or.kr/

이찬원, 이상천, 김종국, 부민호, 전홍표, 김기호, 최경희, 윤준현, 정미정, 자연습지 우포늪 퇴적물의 연도별 잔류성유기오염물질 축적도, 한국습지학회 학술발표대회, pp. 155-166, 2008.

해양수산부, 해양오염공정시험방법, 153-255, 2005.

ANZECC/ARMANZ, Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality, National Water Quality Management Strategy, 2, 8.4.1-8.4.30, 2000.

C. Matthai and G. F. Birch, Trace metals and

- organochlorines in sediments near a major ocean outfall on a high energy continental margin (Sydney, Australia), *Environmental Pollution*, 110(3), 411-423, 2000.
- MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger, T.A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 39, 20-31, 2000.
- Lee C.W., Kwon Y.T., Yun J.S., Moon S.W. 국내중 물벼룩 *Simocephalus mixtus*에 의한 습지퇴적물 독성도 측정, *한국환경과학회지 제11권(제9호)* 851-855, 2002.
- Kim S.K. et al. The effect of mean grab size and organic matter contents in sediments on the nutrients and heavy metals concentration. *J of KSEE* 29(9), 923-931, 2005
- Long E.R., MacDonald D.D., Smith S.L., Calder F. D., Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentration in marine and estuarine sediments. *Environ Management* 19:81-97, 1995.
- Long E.R., and MacDonald D.D. Predicting toxicity in Marine sediments with numerical quality guidelines. *Environ Toxicol Chem* 17:714-727, 1998.
- Persaud D., Jaagumagi R., and Hayton A., Guidelines for the protection and management of aquatic sediments quality in Ontario. Water Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, 27pp, 1993.
- Smith S.L., MacDonald D.D., Keenleyside K.A., Ingersoll C.G., and Field J., A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems, *J. Great Lakes Res* 22:624-638, 1996.
- Stuart L Simpson, Graeme E Batley, Anthony A Chariton, Jenny L Stauber, Handbook for Sediment Quality Assessment, Environmental TRUST, 6-45, 2005.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) , The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the United Staes. Volume 1: National Sediment Quality survey. EPA 823-R-97-006, Office of Science and Technology, Washington, DC, 1997