

새만금호 유입 하천 하상 퇴적물의 물리화학적 특성과 오염도 분석

Physicochemical Characteristics and Analysis of Pollution Potential in the Sediments of the Rivers Flowing into the Saemangeum Reservoir

오경희 · 유미나 · 조영철[†]
Kyoung-Hee Oh · Mi-Na Yu · Young-Cheol Cho[†]

충북대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(2011년 10월 24일 접수, 2011년 12월 30일 채택)

Abstract : In order to understand the extent of contamination of the sediments on the Mankyong and Dongjin Rivers flowing into the Saemangeum Reservoir, the concentrations of ignition loss (IL), COD, total nitrogen (T-N), total phosphorus (T-P), and heavy metals (As, Cd, Cr, Pb, Zn) were measured. The average concentrations of IL, COD, and T-P were 2.40 (± 2.18)%, 2.97 (± 3.06) mg/g sediment, 0.370 (± 0.351) mg/g sediment, respectively, showing the extent of contamination is not serious. However, the concentrations of these parameters in the samples taken in year 2009 were higher than those in year 2008, indicating the contamination of sediments goes on gradually. The concentrations of T-N were in the range of 0.59~13.11 mg/g sediment with variation of locations and seasons. It was determined that the T-N contamination is serious when the concentrations were compared with the dredging guidelines of sediments in the Korean freshwaters, indicating the countermeasures are required to maintain the water quality of the Saemangeum Reservoir. The concentrations of heavy metals except chromium did not exceed the worrisome level of soil contamination stipulated by the Soil Environment Conservation Act of Korea. The high concentration of chromium to be concerned in some samples from the upstream of Mankyong River requires source analysis and countermeasure to control the contamination.

Key Words : Saemangeum Reservoir, Mankyong River, Dongjin River, Sediment, Physicochemical parameters

요약 : 새만금호로 유입되는 만경강과 동진강의 하상 퇴적물의 오염도를 파악하기 위하여, 퇴적물 중 강열감량, COD, 총질소, 총인 및 중금속(As, Cd, Cr, Pb, Zn)의 농도를 분석하였다. 강열감량, COD, 총인의 농도는 각각 평균 2.40 (± 2.18)%, 2.97 (± 3.06) mg/g sediment, 0.370 (± 0.351) mg/g sediment이었으며, 이들 물질에 의한 퇴적물의 오염도가 높지 않았다. 하지만 2008년에 비해 2009년의 시료에서 농도가 증가하였으며, 이러한 결과는 퇴적물의 오염이 점진적으로 진행되고 있음을 의미한다. 총질소의 경우에는 0.59~13.11 mg/g sediment로 채취 지점 및 채취 시기에 따라 변이가 컸으며, 국내 하천 및 호소의 퇴적물 준설 기준과 비교할 때, 질소 오염이 심한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 새만금호의 수질을 유지하기 위하여 만경강과 동진강의 질소오염의 원인을 파악하고 대책 수립이 필요함을 의미한다. 중금속의 경우에는 크롬을 제외하고 토양오염우려기준을 초과하지 않아 오염이 일어나지 않은 것으로 판단된다. 크롬의 경우, 만경강 상류의 일부 지역에서 우려기준을 초과하는 높은 농도가 측정되어, 이에 대한 원인 분석과 대책 수립이 필요한 것으로 판단된다.

주제어 : 새만금호, 만경강, 동진강, 퇴적물, 물리화학적 요인

1. 서론

점오염원이나 비점오염원으로부터 호소나 하천으로 유입된 질소, 인 등의 영양염과 중금속, 농약 등의 오염물질은, 입자 상태의 물질로 변하거나 입자상 물질에 포함되어 수체의 바닥에 가라앉음으로써 퇴적물을 형성한다.¹⁾ 퇴적물은 주변 유역으로부터 오염물질의 유입 형태 변화에 따른 정보와 다양한 생지화학적 과정에 관한 정보를 가지고 있기 때문에 환경의 변화와 오염도 연구에 유용하게 이용되고 있다.²⁾ 퇴적물에 포함된 오염물질은 일정기간 축적되어 있다가, 분해, 확산, 재부유, 생물교란 등의 과정에 의해 수층으로 재용출되어 수질 및 수생태계에 영향을 미친다.³⁾ 외부 및 수층의 영양염 농도가 감소해도 퇴적물에서 재용출된 영양염으로 인해 수질이 악화되기도 한다. 따라서 퇴적물의 오염정도

로 수체의 오염가능성을 예측할 수 있기 때문에, 퇴적물에 포함된 오염물질의 농도를 기초로 퇴적물 관리수준을 설정하며, 오염이 심한 경우 준설 등의 적극적인 조치를 취하게 된다.⁴⁾

새만금 방조제 사업은 국토확장, 수자원 확보 등의 목적으로 1991년도에 공사를 착공하여 2006년 4월 21일 끝물막이 공사를 완료하였으며, 현재 내부 토지 활용 계획이 확정되어 개발이 진행되고 있다. 새만금 사업의 지속가능한 개발을 위해 가장 중요하게 다루어야 하는 문제 중 하나는 새만금호로 유입되는 오염물질의 양을 예측하고, 이로 인한 장기적인 수질오염 가능성에 효과적으로 대처하는 것이다. 새만금호의 해수유통이 중단되고 본격적인 담수호 과정이 진행되면 물의 체류시간이 증가하여 유입하천으로부터 유입된 오염물질이 호수에 축적됨으로써 물의 이용도를 저하시키며

[†] Corresponding author E-mail: choy@chungbuk.ac.kr Tel: 043-261-3577 Fax: 043-261-3577

저서 생태계에도 적지 않은 영향을 줄 수 있다. 또한 장기적으로 수환경 변화에 따라 수층으로 용출되어 호수의 수질오염을 가중시키는 내부오염원으로 작용할 수 있다. 따라서 새만금 사업의 지속가능한 개발과 새만금호의 정상적인 기능 유지 및 효과적인 수질관리를 위해서 새만금으로 유입되는 하천의 오염도를 파악하고, 이들 지역의 오염정도가 호수의 수질환경에 미치는 영향에 대한 평가가 필요하다.

새만금호로 유입되는 하천 중에서 금강이 가장 큰 규모이지만, 새만금의 수질에 직접적인 영향을 미치는 것은 만경강과 동진강이다.⁵⁾ 지금까지 만경강과 동진강의 수질 경향 및 유역의 오염 부하량에 대한 연구와 퇴적물 중 총인 및 인의 형태별 함량에 대한 연구가 진행되었다.⁶⁻⁸⁾ 하지만 만경강과 동진강의 하상 퇴적물에서 다양한 오염 지표에 대한 연구 결과는 많지 않다. 2004년부터 2005년까지 만경강과 동진강의 퇴적물 분석 결과에 따르면, COD는 동진강에서 10,865~20,377 mg/kg, 만경강에서 20,027~32,383 mg/kg의 범위로 측정되었고, TN는 각각 967~1,246 mg/kg, 1,067~1,524 mg/kg의 범위로, TP는 각각 917~1,307 mg/kg, 1,018~1,599 mg/kg의 범위로 분석되었다. 이러한 결과로부터 이들의 오염도가 국내 준설기준에 근접하므로 호내로 유입되는 퇴적물을 저감시킬 수 있는 시설의 필요성이 제기되었다.⁹⁾ 새만금호의 수질 예측 및 수질 관리를 위한 시설의 확충을 위해 보다 장기적인 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 새만금호의 상류유역인 만경강과 동진강 유역의 하상 퇴적물이 내부오염원으로서 새만금호의 수질에 영향을 미칠 수 있는 가능성을 검토하기 위해 이들 지역 퇴적물의 물리화학적 특성 분석을 통해 오염정도를 파악하였으며, 선행 연구의 결과와 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료 채취 및 전처리

만경강 및 동진강에서 공간적 분포 특성을 파악하기 위해 상류, 중류, 하류로 나누어 퇴적물을 채취하였다. 만경강에서는 대천, 만경제수문, 만경대교 지점에서 퇴적물을 채취하였으며, 동진강의 경우에는 신탄인, 동진제수문(구군포교), 동진대교 지점에서 퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 각 지점에서 횡적인 변이를 살펴보기 위해, 좌안, 중앙, 우안 지점으로 구분하여 퇴적물을 채취하였다. 시료는 2008년부터 2009년까지 7번에 걸쳐 grab sampler를 사용하여 채취하였고, 채취된 시료는 즉시 실험실로 옮겨 전처리 후 분석을 하였다. 채취한 일자 2008년의 경우, 8월 5일, 10월 10일, 11월 3일이었으며, 2009년의 경우에는 4월 11일, 6월 18일, 8월 25일, 10월 9일이었었다. 시료를 풍건한 후에, 육안으로 구분 가능한 유기물을 제거하고 가볍게 분쇄하였다. 분쇄한 시료를 2 mm 체(ASTM 표준체 No. 10)로 걸러 통과한 것을 실험에 사용하였다.

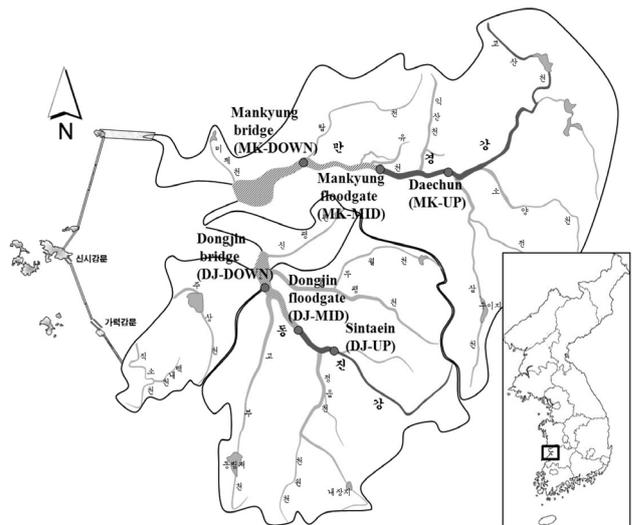


Fig. 1. Map of sampling site. The names in parentheses indicate the codes of sampling locations.

2.2. 물리화학적 특성 분석

퇴적물의 입도는 입자의 크기에 따라 체분석법과 입도 분석기를 사용하여 분석하였다. 체분석에는 1,000 (#18), 500 (#35), 212 (#70), 150 (#100), 106 (#140) μm 눈금 크기의 표준체를 사용하였다. 100 μm 이하의 입자는 입도분석기(Particle Size Analyzer; Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd., UK)를 사용하여 분석하였다. 토성은 입도분석에 나타난 입자 크기를 모래(sand, 0.05~2.0 mm in diameter), 실트(silt, 0.002~0.05 mm in diameter), 점토(clay, smaller than 0.002 mm in diameter)로 나누어 각각의 비율을 구한 후, 미국 농무국 토양 분류법(U.S. Department of Agriculture Textural Classification)에 따라 분류하여 정하였다.

pH_w는 채취 당일에 풍건시키지 않은 시료에 증류수를 더하여 진탕한 후 측정하였다(토양오염공정시험기준, ES 073 02.1). 강열감량(Ignition Loss; IL)은 풍건된 시료를 담은 도가니를 전기로에 넣고, 500°C에서 초기 30분간 가열하고 650°C까지 서서히 온도를 올려 3시간 동안 가열한 후 제습기에 옮겨 실온까지 냉각시켜 무게를 측정하였다. 가열 전후의 무게 차이를 이용하여 강열감량을 계산하였다. 퇴적물 중 COD 함량은 해양환경공정시험기준에 따라 분석하였다.¹⁰⁾ 총질소는 건조된 퇴적물 시료에서 Kjeldahl 질소분석법을 이용하여 분석하였다. 총인은 건조된 시료를 질산과 과염소산으로 분해한 후 아스코르빈산법으로 용존인의 농도를 분석하였다.¹¹⁾ 중금속(As, Cd, Cr, Pb, Zn)은 풍건시킨 시료를 2 mm 체로 거른 후, As의 경우 1 N HCl로 용출하였으며, Cd, Cr, Pb의 경우 0.1 N HCl로 용출하였다, 아연의 경우 0.15 mm (#100) 체로 거른 시료를 환류냉각관을 사용하여 염산과 질산으로 용출시켰다.¹²⁾ 용출된 시료에서 중금속의 함량은 유도결합플라즈마발광광도계(JY-38Plus, ISA Jobin Yvon, France)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

만경강과 동진강에서 채취한 하상 퇴적물의 pH_w 는 5.12~7.79의 범위로 중성 범위로 측정되었다. 만경강에서 채취된 하상 퇴적물의 입도 분석 결과, 하류로 내려갈수록 sand 입자의 비율이 감소하는 전형적인 경향을 나타내었다(Table 1). 채취 시기 및 지점에 따른 차이가 매우 컸으나, 만경상류의 경우 sand 입자인 0.5~1 mm와 0.2~0.5 mm 입자 크기가 전체의 50% 이상을 차지하였다. 만경강 중류 시료의 경우에는 0.005~0.05 mm 크기의 silt 입자가 가장 비율이 높았으며, 다음으로 0.2~0.5 mm 크기의 sand 입자의 비율이 높았다. 만경 하류에서는 중류보다 작은 크기의 sand와 silt 입자로 구성되어 있었으며, 상류보다는 clay 입자의 비율이 높았으나 중류와는 큰 차이가 없었다. 토성 분석 결과 “sand”에서 “silt loam”까지 다양한 종류로 분류되었으며, 상류의 경우 대체적으로 “sand”질을 나타내었다. 하류인 만경대교의 경우 채취 시기에 따라 토성이 다르게 평가되었는데, 홍수기 이전(4차 및 5차)에 채취한 시료의 경우 모두 “sandy loam”이었으나, 홍수기 이후 상류로부터 내려온 굵은 입자에 의해 “loamy sand”로 바뀌었다. 대체적으로 2009년에 채취한 시료에서 2008년에 비해 silt의 비율이 다소 높은 것으로 나타났다(Fig. 2). 동진강 퇴적물의 경우에는 만경강에 비해 하상

퇴적물이 대체적으로 작은 크기의 입자로 구성되어 있었다(Table 1). 동진강의 상류와 중류에서 채취한 퇴적물의 경우에도 만경강과 같이 모든 시료의 토성이 “sand”로 분류되었다. 하류인 동진대교에서 채취한 시료에서 silt 입자의 비율은 0.78~89%의 범위로 지점 또는 채취시점에 따른 변이가 만경대교에 비해 컸으며, 토성도 “sand”, “loamy sand”, “sandy loam”, “silt loam” 및 “loam”으로 다양하게 나타났다.

퇴적물 내 입도의 분포는 오염물질의 농도분포와 밀접한 상관관계가 있다.^{13,14} 즉 퇴적물의 입도가 작아질수록 유기탄소 및 중금속 등의 오염물질의 농도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 퇴적물 입자의 크기와 pH, 강열감량, COD, 총질소, 총인의 농도와 상관관계를 분석한 결과, pH를 제외한 모든 항목에서 퇴적물 중 silt 또는 clay 입자의 함량과 양(positive)의 상관관계를 나타내었다(Table 2; 상관분석, $p < 0.01$). 이러한 결과는 상류로부터 유입된 오염물질이 토양입자와 결합하거나, 오염물과 결합된 부유사가 침전되어 형성된 오염 퇴적토가 만경강과 동진강의 수질을 저하시키는 오염원으로 작용하고 있음을 의미한다.

만경강에서 채취된 퇴적물에서 강열감량은 상류가 평균 1.17 (± 0.60)%이었으며, 중류와 하류가 각각 평균 3.37 (± 3.32)%, 1.94 (± 0.62)%로 상류에 비해 높게 측정되었다(Table 3; t-test, $p < 0.01$). 시료 채취 지점 및 시기에 따른 변이가 심하였으며, 특히 중류인 만경강 제수문의 우안에서 2009년의 6월 18일, 8월 25일, 10월 9일에 측정된 강열감량이 각각 6.99, 12.9, 9.85%로 다른 지역에 비해 매우 높았다. 동진강의 경우 상류와 중류의 퇴적물 중 강열감량에 비해 하류의 오염도가 높았다(Fig. 3). 만경강과 동진강의 강열감량을 비교한 결과, 거의 비슷한 오염도를 나타내었다(t-test, $p = 0.22$). 두 강의 하류인 만경대교와 동진대교에서 채취한 시료의 강열감량을 비교하면, 만경강의 오염도가 높았다(t-test, $p < 0.001$). 퇴적물 중 clay 입자의 함량 또는 clay 입자와 silt 입자 함량의 합과 강열감량 간에는 높은 상관관계(Table 2; 상관분석, $p < 0.001$)를 나타내었다. 따라서 만경강과 동진강의 하류 퇴적물에서 높은 강열감량이 측정된 것은 이들 지역의 퇴적물을 구성하는 입자의 크기가 작기 때문인 것으로 판단된다.

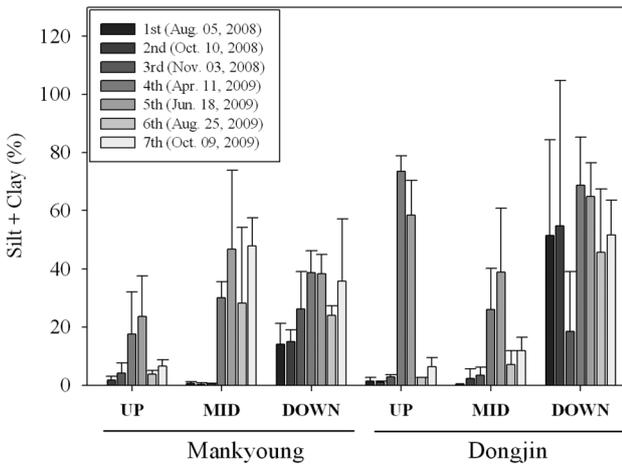


Fig. 2. Variation of contents of silt and clay particles in the sediments taken from Mankyong and Dongjin Rivers.

Table 1. Percentage distribution of particle sizes in the sediments from the Mankyong and Dongjin Rivers

Particle size (μm)	Mankyong			Dongjin		
	MK-UP	MK-MID	MK-DOWN	DJ-UP	DJ-MID	DJ-DOWN
1,000~2,000	17.6 (± 19.8)	2.31 (± 3.56)	0.06 (± 0.11)	16.9 (± 18.5)	23.3 (± 18.9)	2.13 (± 2.41)
500~1,000	29.2 (± 11.5)	16.7 (± 11.2)	4.12 (± 6.29)	25.8 (± 22.4)	27.5 (± 14.0)	7.57 (± 9.29)
200~500	25.9 (± 15.0)	23.3 (± 14.5)	11.6 (± 10.6)	8.54 (± 8.49)	15.6 (± 11.3)	6.27 (± 7.09)
100~200	7.94 (± 7.67)	9.14 (± 5.61)	24.7 (± 7.00)	3.38 (± 2.78)	5.00 (± 4.01)	7.49 (± 4.08)
50~100	6.55 (± 6.57)	10.4 (± 5.40)	25.3 (± 9.06)	10.2 (± 9.48)	7.65 (± 6.91)	18.8 (± 7.64)
5~50	10.6 (± 10.3)	30.9 (± 16.1)	28.7 (± 10.4)	30.0 (± 28.7)	17.1 (± 14.7)	47.8 (± 13.9)
< 5	2.24 (± 1.83)	7.38 (± 3.38)	5.53 (± 1.61)	5.21 (± 4.48)	3.87 (± 2.72)	9.94 (± 3.04)

* Numbers in parentheses indicate the standard deviations

Table 2. The correlation analysis of environmental parameters in the sediments taken from Mankyong and Dongjin Rivers

Parameters	pH	Silt	Clay	Silt + Clay	I.L.	COD	T-P	T-N
Silt	-0,042							
Clay	-0,069	0,920*						
Silt + Clay	-0,044	1,000*	0,931*					
I.L.	0,149	0,500*	0,544*	0,506*				
COD	-0,074	0,678*	0,669*	0,681*	0,474*			
T-P	-0,009	0,792*	0,657*	0,786*	0,439*	0,779*		
T-N	-0,041	0,663*	0,546*	0,658*	0,249*	0,609*	0,856*	
Heavy metals	-0,044	0,761*	0,631*	0,756*	0,438*	0,666*	0,882*	0,773*

* The values are statistically significant ($p < 0,01$)

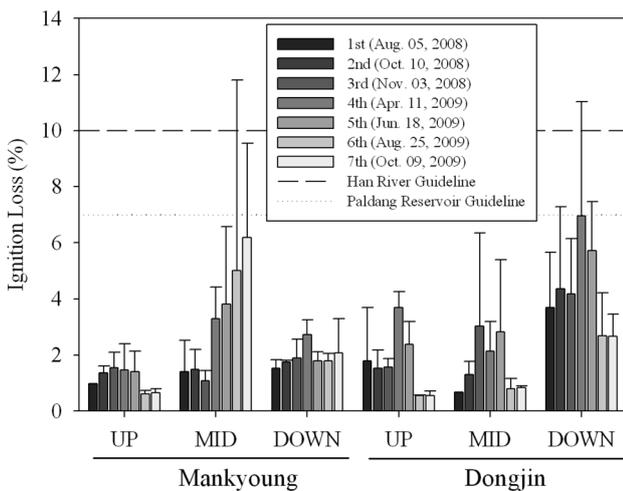


Fig. 3. Variation of ignition loss in the sediments taken from Mankyong and Dongjin Rivers.

국내에서는 퇴적물 관리체계가 정립되어 있지 않아 퇴적물 오염도를 판단할 수 있는 범용적 기준이 설정되어 있지 않다. 팔당호, 한강하류, 속초 청초호, 대청호, 금호강 등의 일부 호소나 하천에서 퇴적물을 관리하기 위한 퇴적물 제거 기준에 대한 연구 결과를 퇴적물의 오염도를 판단하는 기준으로 널리 사용하고 있으며, 이들 기준에서 퇴적물 중 강열감량, COD, 총인, 총질소, 황화물의 농도가 지표로 활용되고 있다.¹⁵⁾ 강열감량의 경우, 한강하류 및 금호강에서 10%, 팔당호와 대청호에서는 7% 이상이 준설 기준으로 설정되어 있다. 만경강에서 채취한 59개의 퇴적물 시료 중 중류인 제수문의 우안에서 12.9와 9.85%의 강열감량이 측정되

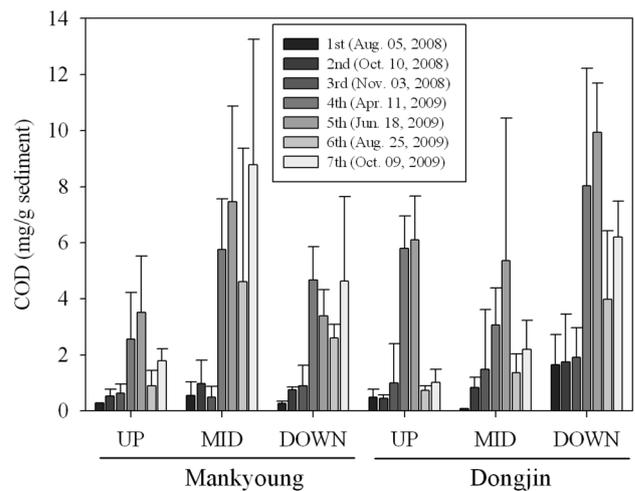


Fig. 4. Variation of chemical oxygen demands in the sediments taken from Mankyong and Dongjin Rivers.

었으며, 동진강의 61개 시료 중 하류 지점인 동진대교의 우안에서 7%가 넘는 값이 2회 측정되었다. 이들 결과를 제외한 시료에서 강열감량은 평균 2.13 (± 1.63)%로 국내 하천 및 호소의 준설 기준에 비해 낮은 값을 나타내었다.

만경강과 동진강의 퇴적물 중 COD 값은 강열감량과 같은 양상을 나타내었다. 만경강 상류, 중류, 하류 퇴적물 중 COD 평균값은 각각 1.58 (± 1.46), 4.44 (± 4.13), 2.46 (± 2.08) mg/g-sediment이었으며, 대체적으로 중류에서 높은 값을 나타내었다. 동진강의 경우에는 상류, 중류, 하류에서 각각 2.22 (± 2.55), 2.27 (± 2.51), 4.78 (± 3.66) mg/g-sediment로 측정되었으며, 하류에서 높은 값이 측정되었다(Table 3, Fig. 4). 만경

Table 3. Ignition loss (I.L.), chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (T-P), and total nitrogen (T-N) in the sediments taken from Mankyong and Dongjin Rivers

Sample Information		I.L. (%)	COD (mg/g)	T-P (mg/g)	T-N (mg/g)
Mankyong	MK-UP	1.17 (± 0.60)	1.58 (± 1.46)	0.227 (± 0.162)	2.10 (± 1.20)
	MK-MID	3.37 (± 3.32)	4.44 (± 4.13)	0.595 (± 0.562)	4.14 (± 3.16)
	MK-DOWN	1.94 (± 0.62)	2.46 (± 2.08)	0.426 (± 0.275)	3.84 (± 2.22)
Dongjin	DJ-UP	1.73 (± 1.25)	2.22 (± 2.55)	0.201 (± 0.168)	2.44 (± 2.11)
	DJ-MID	1.77 (± 1.73)	2.27 (± 2.51)	0.325 (± 0.379)	2.87 (± 1.99)
	DJ-DOWN	4.32 (± 2.48)	4.78 (± 3.66)	0.448 (± 0.290)	4.90 (± 2.57)

* The values in parentheses are the standard deviations

강과 동진강 퇴적물의 COD 값은 차이가 없는 것으로 나타났다(t-test, $p = 0.59$). 시료 채취 시기에 따른 변화를 보면, 2008년에 채취한 시료의 COD 값은 평균 $0.89 (\pm 0.92)$ mg/g sediment인 반면, 2009년에 채취한 시료의 평균은 $4.36 (\pm 3.21)$ mg/g sediment로 약 4.9배 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 2008년과 2009년 사이에 많은 양의 유기물이 유입되었기 때문인 것으로 판단된다. 만경강과 동진강 퇴적물 중 COD의 농도는 국내 호소 및 하천 퇴적물의 준설 기준에 포함된 20 mg/g sediment에 비해 크게 미달된 값을 나타내어, 만경강과 동진강의 유기물 오염이 심각하지 않은 것으로 판단되었다.

퇴적물 중 총질소의 농도는 만경강과 동진강의 퇴적물에서 각각 $0.71\sim 13.1$, $0.59\sim 9.12$ mg/g sediment의 범위에서 측정되었으며, 채취 시기 및 지점에 따른 변이가 큰 것으로 나타났다(Fig. 5, Table 3). 만경강과 동진강의 총질소 농도의 평균은 각각 $3.38 (\pm 2.46)$, $3.42 (\pm 2.47)$ mg/g sediment로 통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났다(t-test, $p = 0.93$). 채취 시기별 변화를 살펴보면, 2008년과 2009년에 채취한 시료의 평균이 각각 $1.52 (\pm 0.75)$, $4.66 (\pm 2.39)$ mg/g sediment로, COD 측정 결과에서 나타난 바와 같이 2008년에 비해 2009년의 오염도가 크게 높아졌음을 알 수 있었다. 만경강과 동진강 퇴적물 중 총질소 농도를 타 담수 퇴적물의 준설기준과 비교하면, 대부분의 시료가 팔당호 준설 기준(1.1 mg/g-sediment)을 상회하였으며, 일부 지점에서는 한강하류 준설 기준(2 mg/g-sediment)을 초과하였다. 이러한 결과는 이들 지역 퇴적물은 탄소원(강열감량과 COD로 평가)보다 질소원에 의한 오염이 심각하게 일어남을 의미한다. 이러한 결과는 외부로부터 지속적으로 질소가 유입됨을 의미하며, 새만금호의 수질을 유지하기 위해서는 질소오염의 원인을 빨리 파악하여 대책을 수립하여야 할 것으로 판단된다.

만경강과 동진강 퇴적물 중 총인의 농도는 평균 $0.416 (\pm 0.393)$, $0.325 (\pm 0.302)$ mg/g sediment로 만경강과 동진강의 총인 오염도의 차이는 없는 것으로 나타났다(Table 3, t-test,

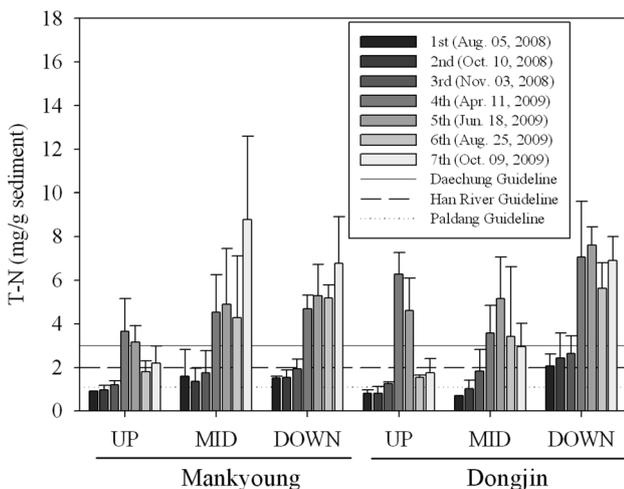


Fig. 5. Variation of concentrations of total nitrogen in the sediments taken from Mankyong and Dongjin Rivers.

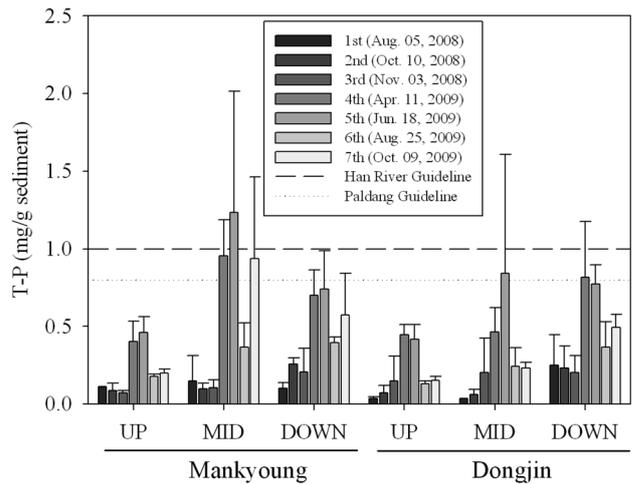


Fig. 6. Variation of concentrations of total phosphorus in the sediments taken from Mankyong and Dongjin Rivers.

$p = 0.156$). 총인의 농도가 가장 높은 것은 만경강 중류인 제수문의 우안과 동진강 중류인 군포교의 우안에서 채취한 퇴적물에서 측정된 것으로, 각각 2.13 , 1.72 mg/g sediment이었다. 채취 시기에 따른 변이를 살펴보면 다른 요인과 마찬가지로 2008년에 비해 2009년에 채취한 시료에서 높은 값이 측정되었다(Fig. 6). 이러한 결과는 두 지역 하상퇴적물의 오염이 점진적으로 진행되고 있음을 의미한다. 만경강의 경우, 상류, 중류, 및 하류에서 채취한 시료의 총인 농도가 각각 $0.227 (\pm 0.162)$, $0.595 (\pm 0.562)$, $0.426 (\pm 0.275)$ mg/g sediment로 상류에 비해 중류 및 하류의 농도가 높게 측정되었으며 (t-test, $p < 0.001$), 이는 만경강의 중류 지점에 인의 오염원이 있음을 의미한다. 동진강의 경우는 상류, 중류, 하류에서 총인의 농도가 각각 $0.201 (\pm 0.168)$, $0.325 (\pm 0.379)$, $0.448 (\pm 0.290)$ mg/g sediment이었으며, 상류에서 하류로 갈수록 오염도가 증가함을 나타내었다. 만경강과 동진강 퇴적물 총인의 평균 농도는 국내 여러 호수에서 측정된 값과 비교할 때, 낮은 것으로 판단되었다. 국내 호수 중 대청호, 소양호, 임하호, 진양호의 퇴적물에서 측정된 총인의 농도는 각각 1.2 , 0.78 , 0.88 , 0.61 mg/g sediment이었다.¹⁶⁾ 또한 국내 하천 및 호소의 퇴적물 준설기준 중 가장 낮은 농도의 총인을 설정한 팔당호의 기준(0.8 mg/g sediment)을 초과한 시료가 전체 120개 중 13개이었으며, 한강하류의 기준(1.0 mg/g sediment)을 초과한 시료가 전체의 5.8%로, 만경강과 동진강 퇴적물의 총인 오염도는 심각하지 않은 것으로 판단된다.

만경강과 동진강에서 채취한 퇴적물에서 분석한 중금속의 농도를 분석한 결과, 아연의 농도가 가장 높았으며, 납, 비소, 크롬, 카드뮴의 순이었다(Table 4). 채취지점과 채취시기에 따른 경향성은 전혀 없었으며, 이는 퇴적물 중 중금속의 농도가 높지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 실험 대상 지역의 중금속 오염도를 비교하기 위하여, 토양환경보전법의 토양오염우려기준과 토양오염대책기준을 사용하였다. 퇴적물 내 중금속의 농도는 분석 방법에 따라 크게 달라질 수 있다.¹⁷⁾ 2009년까지는 니켈과 아연을 제외한 중금속은 주로 염

Table 4. Heavy metals in Mankyong and Dongjin River sediments (mg/kg sediment)

Heavy metals	Guidelines*		Total	Mankyong River			Dongjin River		
	Worrisome	Measure		MK-UP**	MK-MID	MK-DOWN	DJ-UP	DJ-MID	DJ-DOWN
As	6 (50)	15 (150)	1.21 (±1.17)	1.10 (±1.14)	1.13 (±1.08)	1.33 (±1.24)	1.09 (±1.10)	1.00 (±1.00)	1.56 (±1.45)
Cd	1.5 (10)	4 (30)	0.16 (±0.61)	0.07 (±0.10)	0.11 (±0.14)	0.11 (±0.15)	0.41 (±1.42)	0.07 (±0.10)	0.14 (±0.16)
Cr	4 (15)	10 (45)	0.60 (±1.11)	1.45 (±2.42)	0.54 (±0.64)	0.53 (±0.54)	0.30 (±0.40)	0.29 (±0.38)	0.51 (±0.50)
Pb	100 (400)	300 (1,200)	4.01 (±3.02)	3.38 (±2.69)	4.13 (±2.93)	3.85 (±2.28)	3.87 (±3.45)	3.53 (±2.73)	5.22 (±3.74)
Zn	300 (600)	700 (1,800)	14.7 (±17.9)	12.0 (±8.52)	20.3 (±19.8)	13.3 (±8.79)	11.8 (±19.8)	16.9 (±31.2)	14.6 (±9.77)

* The worrisome level and measure standard of soil contamination for the river in the Soil Environment Conservation Act of Korea. The numbers in parentheses are the new guidelines, which were revised by changing of the analytical methods for heavy metals since year 2010.

** Numbers in parentheses indicate standard deviations.

산을 사용한 용출법으로 추출된 중금속의 농도를 분석하였으나, 2010년 1월 1일부터 시행된 토양오염공정시험방법에서는 왕수추출 및 알칼리분해를 이용한 전함량분석법을 사용하기 때문에, 같은 시료에서도 중금속의 농도가 높게 측정된다. 이에 따라 토양환경보전법 시행규칙에서 토양오염우려기준과 토양오염대책기준을 상향 조정하였다(Table 4). 본 연구에서는 용출법을 기반으로 한 공정시험방법을 사용하여 중금속을 분석하였기 때문에, 개정 이전의 토양오염기준을 사용하여 비교하였다.

비소의 경우, 동진강의 하류인 동진대교의 중앙에서 2008년 8월 5일에 채취한 시료에서 4.36 mg/kg sediment로 가장 높은 값이 측정되어, 토양오염 우려기준을 넘는 값은 측정되지 않았다(Table 4). 카드뮴의 경우에는 2008년 10월 10일에 동진강의 상류인 신태인 지점의 우안에서 채취한 시료에서 6.59 mg/kg sediment로 대책기준을 초과하는 높은 값이 측정되었으나, 이후 동일지점에서 채취한 시료를 분석한 결과 0.12 mg/kg sediment 이하의 낮은 값이 측정되어, 일시적인 오염인 것으로 판단되었다. 이 지점을 제외한 모든 지역에서 카드뮴의 토양오염우려기준인 1.5 mg/kg sediment를 넘지 않았다. 크롬의 경우에는 만경강의 상류의 우안에서 토양오염우려기준인 4 mg/kg sediment를 상회하는 값이 2번 측정되었으며, 이 지점의 평균값이 3.40 (±3.72) mg/kg sediment로 다른 지역에 비해 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과로, 만경강 상류의 일부 지점이 크롬에 의해 오염된 것으로 판단되며, 지속적인 모니터링을 통한 오염 여부의 확인 및 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다. 납과 아연의 경우에는 시료 중 최고값이 각각 16.1, 140 mg/kg sediment로 토양오염우려기준을 넘는 것은 없는 것으로 나타났다.

미국해양대기관리처(The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 저서생물에 악영향을 미치는 오염물질의 농도를 근거로 설정한 ERL (Effects Range-Low)과 ERM (Effects Range-Median)을 사용하여 퇴적물의 중금속 오염정도를 평가하였다.¹⁸⁾ ERL과 ERM은 각각 저서생물에 10%와 50%의 악영향을 미치는 중금속의 농도를 나타내는 것으로, 본 연구에서 측정된 중금속 중 동진강에서 카드뮴의 ERL (1.2 mg/kg sediment)을 상회하는 농도가 1회 측정된 것을 제외하고, 모든 시료에서 5종의 중금속에 대해 ERL을 초과하는 시료는 없었다. 이러한 결과로 판단할 때, 만경강

과 동진강의 퇴적물은 중금속에 의한 오염이 심각하지 않은 것으로 보인다.

4. 결론

새만금호로 유입되는 만경강과 동진강의 하상 퇴적물의 오염도를 파악하기 위하여, 2008년부터 2009년까지 만경강과 동진강의 상류, 중류, 하류에서 채취한 120개의 퇴적물 시료에 대하여, 강열감량, COD, 총질소, 총인 및 중금속(As, Cd, Cr, Pb, Zn)의 농도를 분석한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 퇴적물 중 강열감량, COD, 총질소, 및 총인의 농도를 분석한 결과, 만경강과 동진강의 오염도는 차이가 없었으며, 만경강의 경우 중류의 오염도가 가장 크며, 동진강의 경우에는 하류에서 높은 농도가 측정되었다. 2008년에 비하여 2009년에 채취한 시료의 오염물질 농도가 높게 나타났으며, 이는 오염이 점진적으로 진행되고 있음을 의미한다.

2) 한강하류, 팔당호, 및 대청호의 오염 퇴적물 준설 기준과 비교하였을 때, 일부시료를 제외하고 강열감량, COD, 총인의 농도는 준설 기준에 미치지 못하였으나, 총질소의 경우에는 87%인 104개의 시료에서 팔당호의 준설 기준인 1.1 mg/g sediment를 상회하는 농도가 측정되었다. 이러한 결과는 외부의 오염원으로부터 지속적으로 만경강과 동진강으로 질소가 유입되고 있음을 의미하며, 새만금의 수질을 유지하기 위하여 질소 오염의 원인을 빨리 파악하여 대책을 수립하여야 함을 의미한다.

3) 퇴적물 중 비소, 납, 아연 및 카드뮴의 오염도를 분석한 결과, 모든 지점에서 토양환경보전법의 토양오염우려기준에 미치지 못하는 낮은 농도가 측정되었다. 크롬의 경우에는 만경강 상류의 일부 지점에서 토양오염우려기준을 상회하는 수준의 농도가 측정되어, 지속적인 모니터링을 통한 원인 파악이 필요한 것으로 사료된다.

4) 만경강과 동진강의 하상 퇴적물의 오염도를 물리화학적 분석하여 본 결과, 현재 오염이 심각하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 아직까지 만경강과 동진강의 하상퇴적물이 내부 오염원으로 새만금 수질에 영향을 미치지 않는 것으로 사

료된다. 그러나 오염 가능성이 존재하기 때문에 만경강과 동진강 퇴적물의 지속적인 모니터링을 통하여 오염도 판단이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 김태웅, 임봉수, “금강 하구호 sediments로부터 수질 오염물질 용출 특성에 관한 연구,” 한국수질보전학회지, **13(3)**, 245~253(1997).
2. 김경태, 김은수, 조성록, 박준건, 김종근, 이정무, “시화호 표층 퇴적물의 유기탄소와 금속의 분포,” 2008년도 해양환경안전학회 춘계학술발표회, 해양환경안전학회, 여수, pp. 159~164(2008).
3. 강필규, 이상원, 박혜경, 변명섭, 공동수, “충주호 퇴적물에서의 인과 질소 용출에 관한 연구,” 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회, 한국물환경학회·대한상하수도학회, 인천, pp. 1231~1241(2006).
4. 신응배, 배우근, 배요섭, 최동호, 홍순오, “시화호 저질토의 환경 변화에 따른 중금속 및 영양염류 용출특성,” 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, 대한환경공학회, 서울, pp. 239~240(2001).
5. 임경훈, 새만금 방조제 건설에 따른 갯벌 저서 환경과 대형저서동물 군집 구조의 변동, 박사학위논문, 전남대학교 (2007).
6. 이혜원, 박석순, “동진강 유역의 수질 경향 분석에 관한 연구,” 한국육수학회지, **42(1)**, 39~47(2009).
7. 이경보, 김종천, 김종구, 이덕배, 박찬원, 김재덕, “동진강 유역의 오염부하량 평가,” 한국환경농공학회지, **24(2)**, 91~97(2005).
8. 한강완, 손재권, 조재영, 김효경, 황선아, “만경강과 동진강 주요 지점 하천토사 중 형태별 인의 함량,” 한국환경농학회지, **24(4)**, 319~325(2005).
9. 농업기반공사 농어촌연구원, 새만금호 유입부 퇴적물 관리방안 연구(2005).
10. 국토해양부, 해양환경공정시험방법(국토해양부고시 제2008-268호)(2008).
11. Bender, M. R. and Wood, C. W., “Total phosphorous in soil,” Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters, Pierzynski, G. M.(ed), North Carolina State University, North Carolina, pp. 45~49(2000).
12. 환경부, 토양오염공정시험법(환경부고시 제2002-122호)(2002).
13. 김석구, 이미경, 안재환, 강성원, 전상호, “퇴적물 내 입도와 유기물 함량이 영양염류 및 중금속 농도에 미치는 영향,” 대한환경공학회지, **27(9)**, 923~931(2005).
14. 박지현, 낙동강 하구와 인근 해역의 표층퇴적물 중 PCDDs, PCDFs, dioxin-like PCBs 및 PAHs의 분포특성과 기원, 석사학위논문, 부경대학교(2003).
15. 농업기반공사 농어촌연구원, 저수지 준설 환경기준 정립 및 준설토 활용방안 연구(2005).
16. 한국수자원공사, 댐저수지 유기퇴적물 분포 및 처리방안 연구(1997).
17. 김휘중, 김선구, “토양 내 중금속 존재형태분석방법과 토양오염공정시험 분석법 비교 연구,” 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회 및 통합 10주년 기념 국제심포지엄, 한국지하수토양환경학회, 서울, p. 354(2010).
18. NOAA, Sediment quality guidelines developed for the National Status and Trends Program(1999).