

하절기 새만금호 유입유사의 물리화학적 특성 분석

Analysis of Physicochemical Characteristics of Suspended Sediments Flowing into the Saemangeum Reservoir in the Summer

오경희 · 정세웅 · 조영철[†]

Kyoung-Hee Oh · Se-Woong Chung · Young-Cheol Cho[†]

충북대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received August 20, 2013; Revised May 22, 2014; Accepted February 26, 2015)

Abstract : To estimate the effects of suspended sediments flowing into the Saemangeum Reservoir on the extent of contamination of the reservoir, the suspended sediments were collected with sediment traps, which were installed from the upstream of the Mankyung and Dongjin Rivers to estuary of the reservoir, respectively, and the sedimentation rates and the chemical characteristics of suspended sediments were analyzed. The sedimentation rates in the Mankyung and Dongjin Rivers were ranged from 0.01~5.06 and 0.01~8.75 kg/m²/day, respectively. Those were higher to the upstream of rivers, and were mainly affected by flood events. The concentrations of organic matters were from 3.3 to 9.6 times higher than those in the stream sediments and were higher after flood season, indicating the contaminants come from the non-point sources on the basin. The concentrations of total nitrogen and total phosphorus in the suspended sediments showed the same trend with the organic matters. These results indicate that the suspended sediments from the basin of the Mankyung and Dongjin Rivers are highly contaminated and the countermeasures to manage the sources of contamination on the basin are required to maintain the water quality of the Saemangeum Reservoir.

Key Words : Saemangeum Reservoir, Mankyung River, Dongjin River, Suspended sediment, Sedimentation rate, Contamination level

요약 : 만경강과 동진강으로부터 유입되는 유사가 새만금호의 오염도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 만경강과 동진강의 상류부터 새만금호 유입지점까지 각 4개의 유사 트랩을 설치하고 2009년 6월부터 9월까지 유사를 채집하여 유사의 침강률과 이의 화학적 특성을 분석하였다. 만경강과 동진강에서 실험 기간 동안 단위 면적당 유입 유사의 침강률은 각각 0.01~5.06 kg/m²/day와 0.01~8.75 kg/m²/day 범위였다. 침강률은 하류에서 상류로 갈수록 높았으며, 강우에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 유사 중 유기물의 농도는 하상 퇴적물에 비해 3.3~9.6배 높았으며, 홍수기 이후에 높은 경향을 나타내어 유역 내 비점 오염원으로부터 유입량이 많은 것으로 판단되었다. 총질소와 총인의 오염도도 유기물과 같은 경향을 나타내었다. 이러한 결과로부터 만경강과 동진강으로 유입되는 유사에서 유기물, 총질소, 및 총인의 오염도가 높았으며, 새만금호의 수질 관리를 위하여 유역 오염원에 대한 집중 관리가 필요한 것으로 판단된다.

주제어 : 새만금호, 만경강, 동진강, 유입유사, 침강률, 오염도 분석

1. 서론

하천으로 유입된 입자상 물질은 유속이 느린 하구부에 도달하면 바닥에 가라앉아 퇴적층을 형성한다.¹⁾ 입자상 물질에 포함된 유·무기 오염물질 및 중금속은 퇴적된 후 일정기간 축적되어 있다가, 분해, 확산, 재부유, 생물교란 등의 과정에 의해 수층으로 재용출되어 수질 및 수생태계에 영향을 미치는 내부오염원으로 작용한다.^{1,2)} 유역의 점오염원 또는 비점오염원으로부터 오염물질의 유입을 제어한다 하더라도 내부오염 부하를 줄이기 위한 대책이 수립되지 않는다면 효과적인 수질 관리는 어렵다.¹⁾ 따라서 하천의 하구 또는 인공 호수의 수질관리를 위하여 상류로부터 유입되는 유사의 양과 오염도를 분석하여 오염된 유사의 유입을 줄이기 위한 대책이 수립되어야 한다.

새만금 사업은 1991년에 공사를 착공하여 군산, 김제, 부안을 연결하는 총길이 33 km의 방조제를 축조해 2020년까

지 총면적 40,100 ha의 토지를 조성하는 사업이다. 새만금 방조제로 인하여 상류로부터 유입되는 유사의 많은 부분이 새만금호 내부에 가라앉을 것으로 예상되며, 하상에 축적된 오염물질은 새만금호의 수질오염을 가중시키는 내부 오염원으로 작용할 가능성이 매우 높다.³⁾ 따라서 새만금 사업의 지속가능한 개발과 새만금호의 정상적인 기능 유지 및 효과적인 수질관리를 위하여 새만금호로 유입되는 유사의 퇴적문제와 이로 인한 장기적인 수질 오염 가능성에 효과적으로 대처하는 것이 필요하며,⁴⁾ 이를 위하여 새만금호로 유입되는 유사의 양과 이의 오염도에 대한 분석이 필요하다.

새만금호로 유입되는 하천 중에서 이의 수질에 직접적인 영향을 미치는 것은 만경강과 동진강이다.⁵⁾ 현재까지 만경강과 동진강 유역의 오염부하량, 수질 및 퇴적물 오염도에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.⁶⁻⁹⁾ 만경강으로 유입되는 지천 중 전주천과 익산천의 오염도가 가장 높고 오염물질의 유출량이 많기 때문에 만경강의 수질개선을 위하여 이들 하

[†] Corresponding author E-mail: choy@chungbuk.ac.kr Tel: 043-261-3577 Fax: 043-264-2465

천에 대한 수질관리가 선행되어야 한다.⁷⁾ 동진강의 경우에는 동진강 본류에 직접적으로 유입되는 정읍천에 비해 원평천과 고부천의 수질이 좋지 않기 때문에 이들 지천에 대한 관심과 대책이 요구된다.⁹⁾ 1995년부터 2004년까지 만경강과 동진강의 수질 변화를 분석한 결과, 유역 내 하수종말처리장의 증설 및 처리 효율 증가로 인하여 대부분의 지점에서 BOD와 총질소 농도가 감소하는 경향을 나타냈으나, 총인 농도는 개선되지 않은 것으로 보고되었다.^{8,9)} 만경강과 동진강의 하상 퇴적물의 오염도를 분석한 결과 2008년에 비해 2009년의 시료에서 강열감량, 총인, 총질소 등 오염물질 농도가 증가하였다.⁶⁾ 이러한 결과는 하천의 상류로부터 오염된 퇴적물의 유입이 증가되고 있음을 의미한다. 특히 하상 퇴적물 중 질소 오염이 심각하였으며, 이는 동진강과 만경강의 상류에 위치한 축산단지로부터 유입되는 오염물질에 의한 것으로 추정되었다.⁹⁾

만경강과 동진강에서 측정된 부유사의 농도 및 유량 자료를 활용하여 계산된 새만금호 유입 유사량의 년평균은 524,618 ton/yr으로 추정되었으며, 만경강과 동진강 유역에서 각각 203,294 ton/yr, 241,682 ton/yr인 것으로 예측되었다. 또한 새만금호의 년평균 비유사량은 158 ton/km²/yr로 추정되었다.³⁾ 최근에 실시된 다른 연구에서는 새만금호 년평균 유입 유사량과 년평균 비유사량을 각각 155,122 ton/yr와 63.1 ton/km²/yr로 추정하였다.⁴⁾ 이와 같이 새만금호로 유입되는 유사의 양을 추정하는 연구는 일부 진행되었으나, 이의 오염도를 분석하는 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 만경강과 동진강에 유사를 포집할 수 있는 유사 트랩을 설치하고 포집된 유사의 오염도를 분석함으로써 만경강과 동진강의 유사가 새만금호 퇴적물의 오염도에 미칠 가능성이 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 유입 유사의 수집

새만금호 내로 유입되는 유사의 침강률 및 물리화학적 특성을 분석하기 위하여 만경강과 동진강 수역에 각각 4개의 지점을 선정하여 퇴적물 포집 장치(유사 트랩)를 설치하였다(Fig. 1). 유사 트랩은 유속이 느려지는 유입부에 대부분의 유사가 퇴적되는 점을 감안하여 선정된 지점에 설치되었다. 만경강 수역은 만경대교에서 심포항 하구 구간까지를 3등분하여 상류(Upstream of Mankyung River, MK-U; 진봉면 관기방조제 인근, 만경대교로부터 9 km 하류), 중류(Midstream of Mankyung River, MK-M; 진봉면 고사리 인근, 만경대교로부터 13 km 하류), 하류(Downstream of Mankyung River, MK-D; 심포항 봉화산 인근, 만경대교로부터 19 km 하류)에 유사 트랩을 설치하였다. 동진강 수역은 동진대교로부터 심포항 하구까지 상류(Upstream of Dongjin River, DJ-U; 부안군 안성리 문포항 인근, 동진대교로부터 6 km 하류), 중류(Midstream of Dongjin River, DJ-M; 부안군 양산리 인근, 동진대교로부터 9 km 하류), 하류(Downstream of Dongjin River, DJ-D; 부안군 계화면, 동진대교로부터 15 km 하류)로 구분하여 유사 트랩을 설치하였다. 또한 직접적으로 호내에 유입되는 유사를 포집하기 위하여 만경강과 동진강의 하류말단(Estuary of Mankyung River, MK-E; Estuary of Dongjin River, DJ-E; 만경강과 동진강의 새만금호 유입부)에 각각 하나씩 유사 트랩을 설치하였다(Fig. 1).

유사 트랩은 흐름에 의한 시료의 교란을 방지하기 위해 높이/직경 비가 2가 넘도록 제작되었으며, 입구가 하상으로부터 1 m 높이에 위치하도록 설치되었다(Fig. 2). 트랩 설치 지점에 표시 부이를 설치하였으며, 수중에는 지지부이를 설

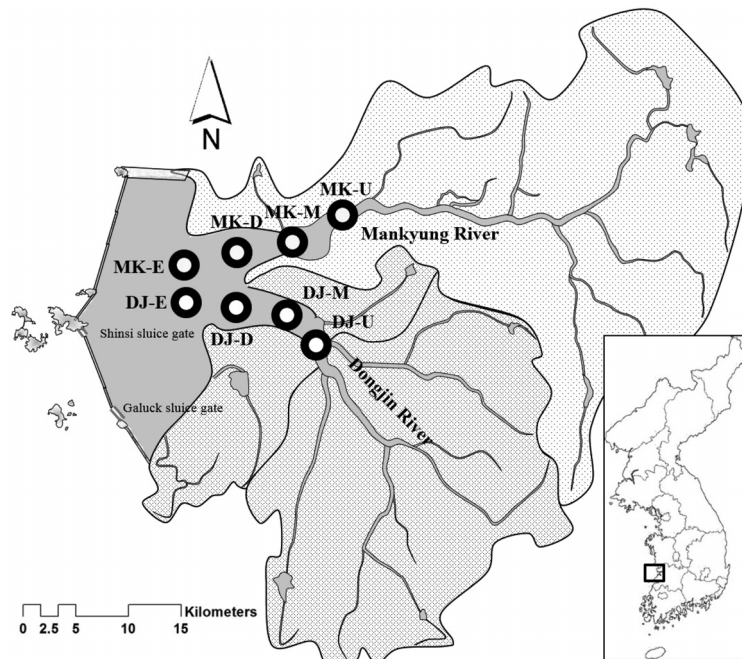


Fig. 1. Map of study area and the location installed the sediment traps.

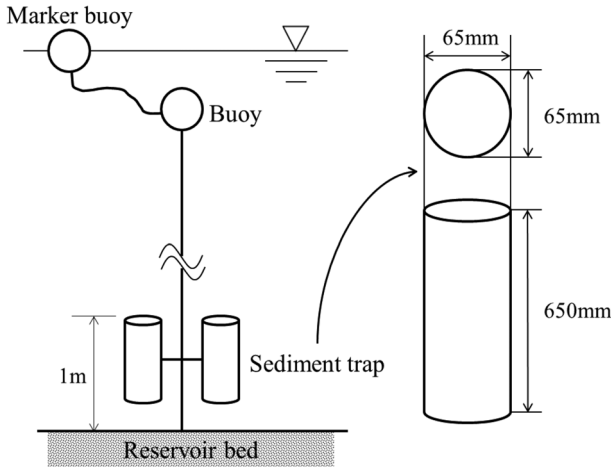


Fig. 2. Schematic diagram of sediment trap to collect suspended sediment.

치하여 연결 체인이 수직으로 유지되도록 하였다. 유사 트랩은 2009년 6월 9일에 최초로 설치되었으며, 설치 후 약 1개월 간격으로 7월 11일, 7월 23일, 8월 17일, 9월 17일에 각각 포집된 유사 시료를 채취하였다. 유사의 포집과 재설치는 유사 트랩 하단 채집통을 교체하면서 이루어졌다. 본 연구에서 사용된 유사 트랩의 상부에 뚜껑이 없기 때문에 트랩을 끌어 올리는 과정에서 수직 방향의 유속에 의해 시료의 망실이 발생할 수 있으므로, 이를 방지하기 위하여 최대한 느린 속도로 트랩을 끌어 올렸다. 또한 유사가 가장 많았던 2차 시기에 채집통에 채집된 시료의 높이가 약 10 cm로 트랩 길이인 65 cm의 1/6 미만이었으므로 시료 채집시 전체 시료량에 비하여 유사 시료의 망실은 매우 적었을 것으로 판단된다. 채취된 시료는 풍건한 후에 질량을 측정하였으며, 풍건된 시료를 가볍게 분쇄한 후에 물리화학적 특성을 분석하였다.

2.2. 유사의 물리화학적 특성 분석

유사의 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, 실트, 점토로 나누어 각각의 비율을 구한 후, 미국 농무부 토성 분류법(U.S. Department of Agriculture, Textural Classification)에 따라 분류하여 정하였다.⁶⁾ 강열감량(Ignition Loss; IL)은 풍건된 시료를 담은 도가니를 전기로에 넣고, 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 초기 30분간 가열하고 650 $^{\circ}\text{C}$ 까지 서서히 온도를 올려 3시간 동안 가열한 후 제습기에 옮겨 실온까지 냉각시켜 무게를 측정하였다. 가열 전후의 무게 차이를 이용하여 강열감량을 계산하였다. 유사 중 총질소의 농도는 건조된 유사 시료에서 Kjeldahl 질소분석법을 이용하여 분석하였다. 총인의 농도는 건조된 시료를 질산과 과염소산으로 분해한 후 아스코르빈산법으로 용존인의 농도를 분석하여 구하였다.¹⁰⁾ 중금속(As, Cd, Cr, Pb, Zn)은 풍건시킨 시료를 2 mm 체로 거른 후, 토양오염공정시험법에 따라 용출하였다.¹¹⁾ 용출된 시료 중 중금속 함량은 유도결합플라즈마발광광도계(JY-38Plus, ISA Jobin Yvon, France)를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유역의 강우량 및 유사의 침강률

강우량과 강우강도는 하천으로 유입되는 유사량에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다.⁴⁾ 만경강과 동진강의 주요 유입하천에 위치한 4개의 강수량 관측소(만경강의 유입하천인 전주천과 고산천의 상류에 위치한 전주와 봉동 강수량 관측소, 동진강의 유입하천인 원평천과 정읍천의 상류에 위치한 금구와 태인 강수량 관측소)에서 측정된 년 평균 강수량은 1,047 mm이었으며, 전주 관측소의 년 평균 강수량이 1,152 mm로 가장 많았고 봉동 관측소가 968 mm로 가장 적었다(기상청, www.kma.go.kr). 유사 포집 기간인 6월 9일부터 9월 17일까지 평균 강우량은 715 mm로 년 강수량의 68.3%이었다.

유사 포집 기간의 강수량 평균은 1차 시기부터 4차 시기까지 각각 223, 328, 105, 60 mm로 2차 시료 포집 기간에 강수량이 가장 많았다(Fig. 3). 특히 2차 시기의 포집 기간은

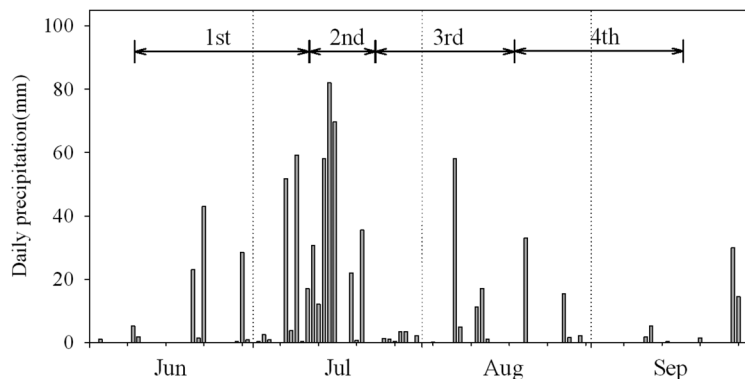


Fig. 3. Average daily precipitation at the Saemangeum basin from June to September in year 2009.

Table 1. Sedimentation rates of suspended sediments in Mankyung and Dongjin Rivers

River	Site	Sedimentation rate (kg/m ² /day)				
		1st	2nd	3rd	4th	Average
Mankyung	MK-U	0.34	nd*	0.26	0.74	0.45
	MK-M	0.16	4.99	0.11	0.39	1.41
	MK-D	0.06	2.87	5.06	nd	2.66
	MK-E	0.01	0.61	0.04	0.19	0.21
Dongjin	DJ-U	0.11	8.75	0.28	0.35	2.37
	DJ-M	0.03	0.28	0.06	0.17	0.14
	DJ-D	0.44	5.82	0.20	0.36	1.70
	DJ-E	0.01	0.55	0.05	0.21	0.20

* Not determined because of loss of sediment trap

12일로 짧았으나, 이 기간 동안 일일 강우량이 30 mm를 넘는 날이 5일이 있었으며, 이에 따라 유사 시료량이 가장 많이 채집되었다.

만경강과 동진강에서 포집된 유사량과 채집 기간 및 유사 트랩의 면적으로부터 단위 면적당 침강률을 구하였다. 만경강에서 유입 유사의 침강률은 0.01~5.06 kg/m²/day 범위로 측정되었다. 만경강 하류(MK-D)의 3차 시료와 중류(MK-M)의 2차 시료에서 침강률이 각각 5.06과 4.99 kg/m²/day로 다른 시기 또는 지점에 비해 매우 높았다(Table 1). 만경강에서 시기별 유입 유사의 침강률은 하류 지점(MK-D)을 제외하고 2차 시료에서 가장 높았다. 유사 시료의 채집 시기별 침강률과 만경강 상류에 위치한 전주 관측소에서 측정된 평균 일일 강우량을 비교한 결과 상관성이 있는 것(상관분석, p<0.02)으로 나타나, 강우량이 유사의 침강률에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 만경강에서 지점별 특성은, 만경강 하류(MK-D) 지점의 3차 시료를 제외하면, 상류에서 하류 말단으로 갈수록 침강률이 낮아졌으며, 이는 무거운 입자의 대부분이 상류에서 먼저 가라앉기 때문인 것으로 판단된다.

만경강 하류 지점의 2차와 3차 시료에서 침강률은 각각 2.87과 5.06 kg/m²/day로 3차 시료에서 더 높았다(Table 1). 만경강의 유입하천인 전주천과 고산천에서 측정된 일일 강

우량 자료에서 30 mm 이상의 집중 강우가 관측된 횟수가 2차 시기에는 5일이었으나 3차 시기에는 1일이었으며, 포집 기간 중 강우량도 2차 시기가 더 많았다. 이러한 결과는 하천으로 유입되는 유사량이 강우량 및 강우 강도와 관련성이 높다는 기존의 연구 결과⁴⁾와 배치된다. 하지만 만경강의 3차 시료에서 강열감량을 측정된 결과, 하류(MK-D)를 제외한 3개의 시료에서 평균 14.7 (±1.77)%인 반면, 하류 시료에서는 2.77%이었다(Fig. 4). 또한 3차 시료의 입도분석 결과에서도 하류(MK-D)를 제외한 시료에서 모래(0.05~2.0 mm) 및 실트(0.002~0.05 mm) 입자의 비율이 각각 16.3 (±3.84), 77.5 (±4.29)%인 반면, 하류(MK-D) 시료에서 모래와 실트 입자의 비율이 각각 59.5, 38.3%이었다(Table 2). 이와 같이 3차 시기에 만경강 하류에서 포집된 유입 유사의 화학적 특성이 다른 지점의 시료와 다른 것은 발생원이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 즉 만경강 하류(MK-D)의 3차 시료에서 침강률이 높게 측정된 것은 유사 트랩을 설치한 지점의 주변에서 공사 등 비정상적인 활동에 의해 오염되지 않은 토사가 다량 유입되었기 때문으로 판단되었다.

동진강에서 유입 유사의 침강률은 0.01~8.75 kg/m²/day 범위로 일부 시료에서 만경강에 비해 높은 값을 나타내었으나, 지점 및 시기에 따라 통계적으로 큰 차이가 없었다(t-test, p>0.05; Table 1). 동진강의 하류 지점(DJ-D)에서는 1차와 2차 시기에 채취된 시료의 침강률이 중류 지점(DJ-M)에 비해 높았다. 1차와 2차 시기에 하류 지점(DJ-D)에서 채취된 시료의 강열감량이 각각 2.83, 1.82%인데 비하여, 중류 지점(DJ-M)에서 채취된 시료의 강열감량은 각각 10.83, 9.75%로 하류 지점의 시료와 큰 차이가 있었다(Fig. 4). 이러한 결과는 동진강 하류 지점에서도 만경강의 하류 지점(MK-D)와 마찬가지로 비이상적인 토사 유입이 있는 것으로 판단된다. 동진강 하류 지점(DJ-D)의 시료를 제외하면 만경강과 마찬가지로 하류 말단으로 갈수록 침강률이 낮아지는 양상을 나타내었다. 또한 시기별 침강률의 경우에도 만경강과 같은 경향을 나타내었다. 이러한 결과로부터 유사의 침강률은 하천의 상류에서 하류 말단으로 갈수록 낮아지며 강우량과 관련성이 높은 것으로 판단된다.

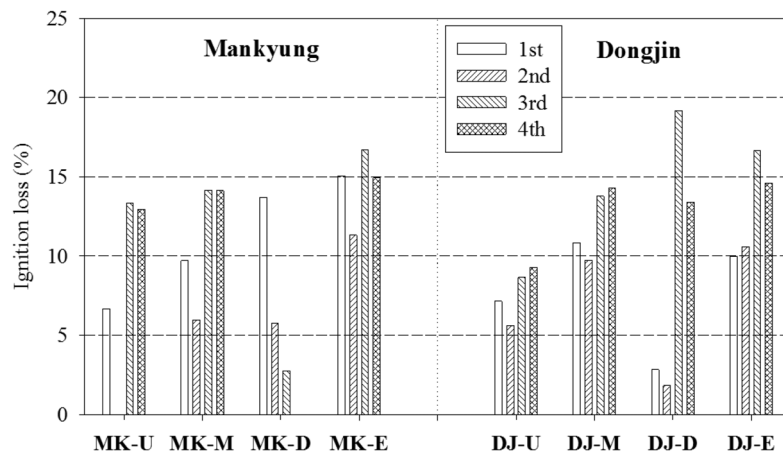


Fig. 4. Concentrations of ignition loss in the suspended sediments collected from the Mankyung and Dongjin Rivers.

Table 2. Particle distribution of suspended sediments collected from the Mankyung and Dongjin Rivers

River	No.	Site	Sand	Silt	Clay	Classification
Mankyung	1st	MK-U	18.03	76.99	4.98	Silt loam
		MK-M	14.72	79.82	5.46	Silt loam
		MK-L	38.34	56.76	4.90	Silt loam
		MK-E	53.00	44.16	2.84	Sandy loam
	2nd	MK-U	nd*	nd	nd	-
		MK-M	22.54	73.02	4.44	Silt loam
		MK-L	29.38	66.09	4.53	Silt loam
		MK-E	14.12	75.21	10.67	Silt loam
	3rd	MK-U	14.50	80.18	5.32	Silt
		MK-M	13.65	79.74	6.61	Silt loam
		MK-L	59.51	38.30	2.19	Sandy loam
		MK-E	20.68	72.54	6.78	Silt loam
	4th	MK-U	28.85	67.35	3.80	Silt loam
		MK-M	25.64	69.35	5.01	Silt loam
		MK-L	nd	nd	nd	-
		MK-E	33.15	61.76	5.09	Silt loam
Dongjin	1st	DJ-U	27.73	67.69	4.58	Silt loam
		DJ-M	29.71	64.63	5.66	Silt loam
		DJ-L	79.03	19.79	1.18	Loamy sand
		DJ-E	48.63	48.34	3.03	Sandy loam
	2nd	DJ-U	21.34	74.37	4.29	Silt loam
		DJ-M	5.51	82.37	12.12	Silt loam
		DJ-L	81.31	16.97	1.72	Loamy sand
		DJ-E	17.52	72.52	9.96	Silt loam
	3rd	DJ-U	10.27	82.53	7.20	Silt
		DJ-M	18.45	73.35	8.20	Silt loam
		DJ-L	41.10	54.93	3.97	Silt loam
		DJ-E	27.29	66.55	6.16	Silt loam
	4th	DJ-U	6.73	85.01	8.26	Silt
		DJ-M	22.43	70.17	7.40	Silt loam
		DJ-L	53.16	44.05	2.79	Sandy loam
		DJ-E	46.27	49.26	4.47	Sandy loam

* Not determined because of loss of sediment trap

3.2. 유사 트랩 시료의 화학적 특성

만경강과 동진강에서 채집한 유사 트랩 시료에서 강열감량의 평균값은 각각 11.2 (±4.31)와 10.5 (±4.75)%이었으며, 두 하천 시료의 강열감량은 차이가 없었다(Fig. 4; t-test, p=0.68). 만경강 시료에서는 하류 시료(MK-D)를 제외하고 하류 말단으로 갈수록 강열감량이 높아지거나 비슷한 값을 나타내었으며, 홍수기 이후인 3차와 4차 시료의 농도가 1차와 2차 시료보다 높았다(t-test, p<0.02). 윤 등¹²⁾의 연구에서 새만금 유역에는 다수의 축산 농가가 산재되어 있어 발생 부하량 중 축산 폐수의 기여도가 BOD의 40.5%, 총질소의 34.0%, 총인인의 87%인 것으로 계산되었다. 따라서 홍수기 이후에 유입 트랩 시료의 강열감량이 높게 나타난 것은 집중

강우로 인해 축산 시설과 같은 비점오염원으로부터 다량의 유기물이 유입되었기 때문인 것으로 판단된다.

오 등⁶⁾의 연구에서 2008년부터 2009년까지 만경강 하상 퇴적물에서 강열감량의 농도는 상류에서 평균 1.17 (±0.60)%이었으며, 중류와 하류에서 각각 평균 3.37 (±3.32)%와 1.94 (±0.62)%이었다. 또한 한 등¹³⁾의 연구에서는 2003년부터 2004년에 측정된 만경강 퇴적물의 유기물 함량은 1.31~2.25% 수준으로 평균 1.71%이었다. 본 연구에서 측정된 만경강의 유사 트랩 시료의 강열감량의 평균값은 11.2%로 하상 퇴적물에 비해 3.3~9.6배 높았다. 이와 같이 하상 퇴적물보다 유사 트랩 시료에서 강열감량이 높게 측정된 것은 만경강 유역으로부터 유기성 오염물질의 유입이 가속화되고 있거나, 유사에 포함된 유기물이 퇴적된 후에 분해되어 하상 퇴적물에서 강열감량의 농도가 낮게 측정되었을 가능성이 있다. 본 연구에서 유사 시료의 채집 시기 및 지점이 오 등⁶⁾의 연구와 크게 차이가 없으며, 만경강 상류 지역인 군산시, 익산시, 김제시, 및 전주시의 2007년~2010년까지 축산 두수가 8,801천두~11,995천두(환경부 가축분뇨처리처리통계; www.me.go.kr)로 변화 폭이 하상 퇴적물과 유사 트랩 시료의 강열감량의 차이에 비하여 적었다. 이러한 결과로부터 가축 분뇨에 의하여 유기성 오염물질의 유입이 가속화되는 것으로 판단하기는 어렵다. 따라서 만경강에서 하상 퇴적물보다 유사 트랩 시료에서 강열감량이 높게 나타난 것은 퇴적된 유사 중에 포함된 유기물질이 분해되었기 때문인 것으로 판단된다.

동진강 시료에서 강열감량은 홍수기 이전(1차와 2차 시료)에는 동진강 하류(DJ-D) 시료를 제외하고 나머지 지점의 시료에서는 비슷한 농도를 나타낸 반면, 홍수기 이후의 시료에서는 하류로 갈수록 농도가 높아지는 경향을 보였다(Fig. 4). 이는 하류로 갈수록 동진강 유역의 유기물 오염이 심하다는 것을 의미한다. 한 등¹³⁾과 오 등⁶⁾의 연구에서 동진강 하상 퇴적물의 강열감량은 평균 2.04% (2003년~2004년)와 2.67 (±2.38)% (2008년~2009년)이었다. 따라서 만경강과 마찬가지로 동진강에서도 하상 퇴적물보다 유사 트랩 시료에서 유기물 농도가 더 높은 값을 나타내었다.

만경강의 유입유사에서 총질소의 농도는 6,274~11,664 mg/kg 범위였으며, 평균은 9,096 (±1,299) mg/kg이었다(Fig. 5). 만경강의 하류 지점(MK-D)을 제외하고 채취 시기 및 지점에 따른 차이는 거의 없었다. 동진강에서는 총질소의 농도 범위가 4,674~12,853 mg/kg이었으며, 평균값은 8,544 (±2,633) mg/kg으로, 만경강의 유입유사의 평균 농도에 비해 약간 낮았으나 통계적으로 유의미한 차이는 나타나지 않았다(t-test, p=0.48). 만경강과 마찬가지로 동진강의 하류 지점(DJ-D)에서 채취된 유입유사에서 다른 지점들에 비해 총질소의 농도가 낮았다.

동진강에서는 지점에 따른 차이는 나타나지 않았으나 대체적으로 홍수기에 총질소의 농도가 높았다. 오 등⁶⁾의 연구 결과에 따르면 2008년부터 2009년까지 만경강과 동진강의 하상 퇴적물에서 총질소의 평균 농도는 각각 3,380 (±2,460),

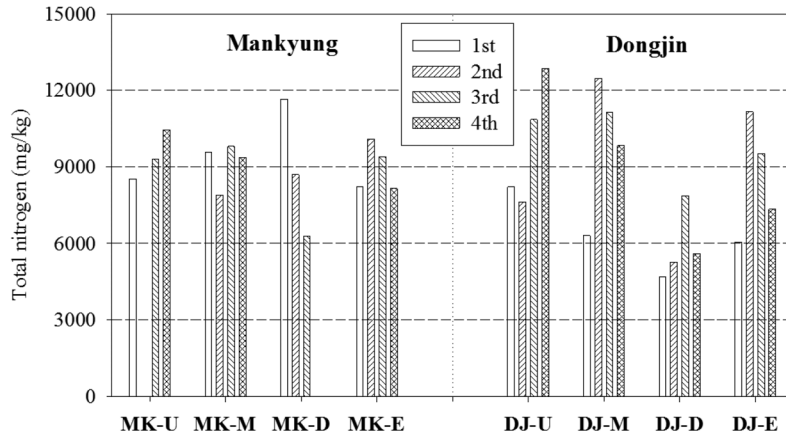


Fig. 5. Concentrations of total nitrogen in the suspended sediments collected from the Mankyung and Dongjin Rivers.

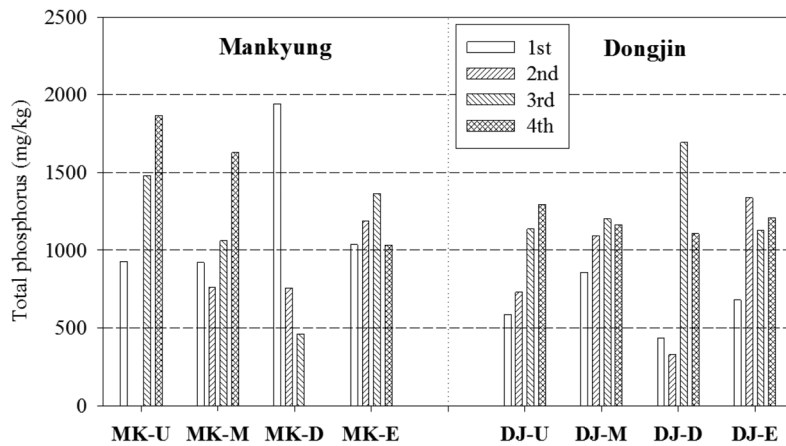


Fig. 6. Concentrations of total phosphorus in the suspended sediments collected from the Mankyung and Dongjin Rivers.

3,420 ($\pm 2,470$) mg/kg이었으며, 본 연구에서 측정된 유사 트랩 시료의 총질소 농도에 비해 값이 낮은 것으로 보고되었다. 퇴적물에 존재하는 질소 화합물은 무산소 상태(환원 조건)가 되면 미생물의 대사 작용에 의해 질소(N_2)로 전환된다.¹⁴⁾ 따라서 유사 시료에 비해 하상 퇴적물의 총질소 농도가 낮은 것은 유역에서 유입된 질소 화합물이 퇴적된 후 퇴적물 중 미생물의 대사 작용에 의해 소비되었기 때문인 것으로 판단된다.

환경부에서 퇴적물 오염도 평가를 위해 제정된 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」(예규 제 575호, 2012년 4월 10일 제정)에서 총질소의 농도가 5,600 mg/kg을 초과할 경우 “명백하거나 심각하게 오염된 상태”로 정의하였다. 본 연구에서 분석된 30개의 시료 중 27개가 이 기준을 초과하였다. 만경강과 동진강 유역 전체에 축산 농가가 산재되어 있으며 총질소 부하 중 축산 폐수의 기여도가 34%인 것으로 파악되었다.¹²⁾ 따라서 유사 시료의 높은 총질소 농도는 새만금 유역의 축산 농가에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 새만금호의 수질 관리를 위하여 손 등¹⁾의 연구결과와 같이 만경강과 동진강 유역의 질소오염원에 대한 집중적인 관리가 필요한 것으로 보인다.

만경강과 동진강의 유사 트랩 시료에서 총인의 농도 범

위는 각각 460~1,940, 330~1,690 mg/kg이었으며, 두 지역의 유사 시료에서 총인의 농도는 차이가 없었다(t-test, $p=0.24$; Fig. 6). 이러한 값은 국내 호수 중 대청호, 소양호, 임하호, 진양호의 퇴적물에서 측정된 총인의 농도 범위인 610~1,200 mg/kg과 거의 유사하였다.¹⁵⁾ 환경부의 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에서 퇴적물의 총인 농도가 1,600 mg/kg 이상이면 “명백하거나 심각하게 오염된 상태”로 판정한다. 본 연구에서 분석된 30개 시료 중 만경강과 동진강의 하류에서 측정된 2개의 시료(각각 1,943과 1,693 mg/kg)에서 이 기준을 넘는 것으로 나타나, 새만금호로 유입되는 유사 시료의 총인 오염도는 심각하지 않은 것으로 여겨진다. 하지만 팔당호의 수질관리를 위한 내부부하를 관리하기 위해 설정된 팔당호의 준설기준 중 총인 기준¹⁶⁾인 800 mg/kg을 넘는 시료가 전체 30개 시료 중 22개이었으며, 30개 시료 중 19개가 한강 하류의 총인에 대한 준설 기준¹⁶⁾인 1,000 mg/kg을 넘는 것으로 나타나, 만경강과 동진강으로 유입되는 유사 시료의 총인 오염도가 높은 것으로 판단된다.

한 등¹³⁾의 연구에서 2004년부터 2005년까지 만경강과 동진강의 하상 퇴적물에서 측정된 총인의 농도 범위는 각각 290.1~405.4 mg/kg(평균 363.4 mg/kg)과 304.1~431.7 mg/kg(평균 353.6 mg/kg)이었다. 또한 오 등⁶⁾의 연구에서 2008년

부터 2009년까지 만경강과 동진강에 측정된 하상 퇴적물 중 총인의 농도는 평균 416 (± 393), 325 (± 302) mg/kg이었다. 본 연구에서 만경강과 동진강의 유입 유사에 포함된 총인의 평균 농도는 각각 1,170 (± 430), 1,000 (± 360) mg/kg이었으며, 이는 하상 퇴적물의 총인 농도에 비해 약 3배 높은 값이다. 총인의 경우 유기물(강열감량)과 총질소와 달리 퇴적물에서 미생물의 대사 작용에 의해 분해 또는 전환되어 농도가 줄어들지 않기 때문에, 유입 유사에 포함된 총인에 의해 새만금호의 하상 퇴적물 중 총인의 농도가 지속적으로 증가할 가능성이 있으며, 이에 따라 새만금호의 수질에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 새만금호의 수질 관리를 위하여 만경강과 동진강 유역으로부터의 총인의 유입을 저감시키기 위한 대책이 필요할 것으로 보인다. 특히 만경강과 동진강에서 총인 부하에 대한 축산폐수의 기여도는 약 87%로 매우 높은 것으로 알려져 있기 때문에,¹²⁾ 새만금호의 수질 관리를 위하여 축산계 부하의 삭감이 가장 필요한 것으로 판단된다.

만경강과 동진강에서 채집한 유사 트랩 시료 중에 포함된 비소, 카드뮴, 크롬, 납, 아연의 평균 농도는 각각 2.56 (± 2.85), 0.164 (± 0.094), 0.554 (± 0.472), 5.77 (± 3.42), 15.4 (± 12.2) mg/kg으로, 아연의 농도가 가장 높고 납, 비소, 크롬, 카드뮴 순이었으며, 만경강과 동진강의 유사 트랩 시료에서 같은 경향을 나타내었다(Table 3). 오 등⁶⁾의 연구에서 2008년부터 2009년까지 만경강과 동진강의 하상 퇴적물에서 측정된 비소, 카드뮴, 크롬, 납, 아연의 농도는 각각 1.21 (± 1.17), 0.16 (± 0.61), 0.60 (± 1.11), 4.01 (± 3.02), 14.7 (± 17.9) mg/kg으로 본 연구에서 측정된 유사 트랩 시료의 중금속 농도와 거의 비슷하였다.

Table 3. Concentrations of heavy metals in the suspended sediments

River	Site	As (mg/kg sediment)	Cd (mg/kg sediment)	Cr (mg/kg sediment)	Pb (mg/kg sediment)	Zn (mg/kg sediment)
Man- kyung	MK-U	1.73 (± 0.00)	0.0776 (± 0.0513)	0.440 (± 0.433)	4.85 (± 4.82)	18.5 (± 18.7)
	MK-M	1.45 (± 1.27)	0.231 (± 0.00)	0.845 (± 0.238)	9.61 (± 2.15)	24.3 (± 19.1)
	MK-D	5.82 (± 5.91)	0.0609 (± 0.00)	1.11 (± 1.02)	7.25 (± 3.38)	26.4 (± 11.5)
	MK-E	3.83 (± 4.02)	0.218 (± 0.00)	0.620 (± 0.451)	7.18 (± 2.09)	14.7 (± 11.7)
Dongjin	DJ-U	1.89 (± 1.15)	0.232 (± 0.149)	0.445 (± 0.217)	5.24 (± 2.84)	16.5 (± 2.92)
	DJ-M	3.07 (± 3.72)	0.120 (± 0.00)	0.509 (± 0.301)	5.05 (± 4.64)	11.6 (± 9.34)
	DJ-D	0.678 (± 0.539)	0.265 (± 0.00)	0.141 (± 0.0389)	2.01 (± 0.316)	4.46 (± 2.18)
	DJ-E	2.29 (± 2.34)	0.130 (± 0.00)	0.320 (± 0.191)	5.10 (± 3.30)	10.8 (± 8.24)

* Numbers in parentheses indicate the standard deviations

유사 트랩 시료에서 중금속 오염 정도를 판단하기 위하여, 환경부의 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」 및 「토양 환경보전법 시행규칙」(환경부령 제509호, 2013년 6월 2일 시행)과 비교하였다. 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에서 퇴적물 중 비소, 카드뮴, 크롬, 납, 아연에 대한 오염 기준은 각각 93, 6.7, 270, 530, 960 mg/kg이며, 「토양환경보전법 시행규칙」의 1지역에서 비소, 카드뮴, 크롬, 납, 아연에 대한 토양오염우려기준은 각각 25, 4, 5, 200, 300 mg/kg이다. 본 연구에서 측정된 유입 유사 중 중금속의 농도와 퇴적물 중 중금속 오염 평가 기준을 비교한 결과, 만경강과 동진강의 유사 시료의 중금속 오염도는 크지 않았다. 하지만 새만금 사업으로 인해 하천으로부터 유입된 중금속이 지속적으로 새만금호에 퇴적되면 퇴적물의 중금속 함량이 지속적으로 증가될 가능성이 있다. 만경강 퇴적물 중 중금속 함량을 측정된 연구에 따르면, 중금속 오염이 강의 상류에서 진행되고 있으며, 주로 도시를 배수하는 지류가 중금속 농축의 가장 큰 공급원으로 나타났다.¹⁷⁾ 따라서 새만금호로 유입되는 중금속을 저감하기 위해서는 도시 하천의 관리가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

새만금호로 유입되는 만경강과 동진강의 유입 유사의 오염도를 평가하기 위하여 유사 트랩을 설치하고, 채집된 시료에 대하여 강열감량, 총질소, 총인 및 중금속(As, Cd, Cr, Pb, Zn)의 농도를 분석한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 만경강과 동진강에서 단위 면적당 유사 침강률은 각각 0.01~5.06 kg/m²/day와 0.01~8.75 kg/m²/day 범위로 하류로 갈수록 침강률이 낮아지는 경향을 나타내었으며, 강우에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.
- 2) 유사 트랩 시료에서 강열감량은 만경강과 동진강에서 각각 평균 11.2 (± 4.31)와 10.5 (± 4.75)%이었으며, 홍수기 이후에 높았다. 이러한 값은 만경강과 동진강의 하상 퇴적물 중 강열감량보다 3.3~9.6배 높았다.
- 3) 만경강과 동진강의 유입유사에서 총질소의 농도는 각각 9,096 ($\pm 1,299$), 8,544 ($\pm 2,633$) mg/kg이었으며, 총인의 농도는 각각 1,170 (± 430), 1,000 (± 360) mg/kg으로 오염도가 매우 높았다. 이러한 결과는 오염도가 심한 유사가 새만금호로 지속적으로 유입되고 있음을 나타내며, 새만금호의 수질 관리를 위하여 만경강과 동진강 유역의 오염원을 파악하여 이에 대한 집중적인 관리가 필요한 것으로 판단된다.
- 4) 만경강과 동진강에서 채집한 유사 시료 중에 포함된 비소, 카드뮴, 크롬, 납, 아연의 평균 농도는 각각 2.56 (± 2.85), 0.164 (± 0.094), 0.554 (± 0.472), 5.77 (± 3.42), 15.4 (± 12.2) mg/kg으로, 아연의 농도가 가장 높고 납, 비소, 크롬, 카드뮴 순이었으며, 유입 유사 중 중금속 오염도는 크지 않았다.

Acknowledgement

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 논문이 완성되기 위해 세심한 검토를 해 주신 두 분의 심사위원님들께 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

References

1. Son, Y. G., Kim, W. J., Lim, M. H., Kim, L. H. and Khim, J. H., "Characterization of sediment and correlations of pollutants in Dongkin River," Proceeding of the 2006 Autumn Conference of KSEE, Gangneung, pp. 1116~1118(2006).
2. Kang, P. G., Lee, S. W., Park, H. K., Byeon, M. S. and Kong, D. S., "Study on the release of phosphorus and nitrogen from sediment in Lake Chungju," Proceeding of the 2006 Spring Joint Conference of KSWE and KSWW, Incheon, pp. 1231~1232(2006).
3. Son, Y. G., Kim, W. J., Kim, L. H., Ahn, J. H. and Khim, J. H., "Determination of sediment loading in Saemangeum Lake," Proceeding of the 2007 Autumn Joint Conference of KSWW and KSWE, Ilsan, pp. 629~633(2007).
4. Jeong, H. Y., Chung, S. W., Lee, H. S., Ryu, I. G. and Maeng, S. J., "Estimation of sediment load in Saemangeum Reservoir using modified Einstein procedure," Proceeding of the 2009 Spring Joint Conference of KSWE and KSWW, Suwon, pp. 627~628(2009).
5. Lee, H. W. and Park, S. S., "Long-term trend analyses of water qualities in Saemangeum watershed based on statistical methods," Proceeding of the 2006 Spring Conference of KSEE, Ilsan, pp. 361~368(2006).
6. Oh, K. H., Yu, M. N. and Cho, Y. C., "Physicochemical characteristics and analysis of pollution potential in the sediments of the rivers flowing into the Saemangeum Reservoir," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(12), 861~867(2011).
7. Choi, S., Ahn, J. and Kim, H., "Pollutants discharge estimation in inflow streams of the ManKyeong River watershed," Proceeding of the 2009 Spring Joint Conference of KSWE and KSWW, Suwon, pp. 635~636(2009).
8. Lee, H. W. and Park, S. S., "Long-term trend analyses of water qualities in Mangyung watershed," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **24**(4), 480~487(2008).
9. Lee, H. W. and Park, S. S., "Trend analysis of water quality in Dongjin River watershed," *Korean J. Limnol.*, **42**(1), 39~47(2009).
10. 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).
11. Ministry of Environment, "Standard Methods for the Examination of Soil Pollution (Notification No. 2002-122 of the Ministry of Environment)," (2002).
12. Yoon, J. Y., Lee, H. M., Jeong, S. H. and Jeong, B. G., "A study for management of water quality of Saemangeum basin," Proceeding of the 1999 Autumn Conference of Korea Environmental Sciences Society, pp. 200~201(1999).
13. Han, K. W., Son, J. K., Cho, J. Y., Kim, H. K. and Hwang, S. A., "Phosphorus fractionations in sediment of Mankyung and Dongjin River," *Korean J. Environ. Agric.*, **24**(4), 319~325(2005).
14. Lee, S. E., Choi, I. S., Lee, S. K., Lee, I. H. and Oh, J. M., "The evaluation of pollution level and release characteristics by inner productivity in the sediment of lake," *J. Environ. Impact Assessment*, **21**(1), 81~91(2012).
15. K-water, "A study on the distribution of organic sediment in dam reservoir and its treatment," (1997).
16. Korea Rural Community Corporation, "A study on the deriving of sediments quality guideline for reservoir dredging and the use of dredged soil," (2005).
17. Cho, Y. G., "Heavy metals in fine-grained bed sediments of the Mangyeong River, Korea," *J. Environ. Sci.*, **16**(5), 657~664(2007).