

시화호 유입하천의 수질오염물질 농도에 관한 연구

Spatial Characteristics of Pollutant Concentrations in the Streams of Shihwa Lake

장정익 · 한인섭[†] · 김경태* · 나공태*

Jeong-Ik Jang · Ihnsup Han[†] · Kyung-Tae Kim* · Kongtae Ra*

서울시립대학교 대학원 환경공학과 · *한국해양연구원 해양환경 · 방제연구부

Department of Environmental Engineering, Graduate School, The University of Seoul

*Marine Environment & Pollution Prevention Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute

(2011년 1월 3일 접수, 2011년 4월 27일 채택)

Abstract : We studied the characteristics of pollutant concentrations in 9 streams that flow into Shihwa Lake in order to provide the scientific data for effective implementation of total pollution loads management system (TPLMS) of the Lake. Suspended solid (SS), chemical oxygen demand (COD), dissolved nutrients (NO₂, NO₃, NH₄, PO₄ and SiO₂), total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) in stream water from industrial complexes, urban and agricultural regions were determined. Pollutant concentrations in December were higher than that in other sampling periods. COD concentration from industrial complex region with average of 12.6 mg/L was 2 times higher those from urban region (6.6 mg/L) and agricultural region (5.9 mg/L). TP concentration from industrial region also showed higher concentration than other regions. TN concentration in stream water was 5.89 mg/L for industrial region, 3.02 mg/L for urban region and 5.27 mg/L for agricultural region, respectively, suggesting inflow of TN due to fertilizer usage in agricultural field. Relative percentage of nitrogen compounds in TN follows the sequence: NH₄ (35.1%) > NO₂ (20.0%) > DON (22.8%) > PON (8.9%) > NO₃ (3.2%). Concentrations of dissolved nutrients, TP and TN in stream water were 3.2~37.2 times higher than that in Shihwa Lake seawater, therefore large amount of pollutants may be directly entered into Shihwa Lake without any treatment. For Gunja stream of industrial region, pollutants at midstream showed relatively higher concentration compared to upstream and downstream. It is necessary to manage the illegal discharging of sewage and waste water. Our results provide valuable informations on the estimation and reduction of total pollutant loads in the process of establishing adequately strategic and implemental plan of Shihwa Lake TPLMS.

Key Words : Shihwa Lake, Streams, Pollutants, COD, Total Pollutant Load Management System (TPLMS)

요약 : 본 연구에서는 시화호 연안오염총량관리제 도입시 과학적인 기초자료를 제공하기 위하여 하천을 통해 시화호로 유입되는 수질오염물질의 농도 특성을 조사하였다. 시화호 유역 하천수 내 부유물질(SS), 화학적 산소요구량(COD), 용존영양염(NO₂, NO₃, NH₄, PO₄, SiO₂), 총인(TP) 및 총질소(TN) 등을 분석하였으며 조사시기별 및 지역별(산업지역, 도시지역 및 농업지역) 하천수의 오염물질 농도 특성을 비교하였다. 12월 조사 결과가 다른 조사 시기에 비해 모든 수질항목에서 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. 산업지역 내 하천수에서의 COD의 평균값은 12.6 mg/L로 도시지역(6.6 mg/L) 및 농업지역(5.9 mg/L)에 비해 약 2배 높은 농도를 나타냈다. 총인 농도는 COD와 유사하게 산업지역 내 하천수에서 가장 높았고 농업지역 내 하천에서 상대적으로 낮은 농도를 보였으며 용존 인산염(PO₄)이 약 21%를 차지하고 있었다. 총질소는 산업지역, 도시지역 및 농업지역에서의 평균농도가 각각 5.89 mg/L, 3.02 mg/L 및 5.27 mg/L로 산업지역과 더불어 질소계 비료의 사용의 영향으로 농업지역에서도 높은 농도를 보였다. 조사시기 및 지역에 따라 차이는 있으나 총질소 중 질소화합물의 평균비율은 NH₄ (35.1%) > NO₃ (30.0%) > DON (22.8%) > PON (8.9%) > NO₂ (3.2%)의 순으로 나타났고 약 70%가 용존무기질소(NH₄, NO₃, NO₂)의 형태로 존재하고 있었다. 하천수의 용존영양염, 총인 및 총질소 농도는 시화호 표층수에 비해 3.2~37.2배 높았으며 이는 많은 양의 오염물질이 처리과정 없이 하천을 통해 시화호로 유출되는 것을 시사하고 있다. 특히 시화호를 관통하는 군자천 중류지역에서 상류 또는 하류지점에 비해 높은 농도를 나타내 산업단지에서 발생한 하수와 폐수 일부가 관로 오점 및 무단 방류되어 하수구를 통하여 유입되고 있어 하천수에 대한 하수처리시설로의 이송 및 환경기초시설 증대 등의 대책이 필요한 것으로 사료된다. 본 연구결과는 향후 시행 예정인 시화호 연안오염총량관리제의 기본계획 및 시행계획 수립시 오염부하량 산정과 삭감계획 수립에 유용한 정보로 사용될 수 있을 것이다.

주제어 : 시화호, 하천, 오염물질, 화학적 산소요구량, 연안오염총량관리제

1. 서론

한국 서해 경기만에 위치하는 시화호는 면적 61.0 km²의 인공호수로 행정구역상 경기도 안산시, 시흥시, 화성시에 속해 있으며, 제2차 국토종합계획에 근거한 시화지구 개발사업에 따라 1994년 1월 24일 시화방조제 물막이공사가 완료

되면서 형성되었다. 시화지구 개발사업은 수도권의 인구분산을 위한 도시를 조성하고 산업단지와 농지를 조성하기 위하여 1986년에 시작된 대규모 간척사업으로 방조제를 축조하여 간척지를 개발함으로써 토지수요를 충족하고 수자원을 확보하여 간척농지와 배후지에 농업용수를 개발하기 위한 것이었다. 이에 따라 정부에서는 연장 12.7 km의 방

[†] Corresponding author E-mail: ishan@uos.ac.kr Tel: 02-2210-2418 Fax: 02-2244-2245

조제 축조를 통해 해수교환을 차단하여 시화호를 담수화하려고 계획하였으나 시화호 수질이 1993년 COD 2.6 mg/L에서 1996년 COD 14.2 mg/L로 급격히 악화되면서 1997년 3월 방조제 배수갑문을 시범적으로 개방한데 이어 2000년 12월 담수호 계획을 포기하면서 시화호를 해수호로 관리하게 되었다. 시화호의 수질 개선을 위하여 2000년 해양오염 방지법에 근거하여 시화호를 해양오염에 직접 영향을 미치는 육지를 포함하여 특별관리지역으로 지정하였다. 1997년 이후 방조제 배수갑문을 통해서 해수가 상시적으로 유통되고 2001년 시화호 종합관리계획을 수립하여 시행함으로써 시화호 수질은 국가측정망을 기준으로 할 때 1997년 COD 17.4 mg/L에서 2009년 COD 4.1 mg/L로 상당부분 개선되었으나 여전히 방조제 건설 이전에 비해 높은 농도를 나타내고 있다. 시화호의 수질을 개선하기 위한 여러 가지 노력 중 최근 가장 이슈가 되고 있는 것이 2011년 하반기에 가동 예정인 시화방조제 중앙부에 위치한 조력발전소이다. 이를 통해 청정에너지 생산과 더불어 해수유통량 증가를 통한 시화호의 수질이 보다 개선될 것으로 기대되고 있다. 그리고 해수유통량 증가로 인한 시화호 외해 수질의 악화를 방지하고 시화멀티테크노밸리 개발사업 및 송산그린시티 개발사업 등 시화호 유역에서 추진되는 각종 개발사업으로 인해 추가적으로 발생가능한 오염물질의 능동적인 관리를 위하여 연안오염총량관리제의 도입이 계획되고 있다.

시화호 유역에는 국가산업단지인 시화산단과 반월산단이 위치하고 입주업체는 2010년 12월 각각 8,649개와 5,199개로 전체 국가산업단지 중 32.7%를 차지하고 있으며 기계, 전기전자, 석유화학 및 철강 관련업체가 81%를 차지하고 있다. 시화호의 수질 오염은 시화호 유역에 위치한 도시와 공장의 하수 및 폐수가 일부분 정화되지 않고 하천 또는 우수관을 통해서 시화호로 직접 유입되는데 원인이 있다. 시화호 유역에는 주거, 상업, 산업 및 농촌지역이 혼재하며 시화호로 유입되는 소규모 인공하천과 자연하천이 존재하고 있다. 시화산단을 흐르는 옥구천, 군자천, 정왕천, 시흥천 등 4개의 인공하천, 시화산단과 반월산단을 지나는 신길천, 안산시 도시지역을 관통하는 안산천, 안산시, 군포시, 화성시의 농촌지역을 흐르는 반월천, 동화천, 삼화천 등이 있다. 시화호로 유입되는 하천에 대한 연구는 산업단지가 인접한 특성상 주로 중금속 및 지속성 유기오염물질에 대한 조사가 선행되어 하천수 및 하천 퇴적물 내 매우 높은 농도의 중금속(Cu, Zn, Cd 및 Pb)이 검출되었으며,^{1,2)} 또한 하천 퇴적물 내 높은 농도의 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), 다염화바이페닐(polychlorinated biphenyls, PCBs) 및 노닐페놀(nonylphenols, NPs)가 보고되었다.^{3,4)} 최근 시화 및 반월산단 인접한 시화호 내측 지역에서 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 대증식으로 인하여 수질 악화가 보고되어,⁵⁾ 비점오염원을 통한 화학적 산소요구량, 용존영양염, 총인 및 총질소 등의 오염물질에 대한 오염기여도 및 오염부하에 대한 심각성에 따라 시화

호로 유입되는 전체 오염부하를 효율적으로 삭감하기 위한 연안오염총량관리제의 도입의 필요성이 제기되었다. 시화호에 대한 연안오염총량관리제의 도입 및 시행을 통한 오염부하의 삭감을 위해서는 시화호 유역에서 강우 및 비강우시 오염물질을 발생하는 다양한 오염원에 대한 기초자료의 획득이 무엇보다 중요하나 현재까지 주로 강우 이벤트에 의해서 발생하는 비점오염원에 대한 조사가 주를 이루고 있다. 시화호 유역 하천 및 반월산단 토구를 통한 강우시 발생 및 유출되는 비점오염물질에 대한 연구를 통해 다량의 부유물질, 화학적 산소요구량, 총인 및 총질소 등의 오염물질이 비점오염물질의 형태로 시화호로 직접 유입되는 것으로 나타났다.^{6,7)} 비강우시의 경우, 시화호 유역 하천을 통해 시화호로 유출되는 부유물질, 화학적 산소요구량, 용존영양염, 총인 및 총질소 등의 오염물질은 지속적으로 시화호로 유출되어 시화호 수질에 직접적으로 영향을 주고 있다. 이러한 비강우시 시화호 유역의 하천 등을 통해 유출되는 오염물질의 총량에 대한 기여도는 클 것으로 예상되며 시화호 유역 내 발생하는 전체 오염물질의 삭감을 위한 기초자료로서 매우 중요하지만 현재까지 광범위한 유역 면적을 조사해야 하는 등의 난점으로 인하여 연구가 매우 부족한 실정이다. 따라서 비강우시 하천을 통한 오염물질의 유출은 시화호 유역 내 발생하는 오염물질의 삭감을 위한 기초자료로서 매우 중요하다.

시화호 연안오염총량관리제의 도입 및 효율적인 시행을 위해서는 목표수질 설정을 위한 오염부하량 산정 및 목표수질 달성을 위한 오염물질 삭감계획의 수립이 필요하며 이를 위해서는 강우시 뿐만 아니라 비강우시 시화호 유입 하천의 수질오염물질 현황과 특성에 대한 연구가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 시화호 연안오염총량관리제 도입시 정책결정에 있어 과학적인 기초자료를 제공하기 위하여 비강우시 시화호 유역 하천 내 화학적 산소요구량, 용존영양염, 총인 및 총질소 등의 오염물질에 대한 농도 특성을 조사하였으며 조사시기 및 지역에 따른 비교를 실시하였다.

2. 재료 및 방법

시화호로 유입되는 옥구천(제1간선수로), 군자천(제2간선수로), 정왕천(제3간선수로), 시흥천(제4간선수로), 신길천, 안산천, 반월천, 동화천, 삼화천 등 9개 하천에 대하여 2개월 간격으로 비강우시 2010년 8월 9일, 10월 11일, 12월 4일에 각 하천의 말단 1개 지점에서 하천수를 채수하였다. 10월 조사에서는 시화산단 및 반월산단의 산업지역을 관통하여 흐르는 하천의 상류지역에서 하류지역에 걸쳐 여러 지점을 선정하였으며 옥구천, 군자천, 정왕천은 7개 지점, 시흥천은 5개 지점, 신길천은 11개 지점에서 하천수를 채수하였다(Fig. 1).

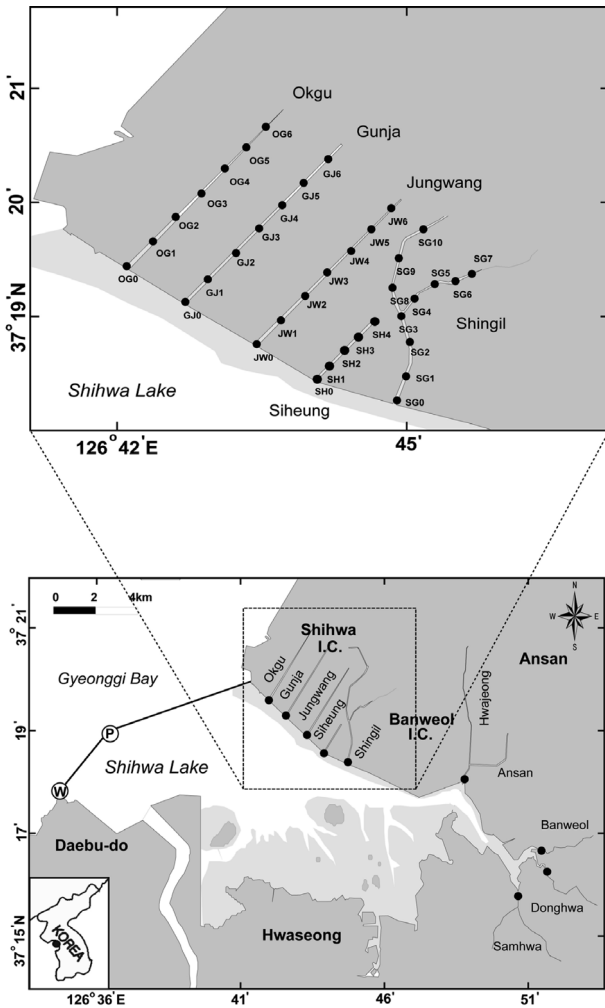


Fig. 1. Map of study area. Abbreviations for W and P mean watergate and tidal power plant, respectively.

채수된 하천수는 부유물질(SS; suspended solids), 화학적 산소요구량(COD; chemical oxygen demand), 용존영양염(PO₄; 인산염, NO₂; 아질산염, NO₃; 질산염, NH₄; 암모니아염, SiO₂; 규산염), 총질소(TN; total nitrogen) 및 총인(TP; total phosphorus) 등의 항목에 대하여 분석을 실시하였다. 부유물질(SS)과 화학적 산소요구량(COD)은 해양환경공정 시험방법에 따라 분석하였고,⁸⁾ 용존영양염류는 GF/F 여과지로 여과한 시료를 Segmented Flow Analyzer (O.I. Analytical)로 측정하였으며, 총질소 및 총인은 여과되지 않은 시료를 과황산칼륨 용액으로 산화시킨 다음 Flow Injection Analyzer (Lachat Quickchem AE flow injection system)로 분석하였다.⁹⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 시화호 유입하천의 오염물질 농도 특성

Fig. 2는 시화호로 유입하는 시화호 유역하천 내 부유물질, COD, 용존영양염, 총질소 및 총인 등 오염물질의 조사시

기별 농도를 나타내고 있다.

8월 조사에서 유입하천의 부유물질 농도범위는 0.04~35.9 mg/L(평균 12.2 mg/L)로 안산천에서 최대농도인 35.9 mg/L를 나타냈으며, 농업지역인 반월천(17.1 mg/L) 및 동화천(16.6 mg/L)의 부유물질 농도가 다른 하천에 비해 높았다(Fig. 2). COD의 농도범위 및 평균농도는 각각 5.4~14.0 mg/L와 평균 8.5 mg/L로, 옥구천에서 14.0 mg/L로 가장 높았고 하천공사로 인하여 부유물질의 농도가 높았던 안산천 역시 12.8 mg/L로 비교적 높았으며 반월천에서는 가장 낮은 농도를 보였다. 용존 인산염은 0.017~0.206 mg/L(평균 0.062 mg/L)의 농도범위로 시흥천(0.206 mg/L)이 옥구천(0.017 mg/L)에 비해 약 12배 높은 농도를 보였다. 총인은 시흥천에서 0.635 mg/L의 최대 농도를 보였으며 신길천에서 낮은 농도(0.235 mg/L)를 나타냈다. 질산염의 경우 농도범위와 평균농도는 각각 0.142~2.257 mg/L와 0.833 mg/L로 농업지역인 반월천과 삼화천에서 높은 농도를 보여 비료사용의 영향을 받고 있는 것으로 알 수 있었다. 시화산단과 반월산단의 경계에 위치한 시흥천에서 질산염 농도가 1.831 mg/L로 다른 산업지역 내 하천에 비하여 약 4~13배 높았다. 암모니아염의 농도범위 및 평균농도는 각각 0.304~4.856 mg/L와 1.745 mg/L로 질산염 농도가 높았던 반월천을 제외하고는 산업지역 내 하천이 도시지역과 농업지역 내 하천에 비해 높은 농도를 나타냈다. 총질소 농도는 2.26~6.318 mg/L(평균 4.066 mg/L)로 정왕천, 시흥천 및 반월천에서 6.0 mg/L 이상의 높은 농도를 보였다.

10월 조사의 경우 부유물질의 최대농도는 8월 조사와 마찬가지로 하천공사가 진행 중인 안산천에서 최대농도인 68.5 mg/L를 나타냈고, 평균농도는 20.8 mg/L로 8월 조사에 비해 약 1.7배 증가하였다. COD의 농도범위는 1.7~11.1 mg/L(평균 4.8 mg/L)로 8월 조사에 비해 평균적으로 약 절반 수준으로 감소하였으나 8월 조사와 마찬가지로 옥구천에서 최대농도를 나타냈으며 농업지역 내 하천에서 평균농도 이하의 낮은 농도를 보였다(Fig. 2). 인산염은 0.022~0.208 mg/L(평균 0.074 mg/L)의 농도범위와 평균농도로 8월 조사와 큰 차이를 보이지 않았다. 총인은 0.143~0.721 mg/L(평균 0.285 mg/L)로 8월 조사에 비해 약간 감소하였으며 8월 조사와 유사하게 시흥천에서 최대농도인 0.721 mg/L를 나타냈다. 질산염 농도는 농업지역을 흐르는 반월천, 동화천 및 삼화천에서 높은 농도를 보였으며, 산업지역을 흐르는 하천에서는 상대적으로 낮은 농도를 보였고 8월 조사에 비해 평균적으로 약 2배 이상의 높은 농도를 보였다. 암모니아염 농도는 질산염 농도가 높았던 반월천, 삼화천 및 동화천에서는 낮은 농도를 보였으나 시흥천, 정왕천, 군자천 및 옥구천에서의 농도가 높은 것으로 나타났다. 총질소 농도는 질산염 농도가 높은 농업지역을 흐르는 반월천, 동화천, 삼화천에서 높았으며, 시흥천에서 6.856 mg/L의 높은 농도를 보였다.

안산천 내 부유물질의 농도는 10월에는 최대 농도를 보였으나 12월 조사에서는 하천공사가 일시적으로 중단된 영

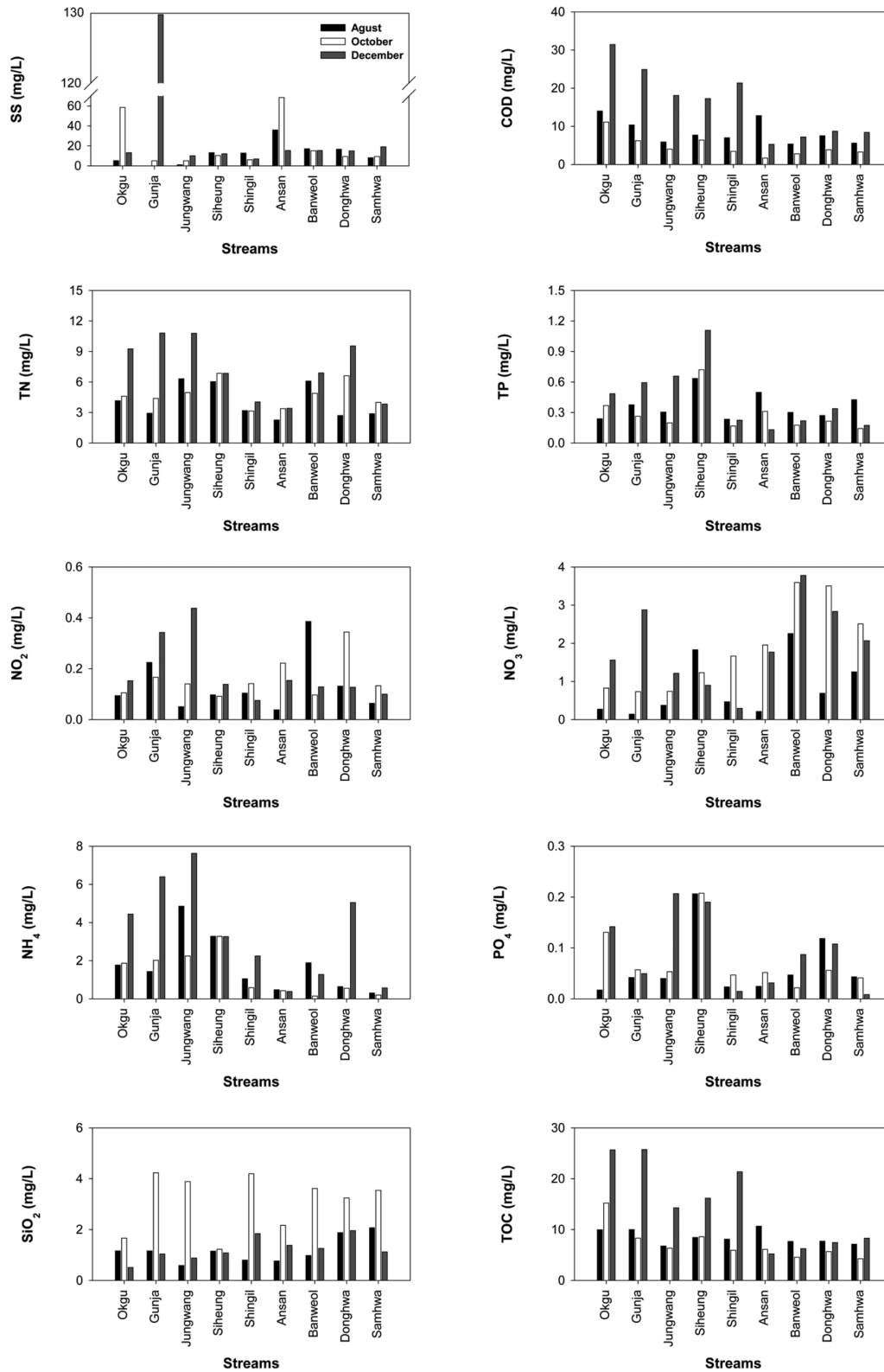


Fig. 2. SS, COD, TN, TP, dissolved nutrients and TOC concentrations in water from 9 streams of Shihwa Lake.

향으로 가장 낮은 농도인 6.95 mg/L를 나타냈다(Fig. 2). 평균농도는 26.3 mg/L로 8월과 10월 조사에 비해 증가한 것으로 나타났으며 이는 간선수로인 군자천의 생태하천 공사로 인하여 129 mg/L의 높은 부유물질 농도때문이다. COD의

농도는 부유물질의 농도가 높았던 군자천보다는 옥구천에서 최대 농도인 31.4 mg/L를 나타냈으며 8월 조사와 10월 조사에 비해 약 1.9배 및 3.3배 증가하였다. 인산염 농도는 0.008~0.207 mg/L(평균 0.093 mg/L)로 8월 및 10월 조사에

Table 1. Mean concentrations for pollutants (unit: mg/L) at different streams of Shihwa Lake in 2010

Stream	SS	COD	PO ₄	NO ₂	NO ₃	NH ₄	SiO ₂	DIN	TP	TN	POC	PON	DOC	TOC
Okgu	25.6	18.9	0.097	0.117	0.885	2.694	1.114	3.696	0.364	6.0	3.46	0.43	13.5	16.9
Gunja	45.0	13.8	0.049	0.245	1.251	3.284	2.144	4.779	0.411	6.05	3.34	0.46	11.3	14.7
Jungwang	5.4	9.3	0.100	0.210	0.777	4.910	1.787	5.897	0.387	7.36	2.15	0.31	7.0	9.1
Siheung	11.8	10.5	0.201	0.109	1.319	3.272	1.155	4.700	0.821	6.58	2.89	0.49	8.2	11.1
Shingil	8.6	10.6	0.028	0.107	0.808	1.295	2.281	2.210	0.209	3.46	1.65	0.24	10.2	11.8
Ansan	39.9	6.6	0.036	0.138	1.311	0.430	1.438	1.879	0.313	3.02	3.49	0.55	3.8	7.3
Banweol	15.9	5.1	0.052	0.204	3.211	1.105	1.952	4.519	0.232	5.96	1.72	0.29	4.5	6.2
Donghwa	13.6	6.7	0.094	0.201	2.344	2.080	2.361	4.624	0.275	6.29	2.22	0.38	4.7	6.9
Samhwa	12.2	5.8	0.031	0.099	1.944	0.357	2.245	2.400	0.248	3.57	1.96	0.36	4.6	6.6
Industrial region	19.3	12.6	0.095	0.158	1.008	3.091	1.696	4.256	0.438	5.89	2.70	0.39	10.0	12.7
Urban region	39.9	6.6	0.036	0.138	1.311	0.430	1.438	1.879	0.313	3.022	3.49	0.55	3.8	7.3
Agricultural region	13.9	5.9	0.059	0.168	2.499	1.181	2.186	3.848	0.252	5.272	1.97	0.34	4.6	6.6

* Nine streams were divided into three representative regions. Industrial region includes Okgu, Gunja, Jungwang, Siheung and Shingil streams. Urban region is only Ansan stream. Agricultural region includes Banweol, Donghwa and Samhwa streams.

Table 2. Comparison of mean concentrations for pollutants (unit: mg/L) between in stream water and in seawater collected from Shihwa Lake and its adjacent sea of 2010

Sampling region and period	SS	COD	PO ₄	NO ₂	NO ₃	NH ₄	SiO ₂	DIN	TP	TN	POC	PON	DOC	TOC	
Stream water	August	12.2	8.5	0.062	0.132	0.833	1.745	1.174	2.710	0.365	4.066	2.23	0.35	6.28	8.50
	October	20.8	4.8	0.074	0.160	1.862	1.257	3.086	3.279	0.285	4.760	2.45	0.38	4.77	7.22
	December	26.3	15.8	0.093	0.184	1.922	3.473	1.232	5.579	0.437	7.273	2.95	0.44	11.5	14.5
	Mean	19.8	9.7	0.077	0.159	1.539	2.158	1.831	3.856	0.362	5.366	2.54	0.39	7.53	10.07
Seawater	Shihwa Lake	12.3	9.3	0.010	0.016	0.060	0.058	0.342	0.101	0.114	0.801	3.99	0.48	4.80	8.79
	Outer Sea	6.6	2.6	0.030	0.014	0.105	0.154	0.253	0.274	0.046	0.475	0.57	0.06	2.76	3.33

비해 각각 약 1.5배 및 1.3배 증가하였고, 정왕천과 시흥천에서의 농도가 각각 0.208 mg/L와 0.131 mg/L로 다른 하천에 비해 높은 것으로 나타났다. 총인 농도는 0.131~1.108 mg/L(평균 0.437 mg/L)로 8월과 10월 조사에 비해 평균농도가 증가하였고, 시흥천에서 최대농도인 1.108 mg/L를 보였다. 질산염 농도는 0.294~3.78 mg/L(평균 0.184 mg/L)로 다른 조사시기와 마찬가지로 농업지역을 흐르는 반월천과 삼화천에서 높은 농도를 보였고, 산업지역을 흐르는 하천에서는 상대적으로 낮은 농도를 보였으며, 8월 조사에 비해 약 2.3배 높은 평균농도를 보였다. 암모니아염 농도는 0.383~7.627 mg/L(평균 3.473 mg/L)로 질산염의 농도가 높았던 반월천, 삼화천에서 8월 조사 및 10월 조사와 같이 낮은 농도를 보였고, 정왕천과 군자천에서 농도가 높게 나타났다. 총질소 농도는 3.416~10.82 mg/L(평균 7.273 mg/L)로 8월 조사결과 평균 4.066 mg/L와 10월 조사결과 4.760 mg/L에 비해 상당히 증가하였고, 정왕천과 군자천에서 높은 농도를 보였다(Table 1, 2, Fig. 3).

시화호 유역 하천수의 오염물질 농도의 토지이용에 따른 산업지역, 도시지역 및 농업지역으로 구분한 지역별 비교는 Table 1에 나타내었다. 측정항목 중 COD, 인산염, 총인, 암모니아염, 총질소의 평균농도가 산업지역 하천(옥구천, 군자천, 정왕천, 시흥천 및 신길천)에서 도시지역 하천(안산천) 및 농업지역 하천(반월천, 동화천 및 삼화천)에 비해 높은 것으로 나타났다(Table 1). 산업지역 내에서도 COD의 경우

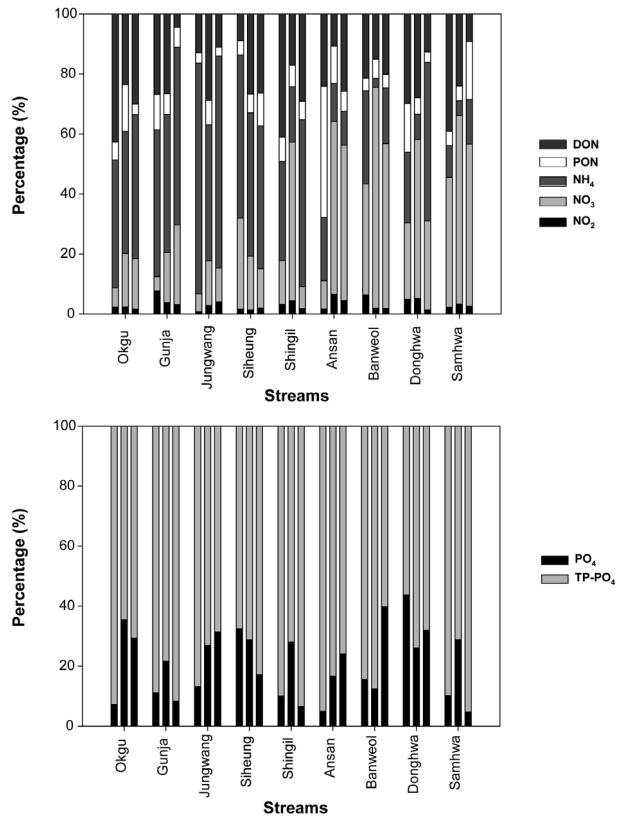


Fig. 3. Relative percentage (%) of dissolved nutrients in stream water.

옥구천이 가장 높은 평균농도를 나타냈으며 산업지역 내 하천의 평균농도가 12.6 mg/L로 도시지역(6.6 mg/L)과 농업지역(5.9 mg/L)에 비해 약 2배 높은 것으로 나타났다. 인산염과 총인은 시화산단과 반월산단의 경계를 흐르는 시흥천에서 가장 높은 평균농도를 나타냈고 산업지역의 평균농도가 0.095 mg/L로 다른 지역에 비해 높은 것으로 나타났다. 질산염의 경우 농업지역 내 평균농도가 2.499 mg/L로 다른 지역에 비해 높았으나 암모니아염은 산업지역의 평균농도가 3.091 mg/L로 도시지역(0.430 mg/L)과 농업지역(1.181 mg/L)에 비해 약 7.2배 및 2.6배 높은 것을 알 수 있었다.

총질소의 최대 평균농도를 보이는 지역은 정왕천이었으며 신길천을 제외한 산업지역 내 하천에서 상대적으로 높은 농도를 나타냈으며 안산천에서 상대적으로 낮은 농도를 보였다. 총질소 내 다양한 질소화합물에 대한 상대적인 비율은 Fig. 3에 나타내었다. 총질소 내 질소화합물의 평균비율은 NH₄ (35.1%) > NO₃ (30.0%) > DON (22.8%) > PON (8.9%) > NO₂ (3.2%)의 순으로 암모니아염, 질산염과 용존 유기질소가 대부분을 차지하고 있었다. 암모니아염, 질산염, 용존유기질소, 입자성유기질소 및 아질산염의 평균농도는 각각 2.16 mg/L, 2.54 mg/L, 1.12 mg/L, 0.39 mg/L 및 0.16 mg/L로 질산염의 농도가 가장 높았다. 산업지역의 경우 암모니아염이 차지하는 평균비율이 49.0%로 높게 나타났으나 도시지역(15.0%)과 농업지역(18.6%)은 암모니아염이 차지하는 비율이 상대적으로 작아 암모니아염은 주로 산업지역의 하수나 폐수를 통해 유출되는 것으로 알 수 있었다. 총 질소 중 질산염이 차지하는 비율은 농업지역에서 48.2%로 산업지역 17.2%에 비해 약 3배 높아 주로 농업지역을 통해 비료의 사용을 통하여 질산염이 유출되고 있는 것으로 나타났다. 입자성유기질소는 도시유역에서의 평균비율이 다른 지역에 비해 약 3배 높았으나 용존유기질소는 지역에 따라 큰 차이가 없었다. 시화호 표층수 내 질소화합물의 상대적인 비율은 PON (50.1%) > DON (38.3%) > NH₄ (8.3%) > NO₃ (2.9%) > NO₂ (0.4%)의 순이었으며 입자성유기질소, 용존유기질소, 암모니아염, 질산염, 아질산염의 평균농도는 각각 0.49 mg/L, 0.26 mg/L, 0.06 mg/L, 0.05 mg/L 및 0.01 mg/L로 보고된 바 있다.¹⁰⁾ 하천수의 용존무기질소(암모니아염, 질산염 및 아질산염) 농도는 4.86 mg/L로 시화호 표층수 내 용존무기질소의 평균 0.12 mg/L에 비해 약 40배 높았다. 또한 하천수 내 용존유기질소와 입자성유기질소가 차지하는 비율이 약 30%임에 비해 시화호 표층수에서는 이 비율이 평균적으로 90%로 나타나 하천을 통하여 공급되는 용존무기질소가 식물플랑크톤에 이용되는 것을 알 수 있었다.

총인 중 용존인산염이 차지하는 평균비율은 8월 16.5%, 10월 25.0% 및 12월 21.5%로 나타났다. 인산염의 평균농도는 정왕천(0.100 mg/L), 옥구천(0.097 mg/L), 동화천(0.094 mg/L), 반월천(0.052 mg/L), 군자천(0.049 mg/L), 안산천(0.036 mg/L), 삼화천(0.031 mg/L), 신길천(0.028 mg/L)의 순이었으나 총인 중 인산염이 차지하는 평균비율은 동화천

(33.9%), 시흥천(26.2%), 옥구천(24.2%), 정왕천(23.8%), 반월천(22.6%), 안산천(15.2%), 신길천(14.9%), 삼화천(14.6%), 군자천(13.7%)로 나타났다(Fig. 3). 하천수에서 용존인산염의 농도 및 총인 중 용존인산염이 차지하는 비율이 각각 0.08 mg/L와 약 21%로 나타났으나 시화호 표층수에서는 이들의 농도가 0.01 mg/L와 약 8.4%로 감소하는 것으로 나타나¹⁰⁾ 용존인산염 역시 용존무기질소와 마찬가지로 하천을 통해 시화호로 유출되어 식물플랑크톤에 의해 이용되는 것을 알 수 있었다. 총유기탄소(TOC)의 지역별 평균농도는 산업지역 12.7 mg/L, 도시지역 7.3 mg/L 및 농업지역 6.6 mg/L로 COD와 유사한 지역적 차이를 보였으나 총유기탄소 중 용존유기탄소(DOC) 차지하는 비율은 산업지역에서는 78.7%, 도시지역에서는 52.0%, 농업지역에서는 69.7%로 하천수 내 총유기탄소의 평균 74%가 용존유기탄소인 것으로 나타났다. COD, 총인 및 총유기탄소의 평균농도는 산업지역 > 도시지역 > 농업지역 순으로 나타났다. 이는 산업단지에서 발생하는 하수와 폐수를 처리하는 환경기초시설의 운영에도 불구하고, 산업단지 하천으로 관로 오접 등으로 오염물질이 무단으로 유입되고 있음을 시사하며 도시지역 하천 역시 생활하수로 인하여 오염물질이 유입되고 있음을 알 수 있었다.

Table 2는 각 조사시기별 오염물질의 농도 비교 및 하천수와 시화호 내·외측 표층수간의 오염물질의 농도를 비교하였다. 부유물질의 경우 지역별, 조사시기별 차이보다는 하천공사에 의한 영향을 가장 크게 받고 있었다. 규산염을 제외한 모든 분석항목에 대한 12월 조사에서의 평균농도가 다른 조사시기에 비해 높았으며, 8월이 가장 낮은 농도를 나타내었다. 12월 조사의 경우 12월 4일 약 10시경 각 하천에 대한 비강우시 시료가 획득되었으나 기상자료에 의하면 12월 2일에 총 5.5 mm의 간헐적인 강우로 인하여 산업지역, 도시지역 및 농업지역에 분포하는 비점오염물질이 강우와 함께 하천으로 유입된 영향을 가장 크게 받고 있는 것으로 나타났다. 8월 조사 결과가 가장 낮은 이유는 우리나라는 몬순기후의 특성상 하계에 집중적인 강우로 인하여 다량의 비점오염물질이 강우를 통해 많은 부분 유출되었기 때문으로 사료된다. 따라서 시화호 유입하천에서의 오염물질 농도는 계절적 요인보다는 하천 주변지역의 토지이용특성 및 강우에 의한 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

3.2. 산업지역 하천의 오염물질 농도 공간적 특성

시화호 유역하천 중 수질오염이 심한 시화산단과 반월산단을 관통하는 옥구천, 군자천, 정왕천, 시흥천, 신길천에 대하여 오염물질의 공간적 특성을 파악하고자 10월 11일 비강우시에 조사를 실시하였다(Fig. 4).

옥구천에서의 부유물질 농도는 상업 및 주거지역이 위치한 상류지역에서 하류지역으로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4). COD와 총질소의 농도는 상류지역에서는 낮았으나 중류지역에서 최대 농도를 보인 뒤 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 총인 농도는 상류지점에서는 0.128 mg/L

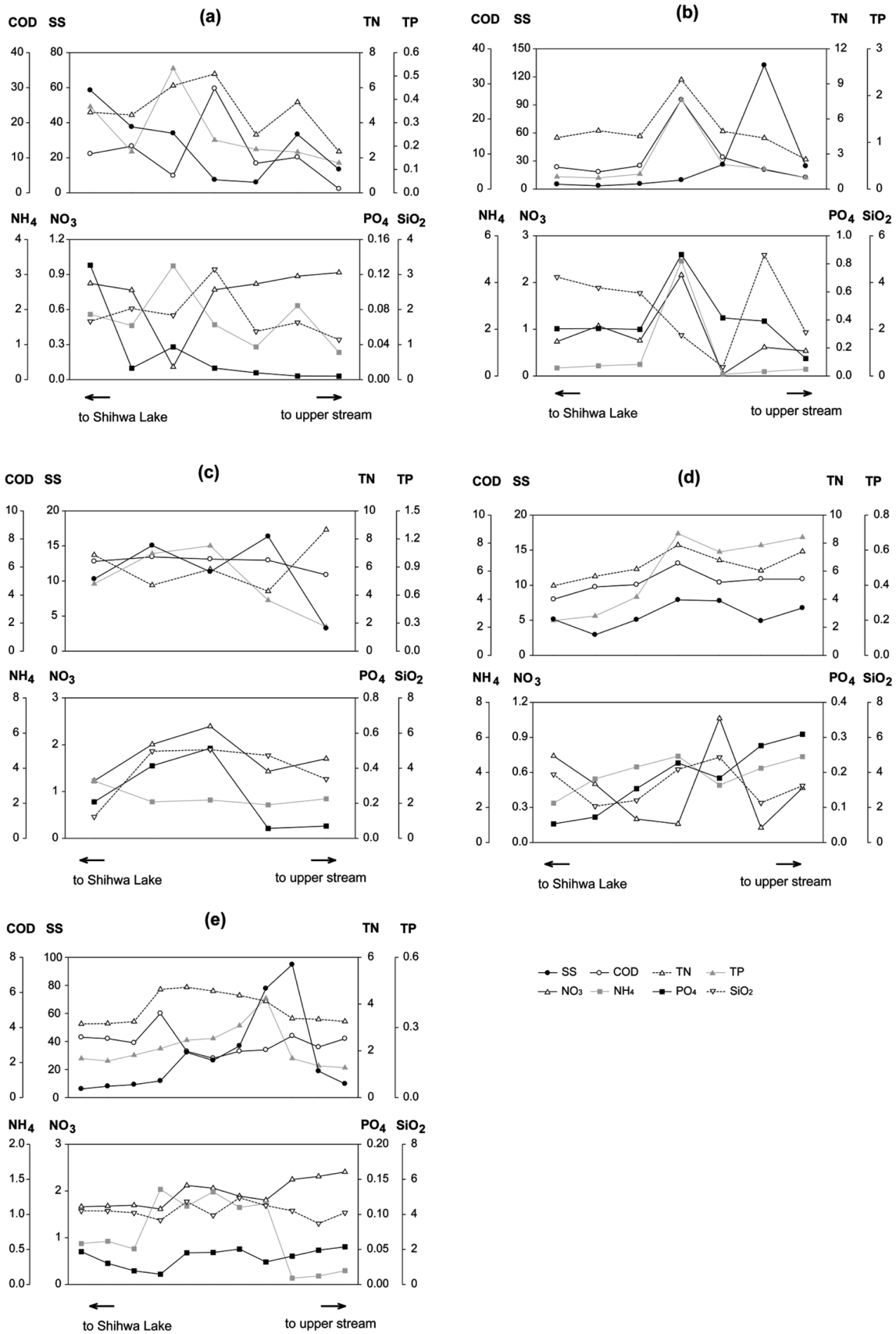


Fig. 4. Characteristics of water quality parameters in water from Okgu (a), Gunja (b), Jungwang (c), Sihung (d) and Shihgil (e) streams that penetrate Shihwa and Banweol industrial complexes.

로 최소 농도를 보였으나 하류로 갈수록 증가하여 시화호 인근 정점에서는 0.369 mg/L로 약 3배 증가하였다. 질산염은 1개 정점을 제외하고 1.0 mg/L 미만의 농도를 보였으나 암모니아염과 인산염은 하류지역으로 갈수록 농도가 증가하였다. 따라서 옥구천은 중류지점 유역에 오염원이 많이 분포하고 있음을 알 수 있었다(Fig. 4).

군자천의 7개 지점에 대한 조사결과 부유물질 농도는 상류지점에서 높고, 하류지점으로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 있었다. COD 농도는 경우 최상류와 하류에서는 각각 3.3 mg/L와 6.2 mg/L에 농도임에 비해 중간지점에서는 25.4 mg/L로 높은 농도를 보였고 평균적으로 옥구천에 비해 낮은 것으로 나타났다. 총인 농도 역시 COD와 마찬가지로 상류와 하류지역에서는 상대적으로 낮았으나 중간지점에서는 1.913 mg/L로 다른 지점에 비해 약 8배 높은 농도를 보였다. 총질소 농도는 2.53~9.35 mg/L(평균 5.01 mg/L)로 옥구천과 유사한 평균 농도를 보였으며, 다른 조사항목과 마찬가지로 중간지점 농도가 9.35 mg/L로 가장 높게 나타났다. 하천 중간지점에 위치한 하수구에서 하천으로 유입되는 유출수에 대한 조사를 실시하였으며 유출수 내 오염물질 농도가 질산염 17.7 mg/L, 암모니아염 32.9 mg/L, 규산염 15.5 mg/L, 총인 4.134 mg/L, 총질소 24.7 mg/L로 군자천 여러 지점의 평균농도에 비해 4.9~21배 높은 농도를 나타내고 있어 관로의 오점 또는 하수나 폐수의 무단 방류로 인한 유입원이 존재함을 확인하였다.

정왕천에서는 부유물질 농도가 2.9~7.9 mg/L(평균 5.8 mg/L)로 시료 채취 지점에 따른 변화폭이 가장 작았고, 평균 농도 역시 앞서 언급한 옥구천과 군자천의 1/4 수준이었다. COD 농도 역시 4.0~6.6 mg/L(평균 5.2 mg/L)로 시료 채취 지점에 따른 변화폭이 작았으나, 중류지점에서 상대적으로 높게 나타났다. 총인 농도는 0.20~0.70 mg/L(평균 0.48 mg/L)로 상류지점부터 중류지점까지 약 0.60 mg/L 이상의 높은 농도를 보였고, 시화호에 인근한 최하류지점에서는 0.20 mg/L로 낮은 값을 보였으며, 총질소 농도 역시 유사한 경향을 보였다. 용존영양염의 경우 암모니아염을 제외하고는 중류지역에서 농도가 급격히 증가하는 것으로 나타나 다른 하천과 마찬가지로 중류지역에 오염원이 존재할 가능성을 시사하고 있다.

앞서 언급한 옥구천, 군자천 및 정왕천은 최상류지역이 주거지역 및 상업지역으로 이루어졌으나 시흥천은 상대적으로 하천의 길이가 짧고 상류지역이 시화호에 위치해 있으며 이는 다른 하천의 중류지역에 해당된다. 따라서 시흥천 내 오염물질의 농도는 상류지역에서 가장 높았으며 하류지역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 부유물질의 농도범위 및 평균농도는 각각 3.3~15.1 mg/L와 11.3 mg/L로 정왕천에 비해 2배 높은 값이었으나 옥구천과 군자천에 비해 낮은 것으로 나타났다. 총인 및 총질소의 평균농도도 각각 0.739 mg/L와 6.065 mg/L로 총인은 옥구천, 군자천 및 정왕천에 비해 높은 평균농도를 보였고, 총질소 역시 높은 수준이었다.

하천의 길이가 가장 긴 신길천은 상류에서는 두 개의 하천이 중류지점 이후 하나로 합쳐지는 특징을 보이고 있다. 정점 SG0~SG3은 합류 이후 신길천 지점이고, 정점 SG4~SK7은 합류전 신길천 지점이며, SG8~SG10은 합류전 신길천 지류지점이다. 부유물질의 농도는 6.1~94.8 mg/L(평균 30.2 mg/L)로 다른 조사 하천에 비해 평균농도가 가장 높았다. 특히 합류 후 신길천 평균농도는 8.85 mg/L로 상대적으로 낮은 농도를 보였다. COD의 농도는 2.2~4.8 mg/L(3.2 mg/L)로 다른 조사 하천에 비해 상당히 낮은 값을 보이고 있었다. 합류전 신길천에서의 평균농도가 2.5 mg/L로 가장 낮았으며, 하류지역에서의 평균농도가 3.7mg/L로 다소 높았다. 총인 농도는 0.128~0.424 mg/L(평균 0.216 mg/L)로 다른 조사 하천에 비해 낮은 농도를 보였다. 합류전 신길천 지류지점에서는 평균 0.14 mg/L였으나 합류전 신길천 내에서는 0.31 mg/L로 높았고, 하류지점에서는 0.18 mg/L로 다시 감소하는 특징을 보이고 있었다. 총질소 역시 평균 농도는 3.81 mg/L로 다른 조사 하천에 비해 낮은 값을 보였고, 합류전 신길천 지점에서 높았으며, 하류지점에서 낮은 특징을 나타냈다. 전반적으로 상류에서 하류지역으로 갈수록 오염물질의 농도가 감소하는 경향을 보이고 있었다. 일부 오염물질의 경우 시료채취 지점에 따라 농도 변화폭이 크지 않은 것으로 나타나 하천 전 유역에 걸쳐 오염원이 존재하는 것으로 나타났다. 결과적으로 시화호 및 반월호 단 유역 하천수 내 오염물질의 농도에 영향을 미치는 가장 큰 원인은 각 하천의 중류지역에 위치한 공장의 하수와 폐수 일부가 관로 오점 및 무단 방류로 인하여 처리되지 않고 직접 유입되었기 때문으로 사료된다.

3.3. 수질오염물질 항목간 상관관계 분석

시화호 유역하천의 오염물질 항목간 상관관계 분석결과는 Table 3에 나타내었다. 부유물질은 용존영양염, COD, 총인 및 총질소와 상관성이 없었으나 입자성유기탄소(POC; $r = 0.73, p < 0.01$) 및 입자성유기질소(PON; $r = 0.39, p < 0.01$)과 통계적으로 유의한 양(+)의 상관성을 보였다(Fig. 5). 이러한 상관성은 하천 공사 등으로 인하여 부유물질의 농도가 급격히 증가한 일부 데이터의 영향이 있는 것을 알 수 있었다. 하천수 내 클로로필-a의 농도 분석이 이루어지지 않았으나 부유물질의 대부분은 식물플랑크톤과 밀접한 관련이 있는 것을 시사하고 있다. COD의 경우 총인 및 총질소와 양(+)의 양호한 상관성($r = 0.38, 0.52, p < 0.01$)을 보였다. 특히 COD와 입자성유기탄소간에는 상관성($r = 0.26$)이 없었으나 용존유기탄소와는 높은 양(+)의 상관성($r = 0.92, p < 0.01$)을 보여 COD의 대부분은 용존유기물질에 영향을 받는 것으로 나타났다. 12월 조사에서는 여과되지 않은 COD와 GF/F로 여과된 용존상태의 COD를 동시에 분석한 결과 총 COD와 용존상태의 COD와의 상관성($r = 0.98$)이 매우 높으며, 총 COD 중 용존상태의 COD가 약 65%를 차지하는 것으로 나타났다. 농업지역의 경우 총 COD 중 용존상태의 COD가 차지하는 상대적인 비율은 약 57%로 산업지역 약

Table 3. Correlation factor between water parameters in the streams of Shihwa Lake by Pearson's correlation analysis

	SS	COD	PO ₄	NO ₂	NO ₃	NH ₄	SiO ₂	DIN	TP	TN	POC	PON	DOC	TOC
SS	1,00													
COD	0,05	1,00												
PO ₄	-0,17	0,26 ^a	1,00											
NO ₂	0,07	0,23	0,27 ^a	1,00										
NO ₃	0,16	-0,12	0,08	0,32 ^a	1,00									
NH ₄	0,00	0,47 ^b	0,48 ^b	0,35 ^b	-0,22	1,00								
SiO ₂	0,10	-0,44 ^b	0,08	-0,03	0,24	-0,27 ^a	1,00							
DIN	0,08	0,39 ^b	0,51 ^b	0,55 ^b	0,32 ^a	0,85 ^b	-0,13	1,00						
TP	-0,01	0,38 ^b	0,90 ^b	0,24	-0,03	0,54 ^b	-0,04	0,51 ^b	1,00					
TN	0,01	0,52 ^b	0,46 ^b	0,57 ^b	0,19	0,85 ^b	-0,18	0,93 ^b	0,49 ^b	1,00				
POC	0,73 ^b	0,25	0,09	-0,02	-0,15	0,20	0,00	0,11	0,36 ^b	0,13	1,00			
PON	0,39 ^b	0,26	0,20	0,10	-0,25	0,21	-0,06	0,06	0,46 ^b	0,14	0,87 ^b	1,00		
DOC	0,05	0,92 ^b	0,41 ^b	0,30 ^a	-0,06	0,49 ^b	-0,36 ^b	0,45 ^b	0,51 ^b	0,52 ^b	0,22	0,20	1,00	
TOC	0,23	0,91 ^b	0,40 ^b	0,27 ^a	-0,09	0,50 ^b	-0,33 ^a	0,44 ^b	0,56 ^b	0,50 ^b	0,46 ^b	0,41 ^b	0,97 ^b	1,00

^a Correlation is significant at the 0,05 level (2-tailed)
^b Correlation is significant at the 0,01 level (2-tailed)

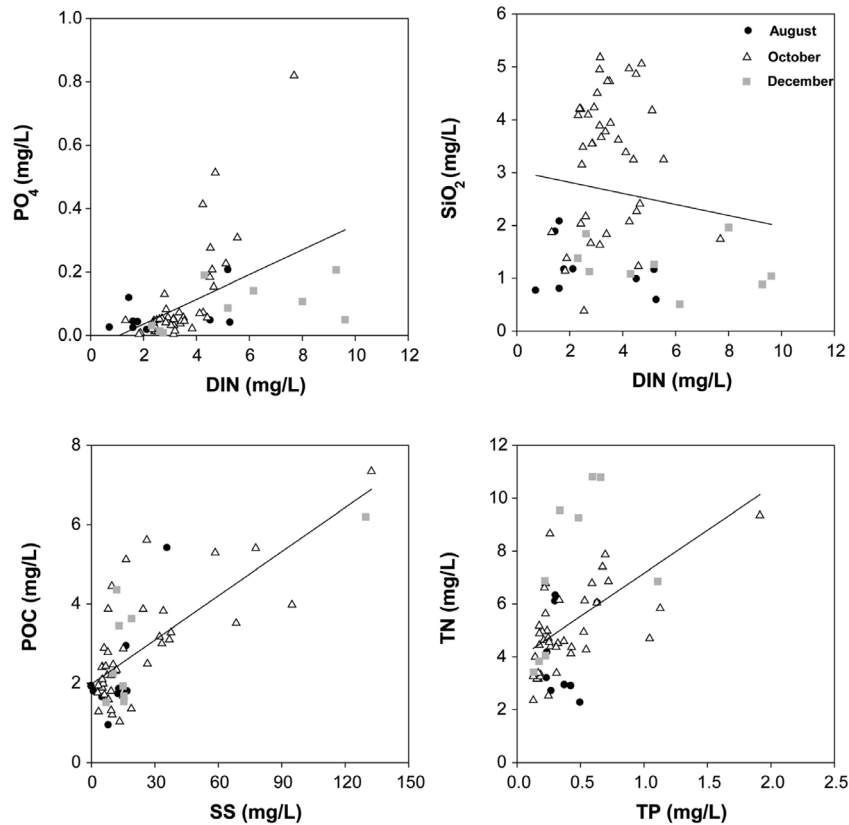


Fig. 5. Relationship between pollutants in stream water from 9 streams of Shihwa Lake.

67%에 비해 약 10% 정도 낮은 것으로 나타났으며 총 COD 및 용존상태의 COD의 농도 역시 산업지역에 비해 약 1/3 수준으로 나타났다. 또한 강우시 반월산단 토구를 통해 유출되는 총 COD의 절반 정도가 용존상태의 COD인 것으로 보고된 바 있다.⁷⁾ 아질산염, 질산염 및 암모니아염의 농도를 합한 용존무기질소(DIN)와 인산염간에는 통계학적으로 유의한 상관성($r=0.51, p<0.01$)을 보였으나 용존무기질소와

규산염간에는 상관성이 없는 것으로 나타나 용존무기질소와 인산염은 같은 오염원을 통해 하천으로 유출되나 규산염은 다른 특징을 가지고 유출되는 것을 시사하고 있다. 총 인과 총질소간에서 양(+)의 유의한 상관성($r=0.51, p<0.01$)을 보이고 있었다. Fig. 6은 COD와 암모니아염, 규산염, 총질소, 총인, 부유물질, 용존유기탄소와의 상관성을 나타내고 있다. COD와 규산염은 음(-)의 좋은 상관성($r=-0.44,$

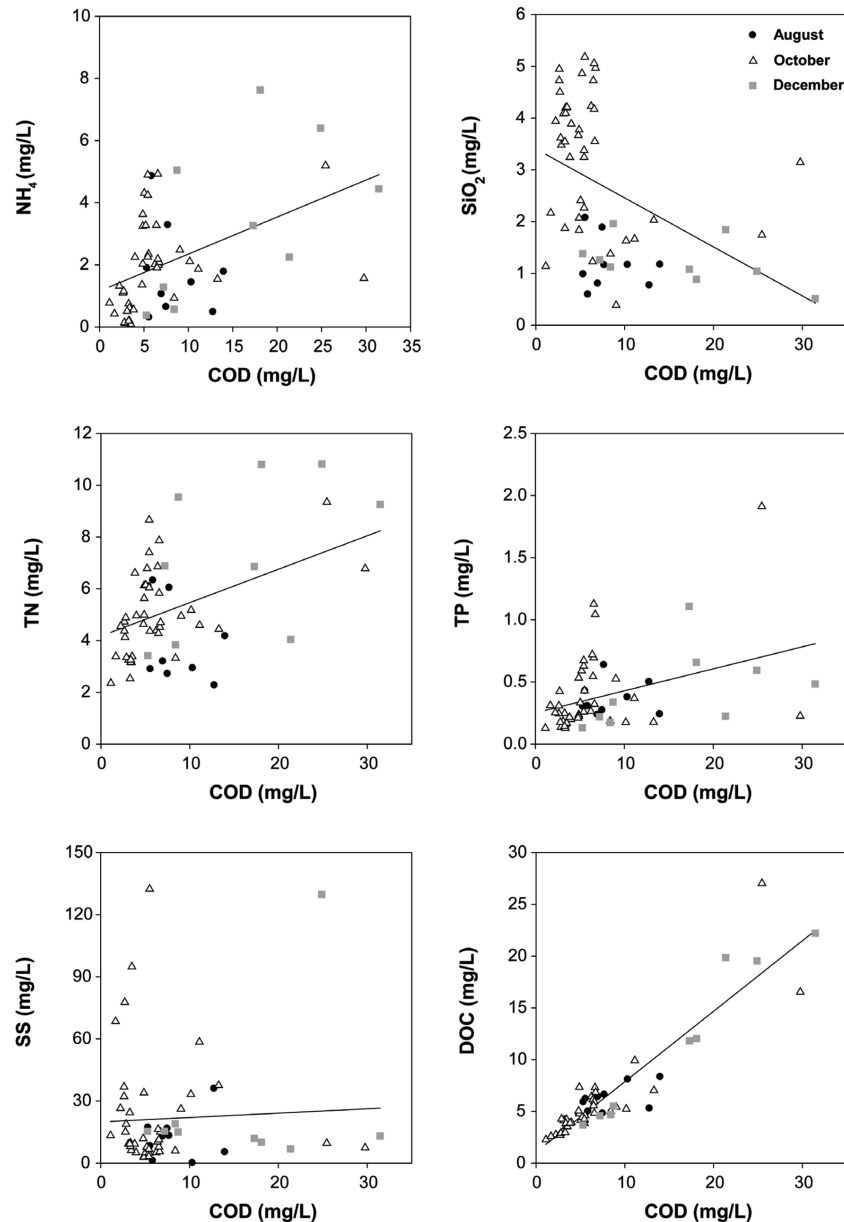


Fig. 6. Relationship between COD and other pollutants in stream water of 9 streams of Shihwa Lake.

$p < 0.01$)을 나타냈으나 부유물질을 제외한 항목과 양(+)의 좋은 상관성을 나타내는 것으로 나타났다. 하천수 내 용존 영양염 및 수질환경기준 항목인 COD, 총질소, 총인과의 양호한 상관성은 대부분의 오염물질이 비강우시 같은 기원을 가지고 유출되고 있음을 설명하고 있다.

시화호 표층수에서 염분은 용존영양염과 양호한 음의 상관성을 가지며 담수기원의 영양염 공급에 기인한 식물플랑크톤의 대증식의 결과로 2010년 시화호 표층수 내 COD, POC, 총질소 및 총인의 평균농도가 예년에 비해 증가된 것으로 보고된 바 있다.¹⁰⁾ 시화호 유역 하천수 내 오염물질의 농도는 시화호 표층수의 평균농도의 비해 인산염은 7.7배, 질산염은 25.6배, 암모니아염은 37.2배, 규산염은 5.3배, 총인 3.2배, 총질소 6.7배 높은 것으로 나타나¹⁰⁾ 시화호 표층수 내 오염물질의 주요한 공급원은 하천을 통한 유입

을 알 수 있었다(Table 2). 시화호 내측에서의 COD, 총인 및 총질소의 농도가 시화호 외측에 비해 높은 것 하천을 통해 공급된 용존영양염을 이용한 식물플랑크톤의 대량번식에 기인한 것으로 사료된다. 본 연구를 통해 하천수에서는 용존유기질소와 입자성유기질소의 농도 및 총질소 내 이들 화합물이 차지하는 비율은 낮았으나 시화호 표층수의 경우 용존무기질소의 농도가 급격히 감소하였고 용존유기질소와 입자성유기질소가 차지하는 비율이 급격히 증가하였으며 농도 역시 하천에 비해 높은 것을 통해 시화호 수질악화의 주요한 원인은 하천을 통한 용존영양염의 공급에 의한 부영양화임을 확인하였다. 강우시 반월산단 토구를 통한 비점오염물질의 유출량은 총강우량에 따라 차이는 있으나 2010년 7월 30시간 동안(167 mm 강우량) 부유물질 187,536 kg, 화학적 산소요구량 17,118 kg, 총인 322 kg, 총

질소 13,519 kg이었다.⁷⁾ 본 연구에서는 각 하천에 대한 유량자료는 조사시기에 따른 차이가 크며 하천폭 및 수심이 불규칙하여 측정의 어려움으로 인하여 비강우시 하천을 통한 비점오염물질의 총 유출량을 정확히 산출하지 못하였으나, 반월산단의 유역면적(10.22 km²)에 비해 약 2.8배 큰 시화산단의 전체 유역면적(28.23 km²)을 고려할 때 시화산단을 통해 강우시 막대한 양의 오염물질이 시화호로 유출되는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 시화호 수질의 악화시키는 주요한 요인은 강우 혹은 비강우시 하천을 통한 오염물질의 유입이 주요한 원인임을 알 수 있었으며, 본 연구에서 조사가 되지 않은 남측간석지 등 시화호 전체 소유역의 면적을 고려할 때 하천 혹은 지표면을 통해 시화호로 유출되는 오염물질의 심각성을 알 수 있었다. 따라서 시화호 유역의 광범위한 전체 소유역에 대한 강우 혹은 비강우시 지속적인 모니터링을 통한 다양한 기초자료의 획득이 무엇보다 중요할 것으로 판단되며 이러한 기초자료는 시화호 연안오염총량관리제 시행에 필요한 오염원 파악, 유출량 및 삭감량 평가에 매우 유용한 정보를 제공할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 연안오염총량관리제 도입시 시화호 유역의 오염부하량 산정과 오염물질 삭감계획 수립을 위한 기초자료를 제공할 목적으로 시화호 유입하천에 대한 수질오염물질의 농도현황 및 특성은 다음과 같다. 12월의 조사결과가 8월과 10월에 비해 모든 항목에서 높은 농도가 검출되었으며 강우에 의한 영향으로 나타났다. 시화호 유역 하천을 토지이용에 따라 산업지역, 도시지역 및 농업지역으로 구분한 결과, 산업지역에서의 COD, 총인 및 용존영양염의 농도가 다른 지역에 비해 높은 것으로 나타났으며, 총질소의 경우 비료 사용으로 인하여 농업지역 역시 높은 농도를 나타냈다. 조사시기 및 지역에 따라 차이는 있으나 인산염은 총인의 약 21%를 차지하고 있으며 총질소의 대부분은 암모니아염, 질산염 및 용존유기질소가 차지하는 것을 알 수 있었다. 조사를 실시한 하천수 내 오염물질의 농도는 시화호 표층수보다 높은 값을 나타내 시화호로 유출되는 오염물질의 대부분이 하천을 통한 비점오염의 형태인 것으로 나타났다. 특히 산업단지 내 하천에서의 오염물질 농도의 공간적 특성은 하수나 폐수 일부가 관로 오점 또는 무단 방류로 인하여 처리되지 않고 직접 하천을 통해 시화

호로 유입되고 있음을 시사하며 산업단지 내 하천을 통해 유출되는 하천수에 대해서도 환경기초시설을 통한 처리가 시급한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 일반수질 오염물질만 분석을 실시하였으나 대규모의 시화산단 및 반월산단을 통해 강우시와 비강우시 중금속 또는 지속성 유기오염물질의 배출을 고려할 때 다양한 비점오염물질의 정확한 기원을 파악하여 강력한 규제를 통해 오염물질의 발생을 근본적으로 삭감해야 할 것이다. 본 연구결과는 앞으로 시행 예정인 시화호 연안오염총량관리제의 기본계획 및 시행계획 수립시 오염부하량 산정과 삭감계획 수립에 정책적으로 중요한 과학적인 기초자료를 제공하고 있으며 시화호 유역하천에 대한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

KSEE

참고문헌

1. 김경태, 이수형, 김은수, 조성록, 박청길, “시화호와 주변 하천 표층수 중의 중금속 거동 특성,” 한국해양환경공학회지, **5**(1), 51~67(2002).
2. 김경태, 김은수, 조성록, 박준건, 박청길, “시화호 및 주변 하천 표층 퇴적물의 중금속 분포 변화,” *Ocean and Polar Res.*, **25**(4), 447~457(2003).
3. 국토해양부, “시화호 해양환경 개선사업,” pp. 279(2009).
4. Li, D., Kim, M., Oh, J.-R. and Park, J., “Distribution characteristics of nonylphenols in the artificial Lake Shihwa and surrounding creeks in Korea,” *Chemosphere*, **56**(8), 783~790(2004).
5. 박준건, 김은수, 조성록, 김경태, 신진선, “시화호 수질환경의 연변화 양상,” 한국해양환경공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp. 161~168(2003).
6. 김세원, 최광순, 김동섭, 이미경, “강우시 시화호 농촌 및공단유역의 비점오염물질 유출 특성,” 한국물환경학회지, **25**(5), 768~777(2009).
7. 나공태, 김경태, 김종근, 방재현, 이정무, 김성근, 김은수, 윤민상, 조성록, “시화호 유역 비점오염물질의 유출특성 및 부하량 연구,” 한국해양환경공학회지, **14**(1), 40~50(2011).
8. 국토해양부, “해양환경공정시험기준,” pp. 33~52(2010).
9. Valderrama, J.C., “The simultaneous analysis of total N and P in natural waters,” *Mar. Chem.*, **10**(2), 1009~1022(1981).
10. 국토해양부, “시화호 해양환경 개선사업,” pp. 320~322(2010).