

중·소 도시하천의 물질수지를 통한 수질관리 방안 도출

Water Quality Management Plan through Mass Balance at Small Urban Stream

오종민* / 신동환** / 최이송***

Oh, Jong Min / Shin, Dong Hwan / Choi, I Song

Abstract

In this study, the variation of water quality in Osan stream was investigated through continuous monitoring, and mass balance and metabolism occurred into water body were estimated to set up effective management plan for water quality of small urban stream. From the results of continuous investigation of water quality in Osan stream, the things written as follows must be previously done to improve water quality of main stream. Firstly, it need that effective management plan for tributaries must be set up to improve the water quality in main stream. Secondly, the counter plan for re-eruption of pollutants from sediment in main-stream is required to prevent inner pollution. In this study, we showed that small urban stream can be managed effectively by simple investigation to prevent deterioration of water quality. Therefore continuous monitoring for water quality in stream is important to improve water quality, furthermore matter cycle and mass balance happening in the stream environment must be correctly estimated to make up healthy stream environment.

Key words : Continuous monitoring, Mass balance, Small urban stream, Water quality management

요지

본 연구는 전형적인 도심소재 중·소하천인 오산천 상류를 중심으로 수질변화 현상을 정확히 파악하기 위하여 24시간에 걸친 연속측정을 통해 수질의 변화를 조사하였고, 이러한 결과를 통하여 효율적인 하천관리 방향을 제시하였다. 오산천 수질의 연속조사의 결과로부터, 본류의 수질개선을 위해서는 다음과 같은 일들이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 첫째, 본류 수질개선을 위해서는 유입지류의 효율적인 관리방안이 필요하다. 둘째, 하천 본류의 저질로부터 재용출 되는 오염을 방지하기 위한 대처방안이 필요하다. 본 연구에서는 수질저하를 방지하기 위해 단순한 조사만으로도 중·소하천의 효과적인 관리 방안을 제시했다. 따라서 하천에서의 연속적인 수질 모니터링은 하천수질 개선을 위해 중요하며, 나아가 하천환경에서 일어나는 물질순환 및 물질수지는 건전한 하천조성을 위하여 정확히 평가되어야 한다.

핵심용어 : 연속모니터링, 물질수지, 중·소하천, 수질관리

1. 서론

중·소하천의 주요오염원인 도시하수, 공장폐수, 농업배수 및 비점오염원 등의 오염물질 배출로부터 야기되는 수질오염은 국내에 산재해 있는 도시하천에서 특히 심각한 실정이다. 이들 중·소하천들은 대하천으로 유

입되어지는 지류로서의 역할을 담당하며, 대하천 수질에 직접적인 영향을 미치기 때문에 대하천 본류의 수질개선을 위해서는 이들 중·소하천의 수질개선이 선행될 필요가 있다. 그러나 도시의 중·소하천 관리방안은 현재까지 주로 치수(治水) 중심의 정비가 중심을 이루었으며, 양질의 수질 확보측면은 미비했던 것이 사실

* 정희원, 경희대학교 환경·응용화학부(환경연구센터) 교수
** 경희대학교 환경·응용화학부 대학원생
*** 경희대학교 환경·응용화학부 연구원

이다(오종민 등, 1991).

중·소하천의 수질개선을 위해서는 중·소하천내에서 일어나고 있는 수질변화 현상을 장기적인 모니터링을 통해 정확하게 파악해야 하며, 오염부하량을 산정하고 물질수지를 통한 오염물의 유입·유출을 정확하게 산출하여 적절하게 하천을 관리하는 것이 무엇보다 중요하다. 또한, 필요에 따라서는 오염물질의 부하량을 저감시키기 위하여 하천내 물질환경(물질수지 및 물질대사)을 상세하게 파악할 필요가 있고, 이를 바탕으로 한 포괄적이며, 적절한 수질관리방안이 모색되어야 할 것으로 생각된다(홍일 등, 2003).

따라서 본 연구에서는 전형적 도심소재 중·소하천인 오산천 상류를 중심으로 수질변화 현상을 정확히 파악하기 위하여 24시간에 걸친 연속측정을 통하여 수질을 현장에서 조사하였고, 이를 바탕으로 오염물질들의 물질수지를 파악하여 하천내에서 일어나고 있는 오염물의 거동에 대한 해석을 시도하였다. 또한, 이를 토대로 효율적인 하천관리 방향을 제시함으로써 날로 악화되어 가고 있는 도시 중·소하천의 수질개선에 일조하고자 하였다.

2. 연구지역 및 조사방법

2.1 연구지역

조사구간은 전형적 도심하천의 특성을 가지고 있는 오산천의 상류였으며, 오산천은 행정구역상 경기도 용인시 기흥읍과 화성시 동탄면 등 1도, 2시, 1읍, 1면을 포함하고 있다. 본 조사구간인 오산천 상류의 유역 면적은 18.01 km²로서, 오산천 전체 유역면적의 11.8%를 점유하고 있으며, 유역의 유로 연장은 2.65 km로서 오산천 전체 구간의 9.0%를 차지하고 있다. 경·위도상의 위치는 동경 127°09'36"~127°04'36", 북위 37°13'57"~37°11'32"이다. 하상골개 분포상태는 본류의 경우 전체적으로 자갈과 모래로 구성되어 있으며, 지류(支流)는 모래와 함께 굵은 자갈이 많이 포함되어 있었다. 본 조사구간의 토지이용을 보면, 일부 공장을 제외하고는 주로 농업용지로 이용되고 있었으며, 본 구간의 상류에는 삼성전자 및 미래유통 등 중, 소규모의 공장들이 산재하고 있었다. 중류와 하류의 대부분은 농업용지와 산으로 이루어져 있으며 소규모의 주택단지와 음식점들이 산재하고 있었다.

2.2 시료 채취 및 실험방법

본 연구조사의 연속 모니터링은 2001년 5월 11일 10시부터 12일 10시까지 3시간 간격으로 9회에 걸쳐 실시되었다. 총 조사지점은 6개 지점으로, 본류 3지점, 지류 3지점으로 구분하여 시료를 채취하였으며, 이들에

대한 자세한 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 채취된 시료는 외부의 영향을 받지 않도록 밀폐된 용기로 운반하여 실험을 실시하였다.

현장에서는 수온, pH, EC, DO 및 유량을 측정하였고, 채취된 시료는 실험실에서 신속히 분석하였으며, 장시간에 걸쳐 분석을 요하는 항목은 전처리를 행한 후 분석 전까지 4℃ 이하로 냉장 보관하였다.

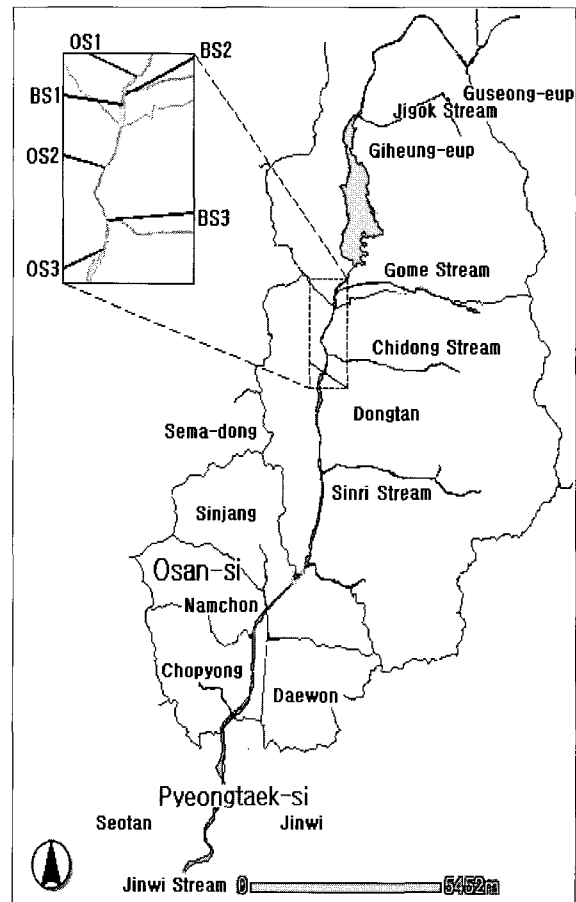


Fig. 1. Sampling Sites in Osan Stream Map (OS1 : Nongseo Bridge, OS2 : Weir of Seoku, OS3 : Seoku Bridge, BS1 : Nongseo Stream, BS2 : Gome Stream, BS3 : Chidong Stream).

유량은 유속단면적법을 이용하여 측정하였고, 수질 측정을 위하여 채취된 시료의 분석항목은 SS, BOD, T-N, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, Cl⁻였으며, 모두 수질공정시험법에 준하여 분석하였다.

물질수지의 작성은 유량과 농도로부터 계산된 부하량을 이용하여 유입과 유출을 비교하였으며, 특히 보존적 특성을 나타내는 Cl⁻를 분석하여, 유량과의 비교를 통해 복류 및 용출되는 물의 거동과 그 외에도 조사구간 내에서의 거동 특성을 살펴보았다.

실험기간 동안 수집된 자료는 통계용 전산 프로그램인 SPSS for windows 10.0을 이용하여 상관관계를 분석하고, 오염물의 거동특성을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질변화

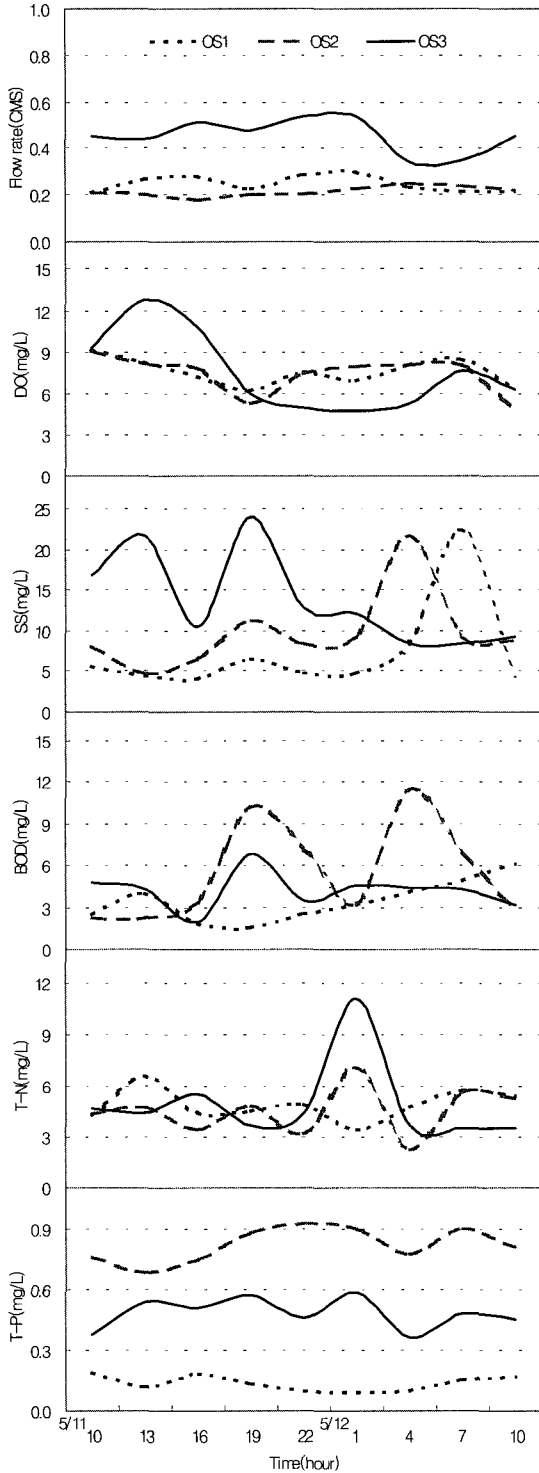


Fig. 2. Variation of Flow Rate and Pollutants Concentration at OS1~OS3.

오산천에서 연속측정에 따른 수질변화를 Fig. 2에 나타내었다. 오산천에서 유량은 OS3(0.455 m³/sec)>OS1(0.248 m³/sec)>OS2(0.212 m³/sec) 순으로 나타났으며, OS2 지점에서 2개(BS1, BS2)의 지류가 유입됨에도 불구하고 유량이 감소한 것은 OS2 지점에서 복류가 일어나고 있기 때문인 것으로 판단되었다. SS 농도 범위는 4.0~24.0 mg/L로 조사되어 변동 폭이 크게 났으며, BOD 농도는 19시와 새벽 4시에 첨두농도(尖頭濃度)를 보였다. 또한, T-N 농도는 새벽 1시에 OS3 지점에서 11.1 mg/L로 최고농도를 나타냈다. T-P의 경우, OS2 (0.819 mg/L)>OS3(0.482 mg/L)>OS1(0.136 mg/L)의 순으로 나타났다. 이는 Table 1에 나타낸 지류들의 수질농도에 나타난 것처럼 OS2 지점으로 유입되는 지류 BS1(2.3 mg/L)의 영향으로 판단된다.

Table 1. Average Concentration of Pollutants in Tributaries(Unit: mg/L).

	SS	BOD	T-N	T-P
BS1	5.4	3.9	19.8	2.3
BS2	27.1	7.9	9.1	0.7
BS3	24.2	4.1	5.3	0.2

일반적으로 국내에 산재되어 있는 중·소하천들의 관리는 본류에 대한 수질 개선에 중점을 두고 있지만, 오산천 상류의 경우, 본류로 유입되고 있는 지류의 관리가 원활히 이루어진다면 본류의 수질개선에 큰 효과가 있을 것으로 판단된다. 특히 지류인 BS1에 다량의 하수가 유입되고 있는 것으로 조사되어, 하수의 차집관거로 분리하여 별도로 처리할 수 있는 방안이, 필요할 것으로 판단된다.

3.2 물질수지

오산천 OS1~OS2 지점과 OS2~OS3 지점 사이의 물질수지를 비교·분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. OS1~OS2 구간에서의 총 유입량은 24,629 m³/day였으며, OS2 지점에서 유출되는 양은 총 18,356 m³/day인 것으로 나타났다. OS2~OS3 지점에서는 유입량이 총 27,515 m³/day이며, OS3 지점에서 총 39,342 m³/day이 유출되었다. OS1~OS2 지점 사이에서 유량수지의 Input에 대한 Output의 비(O/I)는 0.75로 약 25%의 유량이 복류, 증발 등에 의하여 없어진 것으로 추정된다. 또한, CI(0.77)와 물(水)은 비슷한 수치를 나타내어 서로 보존적 움직임을 보이는 것으로 나타났다. OS2~OS3 지점 사이는 유량지수인 O/I가 1.43으로 나

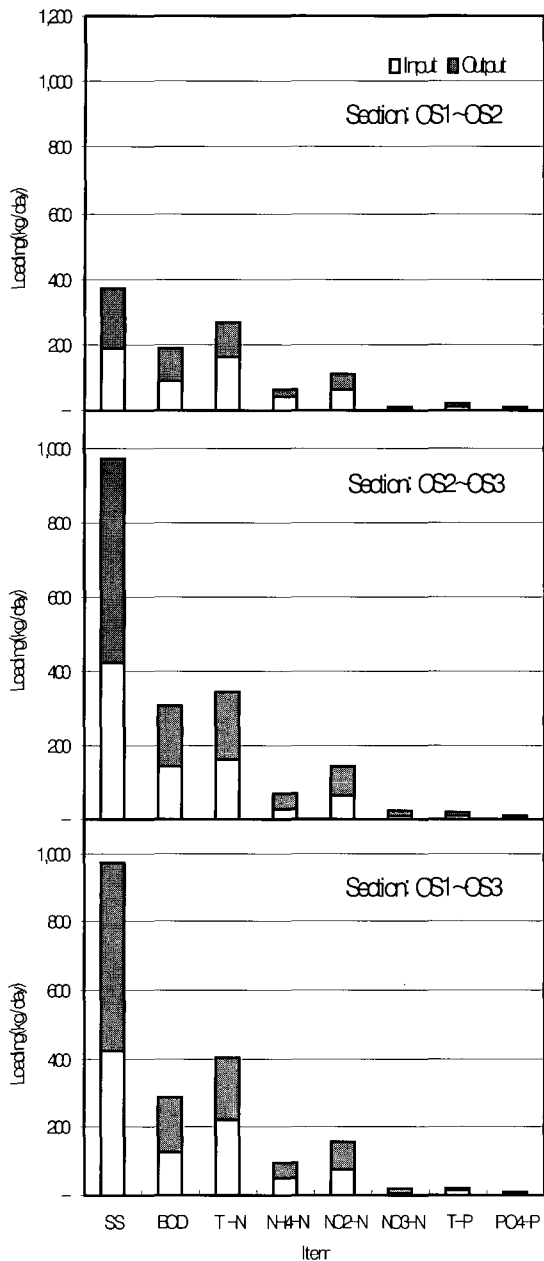


Fig. 3. Mass Balances of Pollutants between OS1~OS2 and OS2~OS3 (OS1~OS2 : Input(OS1+BS1+BS2), Output(OS2), OS 2~OS3 : Input(OS2+BS3), Output (OS3)).

타나 유량이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 OS1~OS2 지점에서 복류된 물이 OS2~OS3 지점에서 용출 및 지하수로서 유입된 결과인 것으로 판단된다.

OS1~OS2 사이에서 질소성분의 O/I는 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 각각 0.42, 1.50, 0.81인 것으로 나타났으며, T-N에 있어서는 0.62인 것으로 나타나 전체적으로 약 38%가 감소한 것으로 조사되었다. 이와 같이 총질소량이 큰 폭으로 감소한 것은 하류로 유하하면서,

유량의 감소영향(26%)이 작용했다는 점을 감안하더라도, 오산천 내에서 자정작용이 활발하게 일어나고 있음을 보여준다. 또한 OS2~OS3 구간에서 오염물들의 부하량이 증가하는 현상은 OS1~OS2 구간에서 복류된 유량이 용출되면서 유량이 증가하였기 때문으로 판단된다.

오산천 조사구간(OS1~OS3) 내에서 물질수지를 종합하여 살펴보면, 먼저 유량은 상류 OS1 지점과 지천에 의한 Input 량이 $33,789 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 나타났으며, 하류 OS3 지점에서는 Output 량이 $39,342 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산되었다. 이 중 상류인 OS1 지점에서 유입된 총 유량은 $21,457 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 전체 유입량 중 68.7%를 차지하였다. 또한, BS1과 BS2 유량 기여도는 17.3%로 계산되었으며, BS3를 포함한 전체 지류에 대한 유량기여도는 31.3%로 계산되었다. 지류의 각 오염물에 대한 기여도를 살펴보면, SS, BOD, T-N은 각각 50.3%, 33.0%, 57.6%로 조사되어 유량이 상대적으로 적은 반면 유입 부하는 큰 것으로 나타났다.

또한, BOD 부하량과 SS 부하량이 유량의 증가량보다 높았던 것(O/I 비: 각각 1.31, 1.29)은 하천에 존재하는 부작용의 탈리나 퇴적물의 용출 등 하천 내부에서의 오염물질이 발생하였기 때문으로 판단된다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 O/I가 0.87인데 반하여, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 O/I가 1.05인 것으로 나타나 전체구간에서의 질소형태는 미약하나마 질산화작용을 받고 있는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 종합할 때, 오산천은 본 조사구간에 한하여 지류의 오염물 유입에 따른 본류의 수질오염현상이 가중되고 있는 것으로 판단된다. 또한, 오산천 내부의 하상퇴적물로부터의 오염물의 탈리 및 용출에 의하여 수질오염현상이 심화되고 있는 것으로 판단된다.

따라서 이러한 조사내용을 바탕으로 OS1~OS3 구간에서의 수질오염을 저감하기 위해서는, 첫째로 본류로 유입되는 지류에 대한 오염도를 저감시키기 위해서 지류에 대한 효율적인 관리 방안이 설정되어야 한다. 즉 지류가 본류에 합류되기 앞서 간단한 자연정화 처리방법의 도입 및 하수 차집관거로 유도하여 처리 후 배출하는 등의 방법을 도입함으로써 오염부하량을 줄이는 방안 등이 그 예라 할 수 있다.

둘째로, 본류에서 저니질로부터의 재용출을 방지할 수 있고, 하상에서의 산화분해 작용을 촉진시킬 수 있는 하상재료의 인위적 교체 및 하천 내의 자정작용을 극대화하여 유하(流下) 중에 제거될 수 있도록 유도하는 방법을 들 수 있다.

셋째로, 하천에서 일어나고 있는 수질변화를 정확히 예측 평가할 수 있도록 장기적이며, 지속적인 모니

터링을 통한 정확한 데이터를 확충하고, 수체 내에서 일어나는 물질순환을 파악하는 것은 도시 중·소하천 관리에 있어 매우 중요한 것이다.

3.3 상관분석

상관분석은 두변수 사이의 관계정도를 추정하고, 표현하려는 분석방법이다. 본문에서는 데이터의 주요한 판단요소로 상관계수(r)와 유의수준(α), 그리고 p-값을 채택하였다. 여기서 상관계수(r)은 표본집단에 대한 상관계수를 나타내며, p-값은 상관분석에 있어서의 귀무가설, 즉 '두 변수 사이에는 어떠한 상관성도 없다'라는 가설을 기각하는데 범할 수 있는 오류이다. 일반적으로 p-값이 유의수준 1% 내에 있으면, 높은 상관관계가 있다는 것을 의미하며, 유의수준 5%보다 클 경우는 상관관계가 성립되지 않는다고 판단한다. p-값은 상관계수와 자료의 개수와의 관계식으로 표현되며, p-값이 1% 혹은 5%일 때의 상관계수와 두 변수 사이의 상관계수를 비교하여 유의성을 검증하기도 하는데, 본 연구에서는 유의수준 1%와 5%를 기준으로 하여 상관관계 분석을 시도하였다(전지홍 등, 2001).

Table 2는 각 오염물 농도간의 상관관계 분석결과를

나타내었다. 수온과 DO 사이에서 비교적 높은 양(+의 상관관계($r=0.605$, $p<0.01$))를 보였으며, 유량과 상관관계는 pH($r=-0.735$, $p<0.01$), SS ($r=0.399$, $p<0.05$), PO₄-P($r=-0.651$, $p<0.01$)로 나타나 유량의 유출시 현탁물의 유출이 발생하나, 이온성 물질은 감소하는 음(-)의 상관성으로 나타나, 앞에서 조사된 물질수지에서 유량의 증가에 따라 PO₄-P가 감소되는 경향을 보였다. 오염물질의 유출과 동시에 나타나는 SS와 BOD도 양(+의 상관관계($r=0.495$, $p<0.01$))가 높게 나타났다. 반면, 유량과 pH($r=-0.735$, $p<0.01$), T-P($r=-0.572$, $p<0.01$), PO₄-P($r=-0.651$, $p<0.01$)는 높은 음(-)의 상관관계를 보였다.

수질뿐만 아니라 오염부하량의 상관관계를 산정하여 각각의 상관관계를 Table 3에 나타냈다. SS와 BOD($r=0.772$, $p<0.01$), 유량($r=0.772$, $p<0.01$)이 서로 높은 양(+의 상관관계를 보여 이들의 증가와 감소는 동시에 일어나고 있음을 알 수 있었다. T-N의 경우, 무기질소함량과 높은 상관관계로 보이며, Cl⁻와 유량이 매우 높은 상관관계($r=0.987$, $p<0.01$)를 보였다. 앞의 물질수지 결과에서 나타난 것처럼 Cl⁻는 유량과 함께 보전적 움직임을 보이기 때문으로 판단된다.

Table 2. Correlation Coefficient between 15 Variables for Pollutants concentration(n=27).

	Tw	pH	EC	DO	SS	BOD	TN	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P	Cl ⁻	DOC	Flow rate
Tw	1														
pH	.584**	1													
EC	.129	.204	1												
DO	.605**	.461*	.244	1											
SS	.072	-.194	-.064	.199	1										
BOD	.117	-.077	-.250	-.160	.495**	1									
TN	.243	.315	-.250	.207	-.053	.051	1								
NH ₄ -N	.292	.304	-.199	.437*	-.095	-.257	.679**	1							
NO ₂ -N	.293	.291	-.168	-.035	-.264	.013	.526**	.156	1						
NO ₃ -N	.026	-.214	-.056	-.103	.397*	.604**	-.127	-.313	.041	1					
TP	.120	.395*	.086	-.071	-.266	.346	.246	-.145	.423*	.359	1				
PO ₄ -P	-.074	.263	-.018	-.167	-.286	.331	.183	.019	.234	.323	.714**	1			
Cl ⁻	.135	-.314	.267	.032	.365	.139	-.050	-.278	-.049	.552**	.091	-.243	1		
DOC	.140	.270	-.103	.009	-.154	.142	.471*	.268	.446*	-.088	.120	.189	-.217	1	
Flow rate	-.107	-.735**	-.059	-.016	.399*	-.099	-.165	-.053	-.299	.056	-.572**	-.651**	.507**	-.323	1

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Table 3. Correlation Coefficient between 11 Variables for Pollutants Loading(n=27).

	DO	SS	BOD	TN	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P	Cl ⁻	Flow rate
DO	1										
SS	.673**	1									
BOD	.308	.772**	1								
TN	.545**	.501**	.285	1							
NH ₄ -N	.657**	.433*	.085	.743**	1						
NO ₂ -N	.582**	.770**	.727**	.362	.216	1					
NO ₃ -N	.420*	.381	.288	.662**	.270	.361	1				
TP	.270	.096	.181	.379	.020	.426*	.355	1			
PO ₄ -P	-.267	-.132	.166	.047	-.071	.177	-.190	.463*	1		
Cl ⁻	.738**	.767**	.553**	.600**	.414*	.842**	.574**	.468*	-.007	1	
Flow rate	.744**	.772**	.557**	.591**	.431*	.801**	.600**	.402*	-.053	.987**	1

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

4. 결 론

지금까지 간단한 하천조사를 통해 하천내 물질수지를 파악함으로써 다양한 오염 현상을 간접적으로 파악할 수 있었다. 정확한 오염의 현황은 보다 깊이 있는 연구가 필요하지만, 이처럼 간단한 물질수지 작성만으로도 해당 하천에 대한 많은 오염 정보를 파악할 수 있으며, 이를 바탕으로 다양한 하천관리 방안이 마련될 수 있다.

또한 지금까지 조사되어 작성된 물질수지를 보완하기 위해서는 하천의 부착물 및 퇴적물에 대한 사항과 계절에 따른 물질수지 작성에 관한 추가 연구가 필요하며 이들에 대한 종합적 검토를 통하여 날로 수질오염이 심화되고 있는 우리나라 중·소하천수질의 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 감사의 글

본 연구는 경희대학교 2004년도 교내 학술연구비의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 오종민(1991), Hiroshi Ogawa, Norio Ogura, 도시중·소하천의 측정과 평가법의 연구, **한국지구화학회지**, 제12권, 제3호, pp. 206~216.
- 전지홍, 윤춘경, 함종화(2001), 비도시 유역에서 수질오염물질사이의 상관관계 분석, **한국육수학회지**, 제34권, 제3호, pp. 215~222.
- 홍 일, 최이송, 오종민(2003), 전형적 도시하천의 특성을 가진 오산천의 물질수지 및 자정능력 규명, **한국물환경학회지**, 제19권, 제3호, pp. 339~348.