

## 경험식과 요인분석을 통한 오염물질 유출 특성 연구 - 남한강 상·하류 수계 주요 하천을 중심으로

박지형<sup>†</sup> · 손수민 · 류덕희

국립환경과학원 한강물환경연구소

### A Study on the Discharged Characteristics of the Pollutants using the Empirical Equation and Factor Analysis - Case Study of the Upper and Lower Watershed of South Han River

Ji Hyoung Park<sup>†</sup> · Su Min Sohn · Doug Hee Rhew

Han River Environment Research Center, National Institute of Environment Research  
(Received 30 September 2011, Revised 5 November 2011, Accepted 7 November 2011)

#### Abstract

This study was conducted to characterize the discharge feature of pollutant load from the upper and lower watershed influencing on the water quality of South Han River using the empirical equation and Factor Analysis. The results of regression analysis between flow rate and pollutant load were as follows. In the streams of the upper watershed of South Han river, BOD<sub>5</sub> and COD<sub>Mn</sub> were increased as the flow rate was increased. Also, steep increases in SS and TP were observed with positive correlation with the flow rate while change in TN was slightly shown. On the other hand, in the streams of the lower watershed of South Han river, BOD<sub>5</sub> was negatively correlated with the flow rate, being decreased with the increase in the flow rate. However, changes in COD<sub>Mn</sub>, TN, SS, and TP showed a similar trend with those observed in the upper watershed. With Factor Analysis of the water quality and various components, it was appeared that the flow rate, SS, and TP were significantly correlated each other and they were indicated as the principal component influencing on water quality in the streams of the upper watershed. In contrast, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, and TOC were significantly correlated each other and they were included as the principal pollution component of the streams in the lower watershed. From these results, it was conclusive that the upper watershed of South Han River was mainly affected by non point source pollutants while the lower watershed was influenced by point source pollutants from the developed areas.

**keywords** : Factor analysis, Non point source pollutants, Point source pollutants, South Han River

## 1. 서론

하천 수질은 유입 지류·지천 유역으로부터의 오염부하, 하천의 수리 수문학적 특성, 하상퇴적물의 오염상태, 수체 내 생물학적 물질대사, 계절적 요인 등이 상호 작용하여 결정되기 때문에 수질의 정확한 변화 특성 파악 및 그 평가를 내리는데 어려움이 있으며, 또한 이러한 수질은 시·공간적으로 변동하는 특성을 가진다. 그러나 현재 선행되어 온 대부분의 연구에서는 이러한 복잡하고 다양한 정보에 대하여 주관적인 오염 평가와 산술적인 수질 해석으로 인하여 여러 수질오염원이 존재함에도 불구하고 정확한 논리에 의해 접근하지 못하고 연구자의 주관과 경험에 의지해 해석되고 일반화하는 경우가 대부분이었다(김미아 등, 2007).

따라서, 하천의 효율적이고 체계적인 수질 관리를 위해서는 장기적이고 체계적인 조사와 아울러 수역의 수질에 영

향을 미치는 환경적 변수의 정확한 도출 및 상호영향의 평가가 우선되어야 한다. 이와 같은 접근 방법의 하나로 장기간의 수질과 유출량, 오염부하량 간의 상관관계를 분석하여 규명하고, 또한 수질오염 요인의 종합적인 평가수단으로 활용하고자 다변량 해석방법의 하나인 요인분석을 이용해 수질인자들과의 상관성 해석과 수질변동의 영향인자 파악이 필요하다(박지형, 2007).

이와 관련한 국내·외 연구들로는 최한규 등(2002)이 유출량과 오염부하량간의 상관관계식을 이용하여 소양호 상류유역을 대상으로 오염물질 유출특성에 따른 수질변화를 파악하였으며, Colston (1974)은 도시지역의 여러 토지이용별 소유역에 대해 강우시 유출량 및 수질을 회귀분석하여 상관관계식을 제안하였고, Ying (2005)은 주성분분석과 요인분석을 통해 지표수 수질측정지점의 수질 평가에 이용하였으며, Ohta 등(1986)은 일본의 三河灣에서 주성분분석을 이용하여 해역의 수질특성을 파악하고 적조 발생인자를 도출하는 연구를 한 바 있다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jpark01@korea.kr

한편, 남한강은 한강의 발원지로, 태백시 창죽동 김룡소에서 발원하여 송천, 오대천 등과 합류하여 남서쪽으로 흐르다 평창강과 다시 합류하며, 충주호에서 북서쪽으로 흘러들면서 달천, 섬강, 청미천, 양화천, 복하천, 흑천 등의 주요 지류들과 합류하여 유역을 형성하며, 우리나라 최대 상수원인 팔당호로 유입된다.

남한강 유역면적은 12,355 km<sup>2</sup>로 팔당호 유역면적 23,618 km<sup>2</sup>의 52.3%이며, 팔당호로의 유입 유량은 57.0%로 북한강 40.5%, 경안천 2.5%에 비해 유량이 많고, BOD<sub>5</sub> 오염부하량은 62%를 상회하고 있어 팔당호의 수질에 가장 큰 영향을 미친다(공동수 등, 2006a; 박지형 등, 2008). 또한 공동수 등(2006b)에 의하면 수질모델을 통한 분석 결과, 수도권 상수원으로 이용 중인 팔당호의 봄철 저수기 수질 악화는 남한강 유입수질이 같은 시기에 급하게 상승하는데 기인한다고 밝힌 바도 있다.

남한강 유역은 충주댐을 기점으로 상류는 대부분 농촌 지역으로 고랭지밭 등 주로 농경지에서 발생하는 비점오염원이 주를 이루며, 남한강 하류는 충주시, 원주시, 이천시 등 도시화의 진행으로 도시지역 점오염원 등 다양한 오염원이 존재하여 충주댐 이하에서 수질이 급격히 높아지는 특성을 보이고 있다(박지형 등, 2008).

따라서, 본 연구에서는 팔당호 수질에 가장 큰 영향을 미치는 남한강 수계를 대상으로 남한강 상·하류 수계 주요 유입하천의 유출량 변화에 따른 수질변동 특성을 경험식을 통해 분석하고, 아울러 수질변동에 영향을 주는 요인을 요인분석(Factor Analysis)을 통해 파악하여, 이들 상호 결과를 가지고 각 수계별로 수질에 미치는 주요 영향 요인을 객관화하여 고찰하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상지역, 조사 시기 및 방법

본 연구의 대상지역은 남한강 상류 수계인 골지천, 옥동천, 평창강과 하류 수계인 청미천, 복하천, 흑천 등 총 6개 주요 하천 수계를 대상으로 하였다. 수질 및 유량 조사 시기는 2007년 1월부터 2010년 12월까지 4년간 연중 평균 8일 간격으로 조사 지점별로 평균 95회 조사하였으며, 조사 지점은 상기 6개 하천 유역 출구지점에서 수질 및 유량을 동시 조사하였다(Fig. 1). 조사항목은 유량, 수온, pH, EC, DO, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, SS, TN, TP, TOC이다. 분석 항목 중 현장측정 항목인 수온, EC, pH, DO는 YSI 600 XLM 기기를 사용하여 현장에서 직접 측정하였으며, BOD<sub>5</sub> 등 수질 항목은 수질오염공정시험방법에 따라 분석하였다. 유량조사는 ISO 2425의 단일측정방법 중 유속·면적법(velocity-area method)을 따랐다.

### 2.2. 적용 경험식 및 요인분석 방법

박지형(2007)은 유량변동에 따른 수질 농도 변화를 예측하기 위하여 하천유량(Q)과 수질농도(C) 및 오염부하량(L)과 수질농도(C)와의 회귀분석 결과, 두가지 모두 결정계수



Fig. 1. Water quality & flow rate measuring sites on the watersheds.

가 낮아 이들 변수와의 직접적인 관계를 가지고는 수질변화에 대한 설명력이 떨어진다고 하였다. 이와 같은 원인은 동일 유량이라도 유출량이 상승기일 때와 하강기일 때의 수질 농도 조건이 달라 hydrograph와 pollutograph 형태가 일치하지 않은데서 찾을 수 있으며, 또한 오염부하량의 증가가 직접적인 수질농도의 증가를 의미하는 것이 아니기 때문으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 오염물질 유출특성에 따른 수질 농도 변화를 수식적으로 명확하게 고찰하기 위하여, 유량의존성이 높은 SS 등 몇몇 오염물질을 제외하고는 대체로 상관성이 낮은 하천유량(Q)과 농도(C)와의 관계를, 하천유량(Q)과 오염부하량(L)과의 관계로 변환하여 다음과 같은 경험식에 의해 파악하고자 하였다.

하천유량(Q)과 오염부하량(L)은 경험적으로  $L = a \cdot Q^b$ 의 관계를 가진다. 이를 변환하면  $\frac{L}{Q} = C = a \cdot Q^{(b-1)}$ 가 되며, 여기서 계수 b의 값이 1보다 크면 그 물질의 농도 C는 유량의 증가에 따라 증가하는 양상을 보이며, 계수의 값이 1보다 작으면 감소하는 양상을 보이게 된다(공동수 등, 1992, 2006b; 김종민 등, 1993; 박지형, 2007; 이형진 등, 2007).

요인분석은 다변량 분석법 중 하나로 변수들 간의 상관관계를 이용하여 여러 변수들로 측정된 자료를 소수의 차원으로 묶어서 새로운 변수로 축소하는 기법이다. 즉 상관관계가 높은 변수들이 묶여서 요인을 형성하게 되는 것이다. 이것은 통계 분석상의 경제성을 가져올 뿐만 아니라 연구자가 알지 못했던 변수들 간에 어떤 구조가 존재하는지를 발견할 수 있게 된다(노형진, 2005).

본 연구에서는 SPSS(ver. 17.0 for windows)를 이용하여 요인분석 중의 주성분분석 방법을 이용하였다.

주요인은 추출된 고유값(Eigenvalue) 1 이상을 기준으로 하여 결정하였다. 변수들이 여러 요인에 대하여 비슷한 요인부하량을 나타낼 경우에 변수들이 어느 요인에 속하는지

를 분류하기가 어렵다. 따라서 변수들의 요인부하량이 어느 한 요인에 높게 나타나도록 하기 위해서 요인축을 회전시킨다(서영화와 조순행, 1998). 본 연구에서는 Varimax 방식으로 회전축을 직각이 되도록 회전시켜 변수들의 주요 요인을 판별하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 경험식을 이용한 오염물질 유출특성 분석

각 하천별로 유량(Q)과 오염부하량(L) 인자간의 상관 관계식을 구하여 유량 변화에 따른 오염물질 유출특성을 살펴보고(Table 1, Fig. 2).

충주댐을 기준으로 남한강 수계 상류에 위치한 골지천, 평창강, 옥동천 지점에서의 유기물 부하인 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub> 부하에 대한 유량계수는 옥동천 BOD<sub>5</sub> 부하의 경우를 제외하고는 1을 초과하는 것으로 나타나 유량이 증가할수록 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub> 농도가 증가하는 것으로 나타났고, SS, TP 역시 유량계수가 1을 초과하여 유량이 증가할수록 농도가 상승하는 것으로 분석되었다. 특히 SS는 전 지점이 유량계수가 1.31~1.82로서 유량이 증가하면 부하량이 크게 증가하고 농도가 상승하는 것으로 나타났다. 이로써 오염원이 적은 대부분의 남한강 상류 유입하천 수질은 유입부하가 적어 저수기 수질은 양호하나 유량이 증가하는 강우시 대단위 고령지발 등에서 발생한 탁수 등 비점오염원 부하의 증가로 수질이 악화되는 것으로 볼 수 있다.

TN은 골지천, 평창강 옥동천 지점에서 유량계수가 0.99~1.01로 1 내외를 나타내어 유량 증가시 TN농도가 약간 증감하거나 큰 변화가 없는 것으로 나타나 유량 증가에 따른 뚜렷한 경향은 보이지 않는 것으로 판단된다.

충주댐 하류에 위치한 청미천, 북하천, 흑천은 유기물 부

하인 BOD<sub>5</sub> 부하에 대한 유량계수가 1 미만 값을 보여 유량이 증가할수록 BOD<sub>5</sub> 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 즉 하천에서의 오염물질 유입 증가율보다 하천유량 증가율이 훨씬 크기 때문에 수질농도가 낮아지는 것이다. 이러한 결과는 건기시 고밀도의 점오염원에 의해 높은 농도를 보인다 강우시 비점오염원으로부터의 추가 영향보다 희석에 의한 효과가 현저하게 크기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 즉, 비점오염원보다는 점오염원으로부터의 영향이 더 큼을 시사한다.

반면, COD<sub>Mn</sub> 부하에 대한 유량계수는 1.04~1.13으로 BOD<sub>5</sub>와 다른 유출특성을 보이는 경우는 유량 증가시 생분해성 유기물이 많은 점오염원의 부하율은 감소하는 대신 생분해가 쉽지 않은 비점오염원의 부하율이 상대적으로 커지기 때문인 것으로 판단된다(공동수 등, 2006b).

SS는 유량계수가 평균 1.55로 충주댐 상류 남한강 수계 유입하천의 1.64보다 그 정도는 낮으나, 역시 모든 지점에서 유량이 증가하면 부하량이 크게 증가하고 농도가 상승하는 것으로 나타났다. TP의 경우도 SS와 같이 남한강 충주댐 상류 수계 유입하천 평균 유량계수 1.35보다 낮은 1.15로 낮은 수준이나, 유량이 증가하면 부하량이 증가하고 농도가 상승하는 것으로 해석되었다.

TN은 북하천 지점에서 유량계수가 0.79로 유량증가에 따라 TN농도가 감소하는 것으로, 반면 유량계수가 1.19인 청미천 지점은 유량 증가에 따라 TN농도가 증가하는 것으로 나타났으나, 흑천 지점은 유량계수가 1.01로 유량 증가에 따른 T-N농도 변화는 미미한 수준에서 상승하는 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 종합하여 판단하면, BOD<sub>5</sub> 유기물질 부하의 유량계수 값은 남한강 충주댐 상류는 대체로 1 이상을, 남한강 충주댐 하류는 1 이하를 보여 상·하류 수계 간

**Table 1.** Relation equation between flow rate and the pollutants load at the study sites (Q: CMS, L: ton/d, L<sub>TP</sub> : kg/d)

Watershed		BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Mn</sub>	SS	TN	TP
G.J.	Relation Eq.	L=0.04Q <sup>1.08</sup>	L=0.15Q <sup>1.17</sup>	L=0.04Q <sup>1.82</sup>	L=0.20Q <sup>1.01</sup>	L=0.40Q <sup>1.55</sup>
	R <sup>2</sup>	0.84	0.95	0.87	0.95	0.89
	b	1.08	1.17	1.82	1.01	1.55
Ok.D.	Relation Eq.	L=0.05Q <sup>0.95</sup>	L=0.14Q <sup>1.11</sup>	L=0.08Q <sup>1.31</sup>	L=0.14Q <sup>1.00</sup>	L=1.03Q <sup>1.05</sup>
	R <sup>2</sup>	0.88	0.95	0.85	0.98	0.84
	b	0.95	1.11	1.31	1.00	1.05
P.C.	Relation Eq.	L=0.06Q <sup>1.03</sup>	L=0.15Q <sup>1.15</sup>	L=0.03Q <sup>1.78</sup>	L=0.26Q <sup>0.99</sup>	L=0.37Q <sup>1.46</sup>
	R <sup>2</sup>	0.85	0.95	0.84	0.96	0.87
	b	1.03	1.15	1.78	0.99	1.46
C.M.	Relation Eq.	L=0.20Q <sup>0.93</sup>	L=0.44Q <sup>1.05</sup>	L=0.35Q <sup>1.38</sup>	L=0.20Q <sup>1.19</sup>	L=6.81Q <sup>1.17</sup>
	R <sup>2</sup>	0.72	0.91	0.75	0.91	0.89
	b	0.93	1.05	1.38	1.19	1.17
B.H.	Relation Eq.	L=0.27Q <sup>0.93</sup>	L=0.41Q <sup>1.13</sup>	L=0.33Q <sup>1.82</sup>	L=0.73Q <sup>0.79</sup>	L=16.89Q <sup>1.12</sup>
	R <sup>2</sup>	0.61	0.87	0.73	0.89	0.81
	b	0.93	1.13	1.82	0.79	1.12
H.C.	Relation Eq.	L=0.09Q <sup>0.93</sup>	L=0.25Q <sup>1.04</sup>	L=0.20Q <sup>1.44</sup>	L=0.21Q <sup>1.01</sup>	L=2.07Q <sup>1.15</sup>
	R <sup>2</sup>	0.77	0.91	0.74	0.95	0.79
	b	0.93	1.04	1.44	1.01	1.15

G.J.: Goljicheon, P.C.: Pyeongchanggang, Ok.D.: Okdongcheon, C.M.: Cheongmicheon, B.H.: Bokhacheon, H.C.: Heukcheon

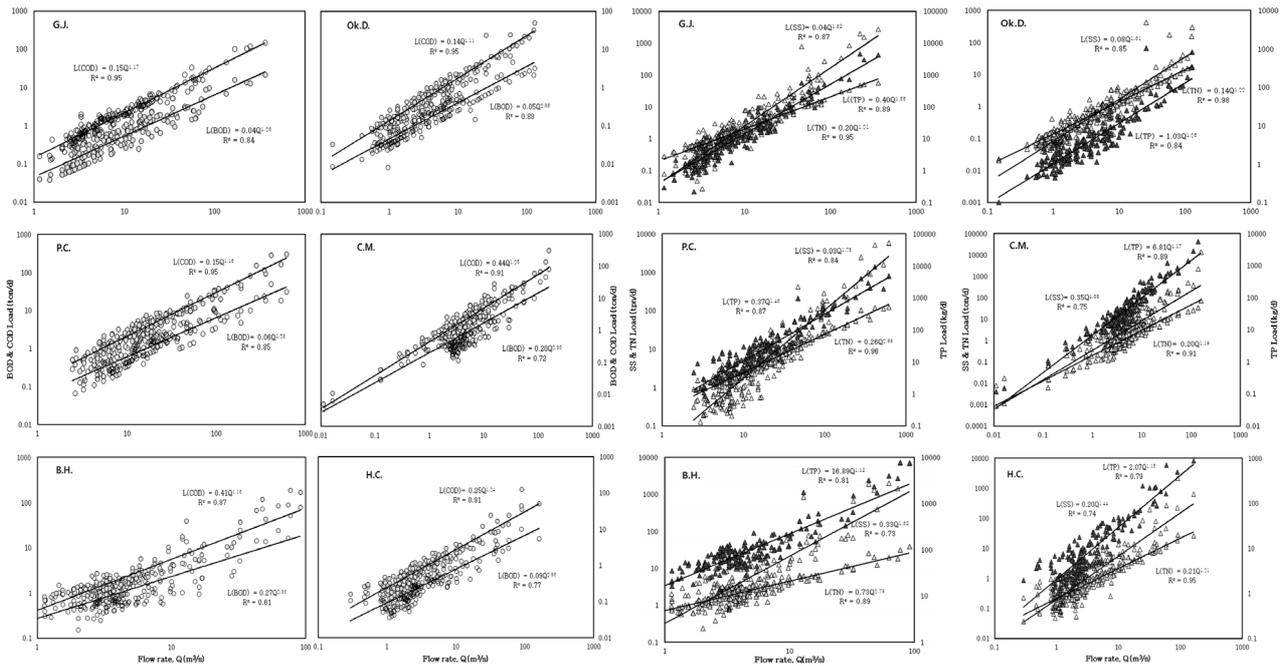


Fig. 2. Correlation between flow rate and pollutants load at the study sites.

뚜렷한 유출특성을 나타내었다. 이는 유역 내 점오염원과 비점오염원의 배출 비율에 따른 것으로 판단되고, 점오염원의 영향을 크게 받는 유입하천은 유량증가에 따른 희석효과로 유량계수가 1 미만으로 나타나며, 비점오염원의 영향을 크게 받는 유입하천은 유량증가에 따른 비점오염원 배출 증가로 유량계수가 1 이상을 나타내었다. 한편 난분해성 오염물질 지표로 대표되는 COD<sub>Mn</sub> 유기물질 부하의 유량계수 값은 남한강 충주댐 상·하류 수계 모두 1 이상을 보여 유량 증가시 COD<sub>Mn</sub> 농도는 증가하는 것으로 나타났으며, 남한강 상류 수계가 하류 수계보다 유량계수가 다소 크게 나타나 유량증가에 따른 비점오염원 영향을 좀 더 받는 것으로 판단된다.

TN 부하의 유량계수 값은 남한강 상·하류 수계 간 뚜렷한 유출특성을 보이지 않았으며, 유량 증가시 다소 증가 또는 감소하지만 그 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 질소는 대기나 토양 공극 내에서 유동성이 크므로 적은 규모의 강우강도라도 쉽게 유출이 일어나기 때문에 유출수 농도의 유량 의존성이 낮은 것으로 판단된다(공동수 등, 2006b; 박지형, 2007).

이와 반면 SS와 TP는 대부분의 유입하천에서 유량계수가 크게 나타나 유량 의존성이 큰 오염물질임을 알 수 있다. 즉 토사유출은 강우강도가 클수록 더욱 커지기 때문에 강우로 인한 유량 증가시 부유물질 농도가 높아지며, 인의 경우에는 토양내 유동성이 작아 쉽게 유출이 되지 않다가 강우시 주로 토양입자에 흡착된 형태로 동반 유출되어 인의 농도가 증가하는 것으로 해석된다(강선홍과 서동일, 1997; 공동수 등, 2006b).

한편, 하천유량(Q)-오염부하량(L) 관계식으로부터 도출된 유량계수로 판단컨대, 오염물질의 유량변화에 따른 의존도는 SS > TP > COD<sub>Mn</sub> > TN > BOD<sub>5</sub> 순으로 큼을 알 수 있었다.

### 3.2. 상관 및 요인분석

#### 3.2.1. 수질항목별 상관관계

남한강 충주댐 상류 수계의 골지천, 옥동천, 평창강 3개 하천 전체와 개별 하천에 대한 유량과 수질항목별 상관분석을 실시한 결과를 Table 2에 나타내었다. 대상 하천 전체에 대한 조사항목 간 상관계수  $r=0.003 \sim 0.832$ 로 항목 간에 큰 차이를 보였다. 조사항목 간 상관성을 살펴보면, 유량과 SS, TP간의 상관계수는 각각 0.802 ( $p<0.01$ ), 0.624 ( $p<0.01$ )로 양(+)의 상관성을 나타내었다. 또한 SS와 COD<sub>Mn</sub>, TP와의 상관계수도 각각 0.575 ( $p<0.01$ ), 0.832 ( $p<0.01$ )의 상관성을 나타내어 수계 내 SS의 변화는 곧 COD<sub>Mn</sub>와 TP의 변화와 밀접한 관련을 가지는 것으로 나타났다. 반면 유기오염물질 지표인 BOD<sub>5</sub>와 COD<sub>Mn</sub>, TOC 간의 상관계수는 각각 0.584 ( $p<0.01$ ), 0.457 ( $p<0.01$ )로 약한 양(+)의 상관성을 보였다. 수온과 DO의 상관계수는 -0.792 ( $p<0.01$ )로 음(-)의 상관성을 나타내어 온도가 높을수록 산소의 용해도가 낮아지는 전형적인 패턴을 보였다.

남한강 충주댐 상류 개별 하천 수계에 대한 유량과 수질항목 및 수질항목간의 상관관계도 남한강 상류 하천 전체 수계를 대상으로 한 상기 결과와 대체로 유사한 결과를 보였다.

위 결과로부터 남한강 충주댐 상류 수계는 각 주요 유입 하천마다 공통적으로 유량, SS, TP의 수질인자 간에 유의한 수준의 양(+)의 상관관계가 있는 것으로 요약할 수 있다. 또한 통상적으로 유기오염물질 지표로 대표되는 BOD<sub>5</sub>와 COD<sub>Mn</sub>간의 상관관계가 뒤에서 언급할 남한강 충주댐 하류 수계보다 낮은 것으로 나타나 그 발생기원이 다를 수 있었다.

남한강 충주댐 하류 수계의 청미천, 복하천, 흑천의 3개 하천 전체와 개별 하천에 대한 유량과 수질항목별 상관분

**Table 2.** Pearson correlation coefficient among the water quality parameters at the upstreams of the watershed of South Han river

Variable	Flow rate	Temp.	pH	EC	DO	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Mn</sub>	SS	TN	TP	TOC
Upstreams (n=509)	Flow rate	1									
	Temp.	.157**	1								
	pH	-.192**	.280**	1							
	EC	-.286**	-.284**	-.011	1						
	DO	-.193**	-.792**	-.101*	.245**	1					
	BOD <sub>5</sub>	.003	.418**	.174**	-.045	-.351**	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.416**	.404**	.080	-.236**	-.383**	.584**	1			
	SS	.802**	.199**	-.137**	-.269**	-.216**	.148**	.575**	1		
	TN	.109*	-.363**	-.362**	.309**	.183**	-.014	.121**	.067	1	
	TP	.624**	.292**	-.159**	-.300**	-.282**	.209**	.523**	.832**	.073	1
TOC	.326**	.311**	.018	-.100*	-.327**	.457**	.633**	.463**	.129**	.419**	1
G.J. (n=170)	Flow rate	1									
	Temp.	.101	1								
	pH	-.175*	.441**	1							
	EC	-.453**	-.131	.055	1						
	DO	-.151*	-.816**	-.304**	.122	1					
	BOD <sub>5</sub>	.013	.478**	.282**	-.095	-.401**	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.546**	.394**	.178*	-.370**	-.395**	.567**	1			
	SS	.927**	.155*	-.144	-.345**	-.191*	.097	.611**	1		
	TN	-.018	-.578**	-.424**	.110	.447**	-.423**	-.299**	-.032	1	
	TP	.811**	.271**	-.138	-.441**	-.266**	.104	.522**	.891**	-.015	1
TOC	.440**	.354**	.056	-.244**	-.387**	.336**	.661**	.511**	-.269**	.427**	1
Ok.D. (n=174)	Flow rate	1									
	Temp.	.173*	1								
	pH	-.066	.177*	1							
	EC	-.598**	-.351**	.190*	1						
	DO	-.210**	-.719**	.037	.411**	1					
	BOD <sub>5</sub>	-.162*	.300**	.053	.004	-.259**	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.390**	.312**	.150*	-.438**	-.269**	.297**	1			
	SS	.609**	.163*	-.034	-.374**	-.176*	.215**	.588**	1		
	TN	.007	-.264**	-.295**	-.102	.071	.223**	.097	-.014	1	
	TP	.350**	.006	-.194*	-.149*	-.041	.173*	.294**	.443**	.225**	1
TOC	.259**	.290**	.087	-.198**	-.241**	.354**	.428**	.376**	.029	.201**	1
P.C. (n=175)	Flow rate	1									
	Temp.	.199**	1								
	pH	-.181*	.228**	1							
	EC	-.511**	-.501**	.052	1						
	DO	-.204**	-.846**	-.124	.448**	1					
	BOD <sub>5</sub>	-.101	.412**	.265**	-.240**	-.318**	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.335**	.509**	.144	-.448**	-.412**	.624**	1			
	SS	.845**	.278**	-.130	-.478**	-.269**	.107	.533**	1		
	TN	-.110	-.646**	-.277**	.276**	.557**	-.259**	-.278**	-.137	1	
	TP	.651**	.455**	-.172*	-.547**	-.454**	.312**	.597**	.780**	-.173*	1
TOC	.234**	.305**	.107	-.255**	-.281**	.520**	.580**	.424**	-.177*	.462**	1

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). \*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

석을 실시한 결과를 Table 3에 나타내었다. 대상 하천 전체에 대한 조사항목 간 상관계수  $r = 0.020 \sim 0.868$ 로 남한강 충주댐 상류 수계와 마찬가지로 조사항목 간 큰 차이를 보였다. 조사항목 간 상관성을 살펴보면, 유량과 SS, TP간의 상관계수는 각각 0.602 ( $p < 0.01$ ), 0.431 ( $p < 0.01$ )로 남한강 상류 수계에 비해 다소 낮은 상관성을 보였다. 수온은 남

한강 충주댐 상류 수계와 마찬가지로 DO와 높은 음(-)의 상관성( $r = -0.679$ ,  $p < 0.01$ )을 보였다. BOD<sub>5</sub>는 COD<sub>Mn</sub>, TOC 간의 상관계수는 각각 0.774 ( $p < 0.01$ ), 0.744 ( $p < 0.01$ )로 높은 양(+)의 상관성을 나타내었다. 이를 통해 유기오염물질 지표 간 상관성이 남한강 충주댐 상류 수계에 비해 높게 나타남을 확인할 수 있었다. SS와 COD<sub>Mn</sub>, TP간의 상관계

**Table 3.** Pearson correlation coefficient among the water quality parameters at the downstreams of the watershed of South Han river

Variable	Flow rate	Temp.	pH	EC	DO	BOD	COD	SS	TN	TP	TOC
Down-streams (n=528)	Flow rate	1									
	Temp.	.190**	1								
	pH	-.269**	.106*	1							
	EC	-.228**	.027	-.228**	1						
	DO	-.204**	-.679**	.216**	-.063	1					
	BOD <sub>5</sub>	.090*	.067	-.179**	.385**	-.158**	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.403**	.237**	-.236**	.229**	-.281**	.774**	1			
	SS	.602**	.105*	-.163**	-.048	-.170**	.335**	.692**	1		
	TN	-.070	-.231**	-.428**	.780**	.020	.325**	.186**	.065	1	
	TP	.431**	.216**	-.382**	.452**	-.337**	.584**	.755**	.719**	.495**	1
TOC	.238**	.253**	-.192**	.295**	-.317**	.744**	.868**	.484**	.172**	.635**	1
C.M. (n=175)	Flow rate	1									
	Temp.	.220**	1								
	pH	-.337**	.201**	1							
	EC	-.506**	-.419**	.267**	1						
	DO	-.159*	-.646**	.125	.322**	1					
	BOD <sub>5</sub>	.063	.138	.052	.061	-.036	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.399**	.294**	-.141	-.118	-.243**	.798**	1			
	SS	.705**	.126	-.164*	-.191*	-.105	.208**	.572**	1		
	TN	.121	-.665**	-.397**	.075	.399**	-.138	-.118	.105	1	
	TP	.744**	.257**	-.260**	-.356**	-.249**	.372**	.683**	.844**	.087	1
TOC	.158*	.285**	-.069	-.039	-.280**	.713**	.840**	.380**	-.250**	.493**	1
B.H. (n=176)	Flow rate	1									
	Temp.	.141	1								
	pH	-.227**	.236**	1							
	EC	-.534**	-.148*	.289**	1						
	DO	-.252**	-.534**	.238**	.295**	1					
	BOD <sub>5</sub>	.213**	-.197**	-.076	.162*	-.117	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.691**	.110	-.055	-.134	-.243**	.682**	1			
	SS	.831**	.058	-.091	-.303**	-.193*	.368**	.815**	1		
	TN	-.398**	-.684**	-.009	.615**	.467**	.228**	-.130	-.177*	1	
	TP	.676**	.049	-.090	-.091	-.264**	.526**	.780**	.821**	-.034	1
TOC	.430**	.173*	.042	-.035	-.289**	.691**	.868**	.562**	-.134	.589**	1
H.C (n=178)	Flow rate	1									
	Temp.	.215**	1								
	pH	-.372**	.167*	1							
	EC	-.479**	-.298**	.256**	1						
	DO	-.267**	-.807**	-.014	.360**	1					
	BOD <sub>5</sub>	.004	.281**	.275**	.193**	-.096	1				
	COD <sub>Mn</sub>	.313**	.353**	.065	-.019	-.250**	.745**	1			
	SS	.531**	.171*	-.160*	-.173*	-.192*	.398**	.774**	1		
	TN	-.013	-.388**	-.261**	-.042	.188*	.037	.063	.114	1	
	TP	.425**	.302**	-.033	-.104	-.261**	.568**	.816**	.895**	.089	1
TOC	.324**	.323**	.093	-.010	-.293**	.533**	.638**	.582**	-.040	.665**	1

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). \*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

수는 각각 0.692 (p<0.01), 0.719 (p<0.01)의 상관성을 나타내어, 남한강 충주댐 하류 수계 또한 SS의 변화는 COD<sub>Mn</sub>, TP의 변화와 밀접한 관련을 가지는 것으로 사료된다. 남한강 충주댐 하류 개별 하천수계에 대한 유량과 수질항목간의 상관관계도 남한강 하류 하천 전체 수계를 대상으로 한 상기 결과와 대체로 유사하였다.

상기 결과로부터 남한강 하류 수계는 각 주요 유입하천마다 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TOC 등의 수질인자 간에는 유의한 수준의 양(+)의 상관관계가 있는 반면, 유량과 수질인자간의 상관성은 남한강 충주댐 상류 수계보다 상대적으로 낮아 남한강 충주댐 상류 수계와는 다른 유출 특성을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2.2. 요인분석

남한강 충주댐 상·하류 수계를 대상으로 수질변화에 영향을 미치는 주요 요인을 요인분석(Factor Analysis)을 통해 분석한 결과를 Table 4~6에 나타내었다.

남한강 충주댐 상류 수계의 팔지천 등 3개 하천 전체는 3개의 주성분이 추출되었고, 전체의 68.877%를 설명하고 있다. 이중 요인 1은 36.620% 기여하고 있으며, 유량, SS, TP가 양(+)의 상관관계를 보여, “유량 증가에 따른 부유물질에 흡착된 인계열 오염물질 유입”과 관련이 있는 것으로 볼 수 있다(김영주, 2003; 박지형, 2007; 윤양호와 박종식, 2000). 요인 2는 19.324% 기여하고 있으며, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TOC이 양(+)의 상관관계를 보여, “유기오염물질 유입”과 관련이 있는 것으로 판단된다. 요인 3은 12.932% 기여하고 있으며, TN이 양(+)의 상관관계를 나타내어 “질소계열 오염물질 증가”와 관련이 있는 것으로 추정된다.

남한강 충주댐 상류 개별 하천 수계에 대한 요인분석 결과에서도 제 1 요인은 공통적으로 유량, SS, TP와 관련이 있고 또한 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타나, 남한강 충주댐 상류 하천 전체 수계를 대상으로 한 상기 결과와 대체로 유사한 결과를 보였다.

한편, 남한강 충주댐 하류 수계는 4개의 주성분이 추출되었고, 전체의 83.529%를 설명하고 있다. 이중 요인 1은 40.327% 기여하고 있으며, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TOC와 양(+)의 관계를 보여, “유기오염물질 유입”과 관련이 있는 것으로

Table 4. Total variance explained at the study sites

Component	Initial eigen values			
	Total	% of variance	Cumulative %	
Upstreams	1	4.028	36.620	36.620
	2	2.126	19.324	55.944
	3	1.423	12.932	68.877
G.J.	1	4.410	40.095	40.095
	2	2.642	24.019	64.114
Ok.D.	1	3.430	31.185	31.185
	2	1.798	16.347	47.533
	3	1.427	12.972	60.505
	4	1.238	11.258	71.763
P.C.	1	4.680	42.545	42.545
	2	2.090	18.996	61.541
	3	1.310	11.908	73.449
Downstreams	1	4.436	40.327	40.327
	2	2.126	19.326	59.654
	3	1.430	13.004	72.658
	4	1.196	10.870	83.529
C.M.	1	4.133	37.574	37.574
	2	2.247	20.427	58.001
	3	1.867	16.975	74.976
B.H.	1	4.507	40.970	40.970
	2	2.423	22.032	63.001
	3	1.445	13.135	76.136
	4	1.020	9.276	85.412
H.C.	1	4.216	38.330	38.330
	2	1.982	18.015	56.345
	3	1.861	16.921	73.266

Table 5. Rotated component matrix. (a) Upstreams of the watershed of South Han river, (b) Downstreams of the watershed of South Han river

Variable	(a) Component											
	Upstreams			G.J.		Ok.D.				P.C.		
	1	2	3	1	2	1	2	3	4	1	2	3
Flow rate	.872	.084	.011	.929	-.076	.818	-.210	-.324	-.046	.902	.085	-.018
Temp.	.114	.535	-.695	.171	.855	.090	-.846	.224	.255	.181	.881	.265
pH	-.360	.218	-.486	-.227	.650	.002	.083	.209	.818	-.445	.326	.338
EC	-.472	.100	.564	-.552	-.054	-.542	.570	.234	.248	-.587	-.447	-.148
DO	-.164	-.526	.547	-.221	-.764	-.081	.890	-.159	.041	-.217	-.842	-.168
BOD <sub>5</sub>	-.078	.832	-.093	.133	.695	.024	-.188	.873	-.109	-.100	.236	.852
COD <sub>Mn</sub>	.433	.760	-.032	.684	.487	.690	-.210	.358	.107	.379	.270	.750
SS	.894	.258	.011	.947	-.010	.851	-.056	.144	.035	.883	.081	.251
TN	.092	.178	.817	-.010	-.754	.053	.184	.310	-.743	.015	-.823	-.087
TP	.822	.293	-.045	.903	.031	.588	.155	.218	-.332	.790	.225	.369
TOC	.332	.728	.080	.601	.404	.453	-.177	.516	.138	.271	.051	.785

Variable	(b) Component													
	Downstreams				C.M.			B.H.				H.C.		
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
Flow rate	.138	-.081	.868	.130	.133	.873	-.140	.589	-.078	-.739	-.080	.347	-.113	-.747
Temp.	.146	-.164	-.005	.906	.153	.067	-.920	.008	-.884	-.089	.294	.268	-.890	-.101
pH	.055	-.669	-.492	-.064	.082	-.607	-.222	-.015	-.071	.186	.927	.076	-.332	.722
EC	.322	.790	-.345	.061	.185	-.599	.484	.041	.263	.794	.276	.051	.312	.741
DO	-.109	-.114	-.156	-.898	-.068	-.182	.760	-.226	.790	.013	.397	-.190	.797	.295
BOD <sub>5</sub>	.871	.214	-.048	.007	.896	-.071	-.002	.803	.093	.348	-.188	.774	-.082	.373
COD <sub>Mn</sub>	.893	.083	.335	.138	.904	.314	-.140	.950	-.089	-.179	.009	.929	-.095	-.012
SS	.549	-.049	.705	-.004	.443	.712	-.002	.776	.040	-.538	.043	.845	.064	-.356
TN	.185	.907	-.053	-.153	-.169	.375	.779	.050	.749	.536	-.077	.128	.634	-.219
TP	.653	.448	.442	.186	.520	.763	-.126	.845	.014	-.257	-.022	.915	-.045	-.196
TOC	.879	.093	.120	.203	.876	.086	-.202	.868	-.237	.088	.034	.777	-.190	-.014

**Table 6.** Variables in the factors extracted from Factor Analysis at the study sites

Watershed	Factor			
	1	2	3	4
Upstreams	Flow rate, SS, TP	BOD <sub>5</sub> , COD <sub>Mn</sub> , TOC	TN	-
G.J.	Flow rate, EC, SS, TP	Temp, pH, DO, BOD <sub>5</sub> , TN	-	-
Ok.D.	Flow rate, COD <sub>Mn</sub> , SS	Temp, DO	BOD <sub>5</sub>	pH, TN
P.C.	Flow rate, SS, TP	Temp, DO, TN	BOD <sub>5</sub> , COD <sub>Mn</sub> , TOC	-
Downstreams	BOD <sub>5</sub> , COD <sub>Mn</sub> , TOC	EC, TN	Flow rate	Temp, DO
C.M.	BOD <sub>5</sub> , COD <sub>Mn</sub> , TOC	Flow rate, pH, SS	Temp, DO, TN	-
B.H.	BOD <sub>5</sub> , COD <sub>Mn</sub> , TOC, TP	Temp, DO	EC	pH
H.C.	BOD <sub>5</sub> , COD <sub>Mn</sub> , SS, TOC, TP	Temp, DO, TN	Flow rate, EC, pH	-

볼 수 있다. 요인 2는 19.326% 기여하고 있으며, TN, EC와 양(+)의 상관관계를 나타내어 “질소계열 오염물질 증가”와 관련이 있는 것으로 판단된다. 요인 3은 13.004% 기여하고 있으며, 유량과 양(+)의 상관관계를 보여, “유량변화”와 관련된 것으로 사료된다. 또한 요인 4는 10.870% 기여하고 있으며, 수온과 양(+)의 상관관계를, DO가 음(-)의 상관관계를 보여 “계절적 요인”으로 해석할 수 있다.

남한강 충주댐 하류 개별 하천 수계에 대한 요인분석 결과에서도 제 1 요인은 공통적으로 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TOC와 관련이 있고 또한 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타나, 남한강 충주댐 하류 하천 전체 수계를 대상으로 한 상기 결과와 대체로 유사한 결과를 보였다.

### 4. 결론

남한강 충주댐 상·하류 수계의 골지천 등 6개 주요 유입하천을 대상으로, 경험식과 요인분석을 통한 오염물질 유출 특성 분석 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

BOD<sub>5</sub> 부하의 유량계수 값은 남한강 충주댐 상류 수계의 경우 대체로 1 이상을, 남한강 충주댐 하류 수계는 1 이하를 보여 남한강 상·하류 간 유출특성에 차이를 보였다.

BOD<sub>5</sub>의 이와 같은 결과는 유역 내 점오염원과 비점오염원의 배출 비율에 따른 것으로 판단되고, 점오염원의 영향을 크게 받는 유입하천은 유량증가에 따른 희석효과로 유량계수가 1 미만으로 나타나며, 비점오염원의 영향을 크게 받는 유입하천은 유량증가에 따른 비점오염원 배출 증가로 유량계수가 1 이상을 나타내는 것으로 사료된다.

난분해성 오염 지표로 대표되는 COD<sub>Mn</sub> 유기물질 부하의 유량계수 값은 남한강 충주댐 상·하류 수계 모두 1 이상을 보여 유량 증가시 COD<sub>Mn</sub> 농도는 증가하는 것으로 나타났으며, 남한강 상류 수계가 하류 수계보다 유량계수가 다소 크게 나타나 유량증가에 따른 비점오염원 영향을 좀 더 받는 것으로 판단된다.

TN 부하의 유량계수 값은 1 내외로 남한강 충주댐 상·하류 수계 간 뚜렷한 유출특성을 보이지 않았으며, 또한 유량과 농도와의 뚜렷한 경향성도 보이지 않았다. 질소는 대기나 토양 공극 내에서 유동성이 크므로 적은 규모의 강우강도라도 쉽게 유출이 일어나기 때문에 유출수 농도의 유량 의존성이 낮은 것으로 판단된다.

SS와 TP는 남한강 충주댐 상·하류 수계 모든 유입하천에서 유량계수가 크게 나타나 유량 의존성이 큰 오염물질임을 알 수 있었다.

또한, 남한강 충주댐 상류 수계는 유량, SS, TP의 수질인자 간에 유의한 수준의 양(+)의 상관관계를 나타내고, 이들 수질인자들이 수질변화의 제 1 요인으로 규정되는 것으로 나타났다.

반면, 남한강 충주댐 하류 수계는 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, TOC의 수질인자 간에 유의한 수준의 양(+)의 상관관계를 나타내고, 이들 수질인자들이 수질변화의 제 1 요인으로 규정되었다.

즉, 해당 수계에서의 수질 변동의 주요인은 농경지, 산림이 많은 남한강 충주댐 상류 유역의 특성상, 남한강 충주댐 상류 수계는 강우기 비점오염원 유출에 의해, 도시개발이 집중된 남한강 충주댐 하류 수계는 점오염원 영향에 의한 것으로, 서로 다른 요인에 의해 수질 특성이 결정됨을 알 수 있었으며, 수질 및 유역 관리정책 또한 이러한 관점에서 접근하여야 함을 시사한다.

따라서, 본 연구에서 제시한 방법으로 향후 수계 내 미지 유역의 오염물질 유출특성 파악을 위한 모니터링 결과의 간편하고 객관적인 평가와 이에 따른 우선 오염물질 관리군 파악 등 효율적인 수질보전 대책 및 관리에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

강선홍, 서동일(1997). 초강천의 퇴적물 분석을 이용한 총인 및 질소의 유달특성평가. *상하수도학회지*, **11**(4), pp. 99-109.

공동수(1992). 팔당호의 육수생태학적 연구. 박사학위논문, 고려대학교.

공동수, 박지형, 이형진, 강대구, 김병익(2006a). 수역별 수질/수질관측망 운영 및 평가, 한강물환경연구소.

공동수, 윤성규, 이형진, 김병익, 박지형(2006b). 남한강수계 오염물질 유출 및 수질변동 특성에 관한 연구(II), 한강물환경연구소.

김미아, 이재관, 조정덕(2007). 다변량분석법을 이용한 금강의 수질오염특성 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 161-168.

김영주(2003). 주성분분석에 의한 도시호수의 수질평가에 관한 연구. *환경관리학회지*, **9**(2), pp. 197-203.

김종민 등(1993). 팔당호 수질조사결과 평가·분석보고서. 한강수질검사소.

- 노형진(2005). *다변량분석 이론과 실제*, 형설출판사.
- 박지형(2007). 유역형상과 수리 특성을 고려한 경험론적 유달부하 산정. 박사학위논문, 경북대학교.
- 박지형, 공동수, 민경석(2008). 팔당호 상류유역의 점, 비점 오염원 유달부하 특성 - 남한강, 경안천 수계를 대상으로. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(6), pp. 750-757.
- 서영화, 조순행(1998). 침출수 분석 항목간의 상관관계분석과 주성분분석. *대한환경공학회지*, **20**(12), pp. 1705-1715.
- 윤양호, 박종식(2000). 주성분분석에 의한 거금수도의 수질 환경 및 식물플랑크톤 변동 요인 해석. *한국환경과학회지*, **9**(1), pp. 252-258.
- 이형진, 공동수, 김상훈, 신기식, 박지형, 김병익, 김성미, 장승현, 천세억(2007). 남한강수계 저수기 수질변동 특성에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 889-896.
- 최한규, 백경원, 최용목, 오기호(2002). 유량변동에 따른 소양강유역 수질의 통계학적 해석. *대한토목학회논문집*, **22**(2-B), pp. 117-124.
- Colston, N. V. (1974). *Characterization and Treatment of Urban Land Runoff*. U. S. EPA-670/2-74-096.
- Ohta, R., Shima, K., and Tak yanagi, T. (1986). Water quality analysis of the Mikawa Bay by Principal component analysis. *Water and Waste*, **28**(11), pp. 1118-1121.
- Ying, O. (2005). Evaluation of River Water Monitoring Stations by Principal Component Analysis. *Water Research*, **39**, pp. 2621-2635.