

강우시 도시배수구역의 유출특성 지배인자 분석

정 시 문* / 박 인 혁** / 하 성 룡***

Identifying dominant parameters of storm-sewer-overflows in separate sewer system

Si Mon Jung* / In Hyeok Park** / Sung Ryong Ha***

요약 : 급격한 도시화에 따른 불투수 면적과 인구의 증가로 인하여 많은 양의 오염물이 배출되고 있고, 이로 인하여 지역 하천의 수질이 심각한 위협을 받고 있다. 특히 강우시 지표면의 쌓인 다량의 오염물질은 오수관으로 유입된 후 월류되어 하천으로 유입되기 때문에 이에 대한 연구와 관리시스템의 마련이 시급하다. 이에 본 연구에서는 청주시를 대상으로 도시배수구역의 유출특성을 분석하고 이에 영향을 미치는 인자를 추출 및 분석할 수 있는 통계적 분석방법을 제시 것에 목적이 있다. 선행된 연구를 참고하여 강우강도, 선행건기일수, 강우량과 5개의 수질분석항목(CODcr, BOD, SS, TN, TP)과의 관계를 통계적인 방법으로 분석하였으며, 강우시 도시유출특성을 지배하는 인자에 대한 규명을 시도하였다.

핵심용어 : SSO, 월류수, 비점오염원

Abstract : Growth in population and urbanization has progressively increased the loadings of pollutants from non-point sources as well as point sources. Separated sewer overflows(SSO) have been considered as a major cause of water-quality deterioration of natural water-courses in the vicinity of the heavily urbanized areas. The factors defining the magnitude and occurrence of SSO are site-specific. It is important to know exact properties of pollutants contained in SSO to address water quality impacts that are caused by SSO inputs to the receiving waters. Site and event parameters found to have significant influences on urban runoff pollutant EMCs include total event rainfall, antecedent dry period, rainfall intensity. In this study, a field survey was carried out in some selected areas of Cheongju city. Literature from previous similar studies was consulted and some important factors affecting the runoff characteristics of urban drainage areas were analyzed for some selected survey points. It was found that the factors most affecting BOD are the number of dry days prior to rainfall and the intensity of the rainfall. The factor most affecting CODcr is the number of dry days prior to rainfall. The factors most affecting SS are the amount of rainfall and the number of dry days prior to rainfall. The factor most affecting TN is the amount of rainfall. The factor most affecting TP is the amount of rainfall and the number of dry days prior to rainfall.

Keywords : SSO, Over flow, Non-point source

1. 서 론

국내에서는 수계오염총량관리제도와 BTL등을 통해 하천 수질개선 방안을 모색하였지만 사업목

표 달성을 위한 경험적 자료의 부재와 비합리적인 분석방법, 현장 여건으로 인한 실측의 어려움 등으로 목표 수질 달성에 난항을 겪는 중이다. 하천 수계에 방류되는 오염물질은 크게 점오염원과

+ Corresponding author : simon34@chungbuk.ac.kr

* 정희원 · 충북대학교 환경도시대학원 석사과정

** 정희원 · 충북대학교 환경도시대학원 박사과정

*** 정희원 · 충북대학교 도시공학과 교수

비점오염원으로 나누어 볼 수 있다. 제도적으로 관리되고 규제되는 점오염원은 효과적으로 통제되고 있으나, 비점오염원은 현실적인 관리에 어려움이 있어 하천수질 악화에 심각한 원인이 되고 있다(김성수, 2002). 특히 강우시에 발생하는 하수관거의 유출특성 이러한 현상을 심화 시킨다.

지표면에 퇴적된 다량의 오염물질 즉 비점오염원은 강우시 지표 유출수에 포함되어 도시하수도 시스템으로 유입된다. 하수관거로 유입된 지표유출수는 강우가 지속됨에 따라 차집능이 초과되어 월류, 방류선으로 유출되게 된다. 이러한 월류수는 지표오염물질 뿐만 아니라 관거내 퇴적물, 미처리된 하수등과 같은 오염물질을 함유하고 있으며, 관거 내부의 퇴적물의 재부유 등으로 인하여 비 강우시 하수 오염도에 비하여 수배에서 수집배에 이르는 오염도를 나타내고 있다(이두진, 2003). 도시지역에서 발생하는 하수관거 월류수(CSO, SSO)는 전술한 고농도의 오염물질을 포함하고 있어 도시 내부를 관통하는 하천에 큰 영향을 미친다.

문제점의 해결을위한 비점오염원과 강우유출에 관한연구는 활발히 진행되고 있다. 최승철(1997), Peter등(2000)은 도시화의 진행에 비점오염원의 부하량이 증가한다는 연구를 수행하였으며, 김성수등(2002)은 유역의 강우사상별 유출 특성을 분석하였다. 이러한 비점오염원 유출특성에 관여하는 요인에 대한 분석 또한 함께 진행되어 졌다. Kapil등(1995)은 총 강우량과 강우지속시간, 선행건기일수와 EMC에 대한 상관관계를 밝혀 내었고, Mihael(1998)은 불투수 면적비율이 다른 토지이용지역에 비해 높아짐에 따라 초기 오염 농도가 두드러지는 현상을 규명하였으며 Kayhanian(2006)은 총강우량과, 선행건기일수, 배수구역 면적이 유출특성에 작용하는 영향을 규명하였다. 국내에서는 오영택등(2004)이 강우가 비점오염원 유출에 관여하는 과정을 설명했으며, 김건하등(2006)은 선행건기일과 토지이용, 식생피복, 유출률의 인자들이 지표유출수에 인위적 개입을 한다고 하였고, 김석구등(2006)이 도로의 비점오염원

유출특성에 강우량과 강우 강도가 영향을 미친다는 점을 보고하였다. 그 외에도 많은 연구가 활발하게 보고되고 있으나 강우 유출수에 대한 유출특성 및 유출성분의 기여에 관한 분석은 미진한 실정이다.

강우시 유출되는 오염물질에 대한 규명은 복잡한 유역의 특성과 수문조건에 따라 크게 달라지므로 다양한 유역의 관측자료가 전제되어야 가능한 문제이다. 이에 청주시 지역을 연구의 대상지로 하여, 조사지점을 선정하고 현장조사를 수행하였다. 기존에 수행된 연구문헌을 참고하여 도시배수구역의 유출특성을 관여하는 인자를 분석하고 이들 인자중 강우시 EMC에 관여하는 인자를 선정하여, 도시 배수구역에 적용할 수 있는 통계적 분석방법을 제시하는 것에 본 연구의 목적이 있다.

2. 연구의 방법

2.1 조사지점의 선정

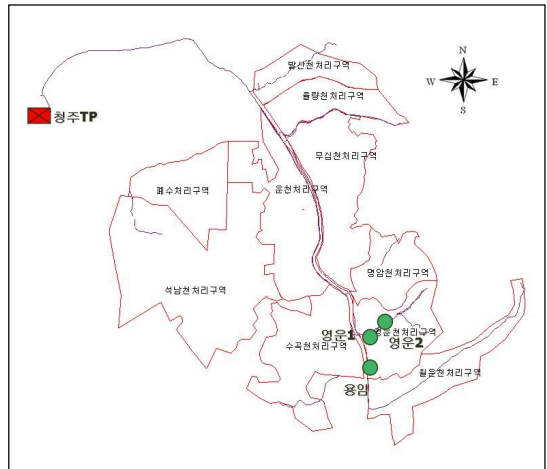


Fig. 1. Study area

Fig. 1은 연구의 대상지를 나타낸 것으로 이 지역은 분류식지역으로서 근래에 개발된 도시화 구역으로 대부분의 아파트 주거 지역과 일부 단독주택지역, 일부 유흥업소가 산재한 형태를 보이고 있다.

2.2 현장 조사 방법

2.2.1 유량 조사방법

대상지역의 하수발생특성 파악을 위하여 건기 시와 우기시의 유량을 측정하였다. 유량계는 자동 측정 및 데이터 저장이 가능한 PCM-3를 사용하여 10분~15분간격으로 유량, 수위를 측정하였다. 또한 대상지역의 월류량 산출/특성을 파악하기 위하여 한계수심을 측정하였다.

2.2.2 수질 조사 방법

대상지역의 하수성상특성 파악을 위하여 우기 시 침투유량이 발생하는 시점에 맞추어 채수를 실시하였다. 시료채수는 grab sampling을 원칙으로 하고, 1,000ml의 샘플을 채수하였으며, 시료 채취 시 관거 하부의 퇴적물 혼입을 최소화하여 수질 측정 오류가 발생하지 않도록 하였다. 채수된 시료는 실험실에 도착하기 전까지 Ice box에서 4°C로 유지하여 수질분석의 신뢰성을 확보하였다. 분석항목은 BOD5 CODcr, SS, T-N, T-P의 5가지이다.

2.2.3 월류수 조사방법(CSO, SSO)

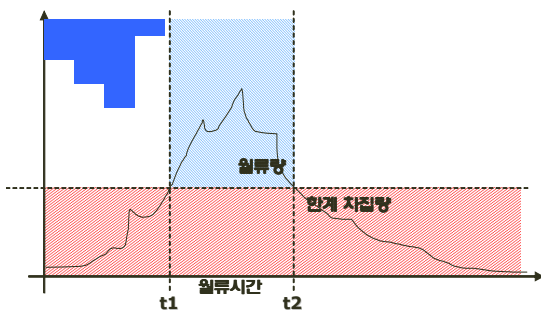


Fig. 2. Schematic diagram of overflow

배제방식별 월류량을 산출하기 위하여 Fig. 2와 같이 월류가 일어나는 시간을 유량과 같이 기록하여 월류가 발생하기 직전시점까지를 한계 차집량이라 정의하고 그 이후부터 계속되는 유량에

서 한계 차집량을 차감하여 월류량을 산출하였다.

$$\text{월류량} = \frac{Q_{total} - Q_{trans}}{\Delta t}$$

Q_{total} : 월류시간동안의 전체 유량

Q_{trans} : 월류가 발생하기 직전시점의 유량(t1시점의 계속 유량 : 한계 차집량)

2.3 자료분석방법

2.3.1 EMC 산출

강우사상에 대한 평균농도 또는 유량기중 평균농도 (EMC, event mean concentration) 는 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 평가하는데 가장 적절한 인자로 인식되고 있으며, 가장 널리 이용되고 있다(EPA, 1983).

강우 사상에 따라서 관측된 유량자료와 이에 해당하는 수질 자료를 이용한 EMC농도는 아래 식에 의해서 계산할 수 있다.

$$EMC = \frac{\sum(C_i \cdot Q_i \cdot \Delta t_i)}{\sum Q_i \cdot \Delta t_i}$$

Q_i : 관측시간 t에서의 유출량(m³/s)

C_i : 오염물질 농도(mg/L)

EMC : 강우사상에 대한 평균농도(mg/L)

2.3.2 인자분석

분석을 위해 선정한 인자는 선행건기일수, 강우량, 강우강도, 강우지속시간, 월류지속시간, 불투수면적, 배수면적 으로서 이는 국내·외에서 연구된 기존 자료를 바탕으로 선정하였으며 이중 불투수면적과, 배수면적은 강우 회차별 분석 적용에 어려움이 있어 분석대상에서 제외하였다.

관측자료를 이용하여 인자분석을 수행하였다. 인자분석은 데이터 변동성의 많은 부분과 연관된 차원을 설명할 수 있는 잠재적인 “인자”를 식별하는 것이다. 인자분석의 절차는

- 1) 주성분법과 최대우도방법을 수행하여 비교

후 공통인자를 추출한다. 최대 우도법이란, 각 관측값에 대한 결합밀도함수를 모수의 함수로 간주할 때, 결합밀도 함수의 곱들(우도함수)을 최대로 하는 모수의 추정값을 최대우도 추정량으로 보는 방법이다.

- 2) 최초 요인을 추출한 뒤 요인 행렬로부터 인자의 수를 결정한다. 인자의 수를 선택할 때는 인자에 의해 설명되는 분산과 분산비율을 기준으로 선택한다.

인자분석은 변수 $X_1 \dots X_p$ 를 관찰 불가능한 m 개의 공통인자 F_1, F_2, \dots, F_m 의 선형결합으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} X_1 - \mu_1 &= l_{11}F_1 + \dots + l_{1m}F_m + \epsilon_1 \\ X_2 - \mu_2 &= l_{21}F_1 + \dots + l_{2m}F_m + \epsilon_2 \\ &\vdots \\ X_p - \mu_p &= l_{p1}F_1 + \dots + l_{pm}F_m + \epsilon_p \end{aligned}$$

이를 행렬을 이용하여 직교 인자 모형을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X - \mu &= LF + \epsilon \\ \text{단, } X &= (X_1, \dots, X_p) & \mu &: \text{모평균} \\ F &= (F_1, F_2, \dots, F_m) & \epsilon &= \epsilon_1 \dots \epsilon_p \\ L &: \text{인자적재행렬} \end{aligned}$$

2.3.3 다중 회귀분석

다중 회귀분석이란 2개 이상의 예측 변수와, 1개의 반응변수와의 관계를 선형, 즉 직선으로 가정하는 회귀분석을 말한다.

$$\text{회귀직선추정식} : \hat{Y} = \hat{B}_0 + \hat{B}_1X_1 + \hat{B}_pX_p$$

본 연구에서는 앞의 단계에서 추출된 인자를 바탕으로 인자 간 관계를 다중회귀 분석을 통하여 대상지에 적용 할수 있는 회귀 방정식을 추정하고 이를 일반화 할 수 있는 결과를 도출하기 위하여 사용한다.

3. 분석결과

Table 1은 대상지의 강우시 유량 및 수질 측정결과이며 본 연구의 기초데이터로 사용하였다.

3.1 유역특성-EMC의 상관관계분석

강우시 발생하는 고농도의 오염물질은 유역의 수리수문적 특성과 지형적 특성과 밀접한 관계가 있기 때문에 유출특성 지배인자 분석 전 상관관계 분석을 통한 인자 선별을 위하여 Figs. 3~5에 나타내었듯이 인자 간 관계를 분석하였다.

Table 1. Analysis use observed data

조사 지점	회차	강우량 (mm)	유량 (cmd)	월류비율 (%)	EMC(mg/l)				
					CODCr	BOD5	SS	TN	TP
영운1	1차	24	4,230.2	78.1	82.5	22.9	272.8	23.4	3.7
	2차	5	1,324.0	28.1	154.3	24.4	9.9	17.8	1.1
	3차	19	3,290.0	33.7	42.1	15.4	5.9	6.3	0.2
영운2	1차	24	4,162.6	56.4	349.6	102.8	349.3	50.9	5.5
	2차	5	790.9	73.2	296.4	400.5	123	35.8	3.8
	3차	19	3,292.0	35.0	394.4	145.5	60.4	61.6	2.7
용암-1	1차	24	13,498.0	86.6	82.3	33.4	207.3	24.7	2.6
	2차	5	3,608.2	29.5	191.7	180.2	57.5	17.9	3.6
	3차	19	10,870.9	87.5	50.9	16.1	6	4.5	0.2

일반적으로 강우특성과 유출특성의 상관 관계는 양의 상관관계를 보이는 것이 옳으나 Figs. 3 ~ 5 에서 나타난 각 항목별 차트는 상관관계를 분석하기에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 지점 및 항목에 공통적으로 주는 인자를 선별하여 전 지점에 영향을 주는 인자를 선정하였다.

3.2 유출특성 지배인자 분석

실측된 자료를 바탕으로 유출수 특성에 영향을 주는 인자를 분석하였다. 최대 우도 인자 분석 전 주성분 분석을 수행하여 최초 요인을 추출한 뒤 요인 행렬로부터 인자의 수를 결정하였다.

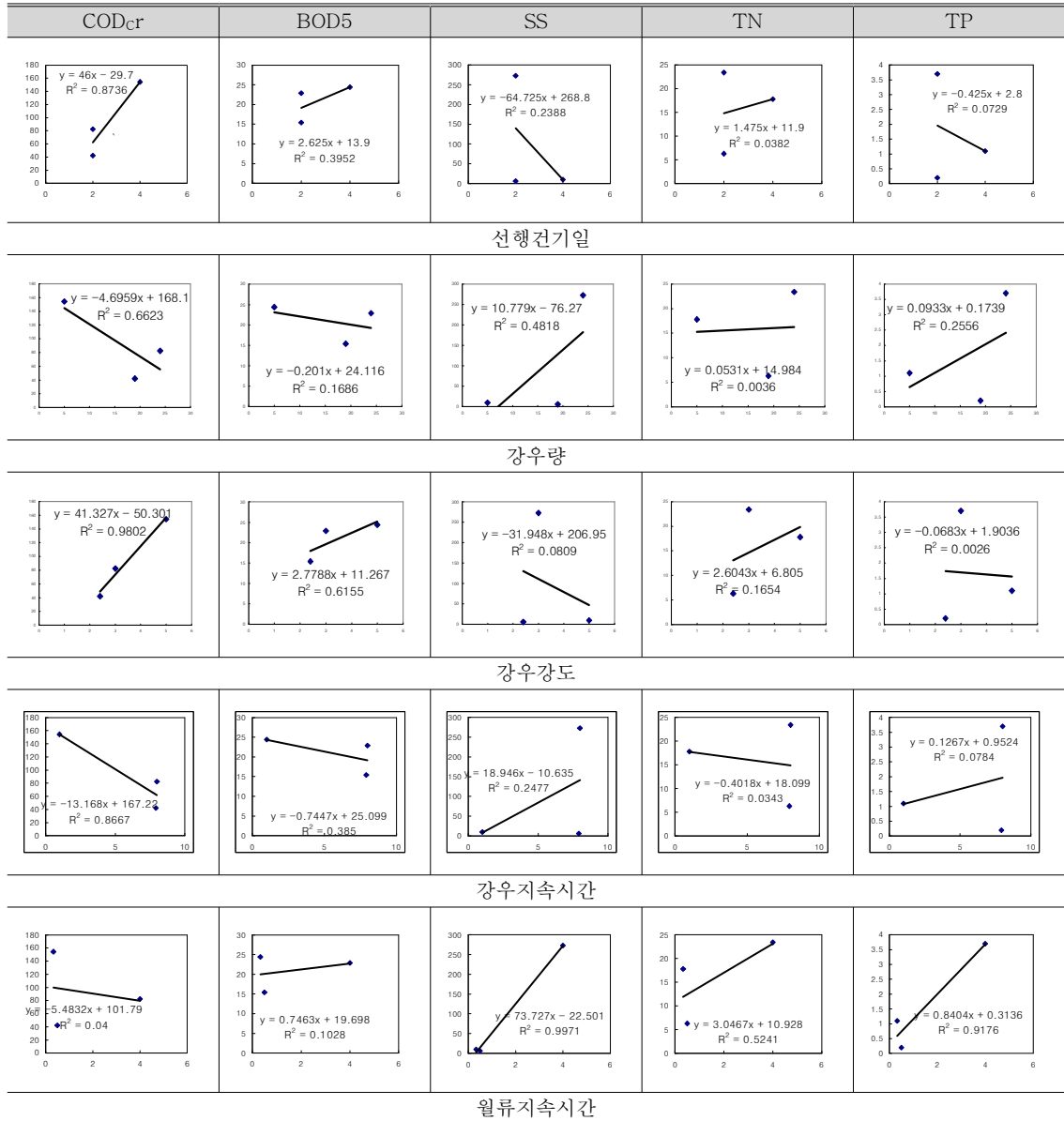


Fig. 3. Correlation of drainage characteristic with EMC(YoungUn1)

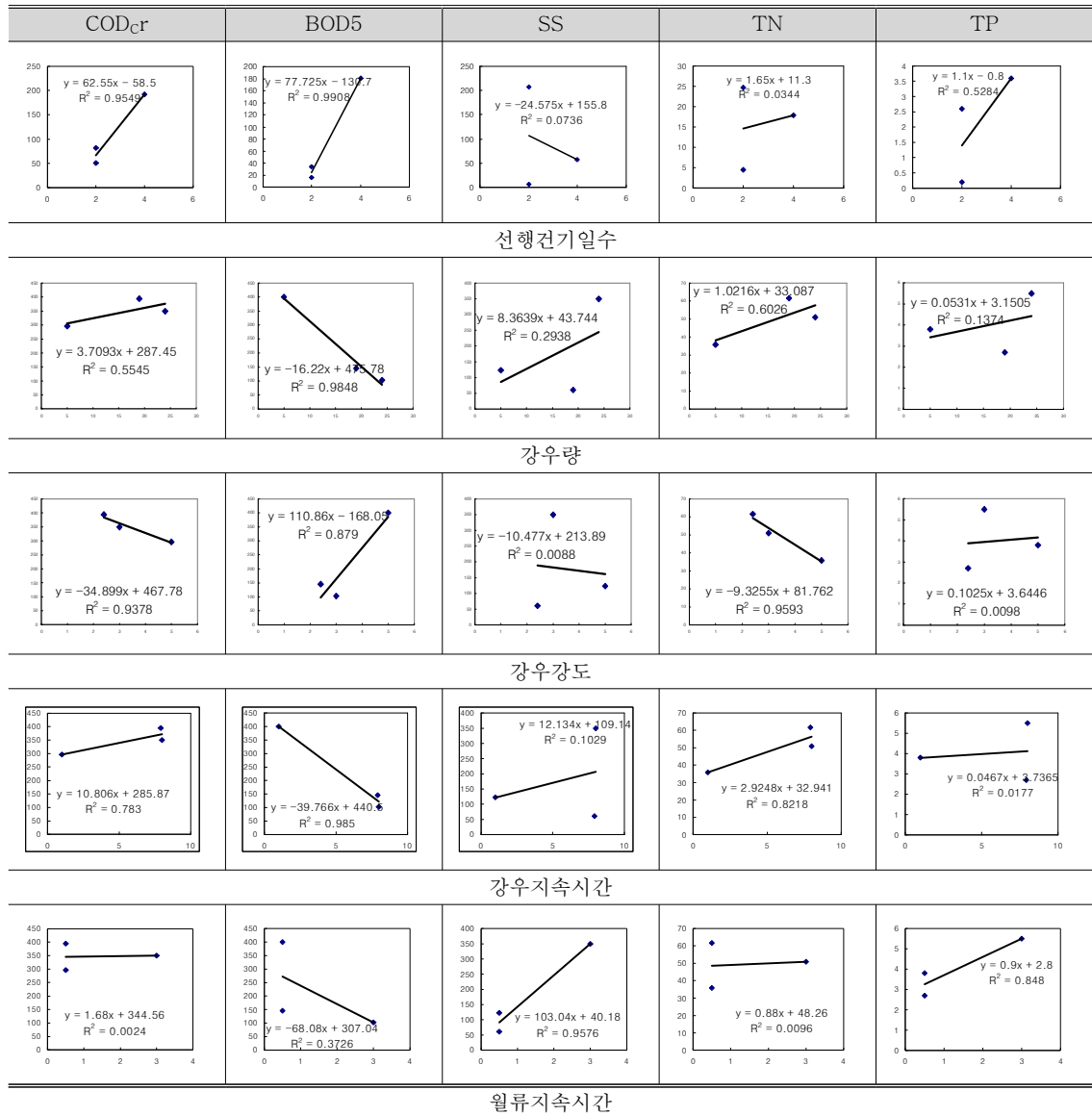


Fig. 4. Correlation of drainage characteristic with EMC(YoungUn2)

Table 2는 인자 적재를 나타낸 것으로 양의 방향으로 가장 높이 적재된 값을 보이는 변수를 지배인자1, 지배인자 2로 선정하였다.

COD_{Cr}에 대한 주성분 분석결과 요인1, 요인2가 전체 변동성의 96%를 나타내어 최대우도 분석 시 2개의 인자를 추출하였다. 최대우도 분석결과 지배인자 1로 선행건기일수가 선정되었고 지배인자 2는 나타나지 않았다. BOD₅의 경우 주성

분 분석결과 요인1, 요인2가 전체 변동성의 97%를 나타내어 최대우도 분석 시 2개의 인자를 추출하였다. 최대우도 분석결과 지배인자 1로 선행건기일수, 지배인자2로 강우강도가 선정되었으며 각각의 설명력은 40%, 4%로 나타났다. SS의 주성분 분석결과 요인1, 요인2가 전체 변동성의 99%를 나타내어 최대우도 분석 시 2개의 인자를 추출하였다.

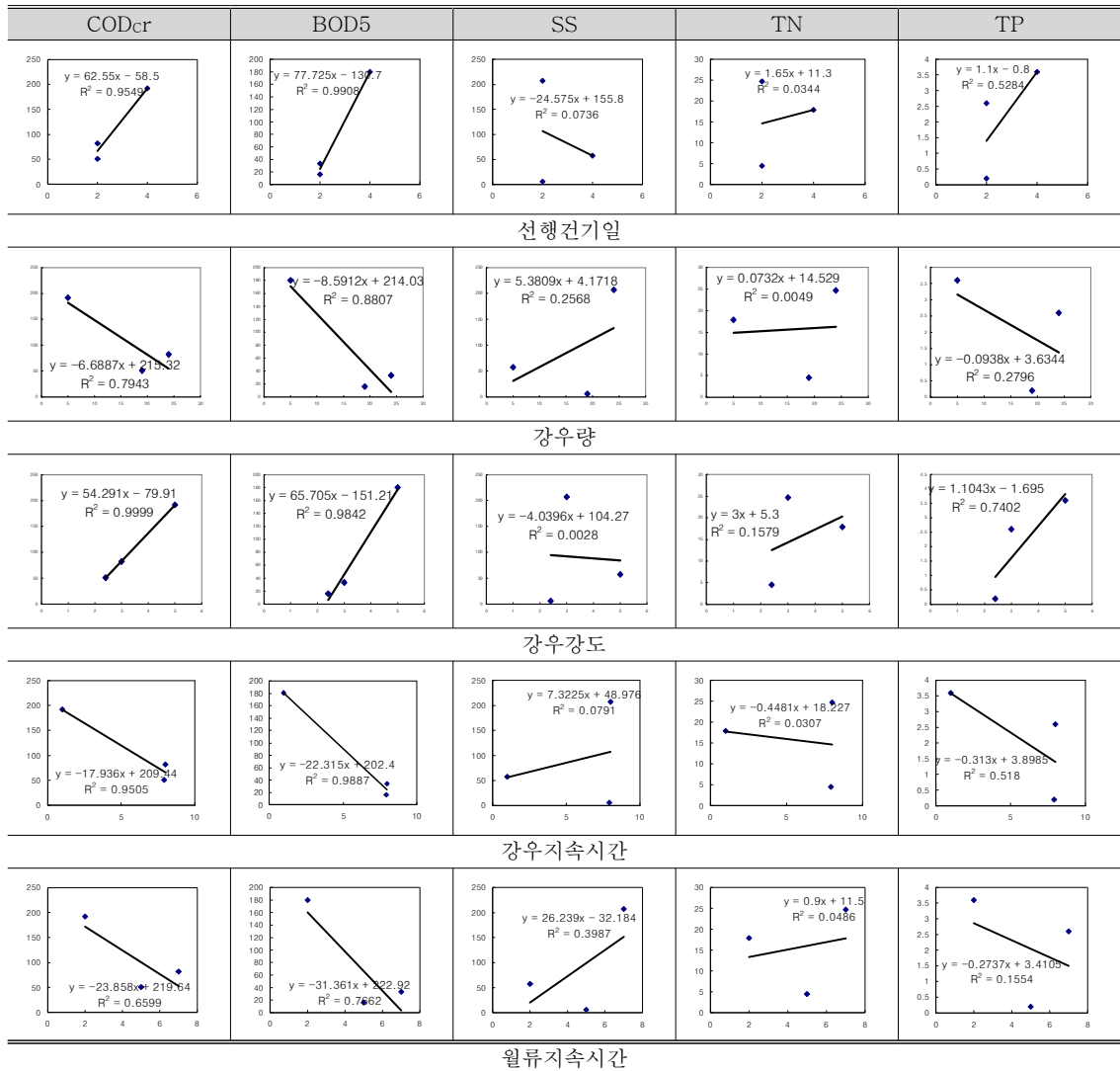


Fig. 5. Correlation of drainage characteristic with EMC(YongAm1)

Table 2. Analysis of dominant parameter

최대우도분석	CODcr		BOD		SS		TN		TP	
	Factor 1	Factor 2	Factor 1	Factor 2	Factor 1	Factor 2	Factor 1	Factor 2	Factor 1	Factor 2
강우량	-4.08	0.002	-0.674	-0.675	0.885	-0.466	0.690	-0.001	0.630	-0.631
선행건기일수	0.163	-0.001	0.707	0.706	-0.974	0.226	-0.851	0.001	-0.529	0.528
강우강도	-0.058	-0.001	0.697	0.696	-1.00	0.006	-0.946	-0.001	-0.413	0.411
지배인자	선행건기일수	-	선행건기일수	강우강도	강우량	선행건기일수	강우량	-	강우량	선행건기일수
설명력(%)	5	-	40	4	69	28	52	-	23	23

최대우도 분석결과 지배인자 1로 강우량, 지배인자2로 선행건기일수가 선정되었으며 각각의 설명력은 69%, 28%의 높은 설명력을 지닌 지배인자가 선정되었다. TN에 대한 주성분 분석결과 요인1, 요인2가 전체 변동성의 97%를 나타내어 최대우도 분석시 2개의 인자를 추출하였다. 최대우도 분석결과 지배인자 1로 강우량이 선정되었으며 지배인자 2는 나타나지 않았다. TP의 주성분 분석결과 요인1, 요인2가 전체 변동성의 98%를 나타내어 최대우도 분석시 2개의 인자를 추출하였다. 최대우도 분석결과 지배인자 1로 강우량, 지배인자2로 선행건기일수가 선정되었으며 각각의 설명력은 23, 23%의 설명력을 지닌 지배인자가 선정되었다.

요인분석 결과 SS를 제외한 다른 항목에서는 높은 설명력을 지닌 지배인자를 발견하는데 어려움이 있었다. 이렇듯 지배인자의 설명력이 부족한 이유는 첫째, 관측자료의 수가 부족하여 데이터의 변동성을 잘 설명하지 못하기 때문이고 둘째, 강우시 퇴적물질의 재 부유등과 같은 관내 농도변화 양상이 더욱 활발히 진행되었기 때문이라고 판단된다.

3.3 회귀 방정식 산출

3.2에서 분석된 지배인자를 토대로 회귀 방정식을 산출하였다. 산출된 결과는 Table 3~5에 나타내었다. 항목 중 CODcr, TN은 선정된 지배인자의 부족으로 회귀식 산출에 어려움이 있어 결과에서 제외하였다.

Table 3. Analysis of calculation result - BOD₅

Predictor	coef	SE coef	T	P
Constant	-85.7	136.6	-0.63	0.554
선행건기일수	84.3	192.5	0.44	0.677
강우강도	-9.9	163.3	-0.06	0.953
R ²	60.9%			

$$BOD_5 = -86 + 84a - b$$

a = 선행건기일수 b = 강우강도

Table 4. Analysis of calculation result - SS

Predictor	coef	SE coef	T	P
Constant	-1680.9	349.3	-4.81	0.003
강우량	50.5	9.1	5.6	0.001
선행건기일수	373.0	77.4	4.82	0.003
R ²	85.7%			

$$SS = -1681 + 373a + 50.5b$$

a = 선행건기일수 b = 강우량

Table 5. Analysis of calculation result - TP

Predictor	coef	SE coef	T	P
Constant	-19.907	9.245	-2.15	0.075
선행건기일수	4.960	2.049	2.42	0.052
강우량	0.5800	0.2402	2.41	0.052
R ²	49.8%			

$$TP = -19.9 + 4.96a + 0.580b$$

a = 강우량 b = 선행건기일수

세 개의 항목에 대한 다중회귀 분석결과 SS에 대한 관계식이 R² 값이 85.7%이고 p값이 0.003으로서 통계적으로 유의한 결과가 나왔다. BOD₅와 TP 항목은 R² 값이 각각 60.9%, 49.8% p-값이 0.5, 0.075로서 전체 변동성 회귀식에 의해 설명되는 변동이 있으나 p-값이 유의하지 못하여 통계적 유의성을 확인하는데에 어려움이 있다. 이는 자료의 부족이 통계적 오차를 줄이지 못한 것이 원인으로 보이며, 향후 추가 자료 확보를 통해 오차를 줄여나가고 요인관 관계에 대한 추가적 연구를 통해 일반화 할 수 있는 회귀식을 만들어야 할 것이다.

4. 결론 및 향후연구과제

강우시 도시배수구역의 유출특성 지배인자 분석에 관한 연구는 다음과 같다.

- 1) 조사기간 동안 강우량은 청주시24mm.

5mm, 19mm, 보은군 38mm, 16.5mm 였으며 강우에 의한 방류선 평균유입농도는 CODcr 82mg/l~250mg/l, BOD5 54mg/l~320mg/l, SS 94mg/l~250mg/l, TN 8mg/l~24mg/l. TP는 0.8~3mg/l의 범위로 증가되었다.

2) 대상지역의 유출특성을 지배하는 인자는 아래와 같다.

최대우도분석		지배인자	설명력(%)
CODcr	Factor1	선행건기일수	5
	Factor2	-	-
BOD	Factor1	선행건기일수	40
	Factor2	강우강도	4
SS	Factor1	강우량	69
	Factor2	선행건기일수	28
TN	Factor1	강우량	52
	Factor2	-	-
TP	Factor1	강우량	23
	Factor2	선행건기일수	23

3) 선정된 지배인자를 통해 산출한 회귀식은 다음과 같다.

$$BOD_5 = -86 + 84a - b$$

a = 선행건기일수 b = 강우강도

$$SS = -1681 + 373a + 50.5b$$

a = 선행건기일수 b = 강우량

$$TP = -19.9 + 4.96a + 0.580b$$

a = 강우량 b = 선행건기일수

본 연구는 청주시를 대상으로 도시배수구역의 유출특성을 분석하고 이에 영향을 미치는 인자를 추출 및 분석할 수 있는 통계적 분석방법을 제시하였다. 향후 연구 목표로는 진술한 바와 같이 유역특성과 오염부하특성의 관계등 인자간 영향에 대한 추가적인 연구와 장기적인 자료의 확보, 유출특성 지배인자의 최소화, 좀더 명확한 선형.비선형 회귀 방정식의 작성, 산출된 회귀식의 검증물

목표로 진행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2007년 금강물환경연구소 “하수관거 유입오염물질의 배출경로별 오염부하 조사 분석” 연구사업에 의해 이루어진 점음.

참고 문헌

- Ha SungRyoung, T.S(1989) Behavioural Effect of Non-point Source Loads on Urban Storm Pollution Runoff Characteristics, Tech. Rept. Of the Osaka Univ. - Vol.39, No.1958
- Yaziz M.I. Gunting H., Sapari N. Ghazalli A. W.,(1989), Variation in rainwater quality from roof catchments, Water Resource, Vol. 23, No. 6
- Thomas P.R Greene G. R(1993) Rainwater quality from different roof catchment, Water science technology, 28(3-5)
- Malina(1995) Document Title Characterization of Highway Runoff in the Austin, Texas Area, Center for Research in Water Resources, Volume/Issue no.263
- M. Kayhaniana(1996) haracterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration, Volume 30, Issue 5
- Kapil Gupta and Adrian J. Saul (1996) Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows, Volume 32, Issue 8
- Atsushi Ichiki, T.O, K.Y.(1998) “Estimation of urban nonpoint source pollution in Lake Biwa Basin”, Water Science and Technology, Volume 38, Issue 10
- 정동일(1998) 지리정보체계를 이용한 오염물질 유출해석 및 삭감량 배분에 관한 연구, 고려대학

교 박사학위 논문

- 청주시(2001) 청주시 하수도정비 기본계획 변경보고서
- 김성수의 4명(2002) 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사, 대한환경공학회지, Vol. 24, No. 11
- 양해근(2003) 강우시 비점오염물질의 유출특성에 관한연구, 대한지리학회지, Vol. 41, No. 4
- 김석구의 5명(2004) 강우강도에 따른 노면유출수의 유출 특성, 한국물환경학회, Vol. 20, No. 5
- 청주시(2005) 청주시 오염총량관리 기본계획
- 이레테크(2005) 새 Minitab 실무완성
- 류근관(2006) 통계학, 법문사
- 김석구의 4명(2006) 강우에 의한 도로 비점오염원 유출특성, 대한환경공학회지, Vol. 28, No. 1
- 선우중호(2006) 수문학, 동명사
- 이창수(2007) 강우특성이 우수수질에 미치는 영향 한국환경과학회지, 제16권, 제7호
- 강용태(2007) 초기강우에 의한 공업지역내의 비점오염원 유출특성에 관한연구, 한국 수처리 학회지, Vol. 15, No. 1, pp. 59-68
- 국립환경과학원(2007), 하수관거 유입오염물질의 배출경로별 오염부하 조사 분석, 금강물환경연구소