한국환경과학회지 제19권(제7호), 907～915, 2010
Journal of the Environmental Sciences

포도밭에 대한 비점오염물질 유출량 추정 모델식 개발

윤영삼* · 권헌각 · 이윤정 · 유재정 · 이재관
국립환경과학원 낙동강물환경연구소
(2010년 4월 30일 접수; 2010년 5월 31일 수정; 2010년 6월 22일 채택)

Development of Nonpoint Sources Runoff Load Estimation Model Equations for the Vineyard Area

Young-Sam Yoon*, Hun-Gak Kwon, Youn-Jung Yi, Jay-Jung Yu, Jae-Kwan Lee
Nakdong River Water Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong 717-873, Korea
(Manuscript received 30 April, 2010; revised 31 May, 2010; accepted 22 June, 2010)

Abstract

Agriculture nonpoint pollution source is a significant contributor to water quality degradation. To establish effective water quality control policy, environpolitics establishment person must be able to estimate nonpoint source loads to lakes and streams. To meet this need for orchard area, we investigated a real rainfall runoff phenomena about it. We developed nonpoint source runoff estimation models for vineyard area that has lots of fertilizer, compost specially between agricultural areas. Data used in nonpoint source estimation model gained from real measuring runoff loads and it surveyed for two years(2008-2009 year) about vineyard. Nonpoint source runoff loads estimation models were composed of using independent variables(rainfall, storm duration time(SDT), antecedent dry weather period(ADWP), total runoff depth(TRD), average storm intensity(ASI), average runoff intensity(ARI)). Rainfall, total runoff depth and average runoff intensity among six independent variables were specially high related to nonpoint source runoff loads such as BOD, COD, TN, TP, TOC and SS. The best regression model to predict nonpoint source runoff load was Model 6 and regression factor of all water quality items except for was R^2=0.85.

Key Words : Nonpoint source, Storm runoff, Pollution load estimation model

1. 서 론

비점오염물질은 현재 호소 및 하천의 수질문제에 있어서 가장 중요한 이슈 중 하나로 떠올랐으며, 토지이용 특성이나 강우사상, 지역별 우수·오수 관리시스템 등 다양한 요인에 따라 발생정도가 다르므로 시간적·공간적 특성에 따른 발생오염물질의 정량화가 매우 어려우며, 점오염원에 비해 비교적 오염 농도는 낮지만 절대량이 크기 때문에 비점오염원에 대한 적정 관리가 이루어지지 않고서는 수계환경개선 및 수질기준을 달성하기 어렵다(최 등, 1995). 이러한 비점오염물질은 강우와 함께 하천 및 호소로 유입되어 하천 및 호소의 수질에 중요한 영향을 미친다(권, 1998, 방 등, 1997, 방 등, 2000). 또한 비점오염 물질의 유출 현상은 강우 특성과 밀접한 관련을 가지고 있으며, 강우유출은 토지이용, 경사도, 식생, 강우강도, 강우량, 선행무강우일수 등에 따라 각기 다른 유출 특성을 보인다(Patrick과 Teresa, 2002). 그러므로 다양한 수문인자들 사이의 관계를 통하여 다중회귀식을 수립하는 것

* Corresponding Author : Young-Sam Yoon, National Institute of Environmental Research, Goryeong 717-873, Korea
Phone : +82-54-950-9711
E-mail: ysyoon3sf@korea.kr

이 비점오염물질의 발생량을 예측하는데 신뢰도 및 상관도를 높일 수 있다. 그러나 이를 수행하기 위해서는 다중 상관관계 분석을 위한 인자별 입력자료에 대한 다량의 수문자료가 필요하며, 기존 축적된 장기간 수문자료가 많지 않을 경우 다중회귀식이 일차회귀식보다 신뢰성이 떨어질 수 있다(최 등, 1995, 이 등, 2009).

비점오염물질의 유출에 영향을 미치는 이러한 다양한 인자들의 영향으로 인해 비점오염물질 유출량 추정의 정량화를 위해서는 강우지속시간 동안의 정확한 유량과 수질에 대한 실측자료가 요구되고, 실측된 자료를 바탕으로 각 인자들 간의 영향정도 파악이 최우선적으로 실시되어야 한다(박과 박, 2004).

따라서 본 연구에서는 강우에 의해 발생되는 비점오염물질 유출량에 직접적인 영향을 미치는 수리수문 인자들인 강우량, 총 유출고, 강우강도, 유출강도, 선행무강우일수, 강우지속시간 등을 독립변수로 하여, 이러한 수문인자들과 비점오염물질의 유출량 사이의 관계를 통하여 다중회귀식을 수립하여 비점오염물질 유출량 추정에 신뢰도 및 상관도를 높일 수 있는 모델식을 개발하고자한다. 그러나 이를 수행하기 위해서는 다중 상관관계 분석을 위한 인자별 입력 자료에 대한 장기간 조사된 다양한 강우-유출 자료가 필요하다. 이에 본 연구에서는 2008~2009년 과수원재배지에서 실측된 값을 기초 자료로 하여, 강우 시 비점오염물질의 유출에 관련된 변수들의 상관성 분석을 통해 강우유출에 영향을 미치는 인자들에 대한 상관정도를 조사하였다. 아울러 강우-유출에 영향을 미치는 유출 변수를 선형 및 선형변환모델에 적용하여 적정성을 검토하였으며, 수질항목별 비점오염물질 유출량 추정 최적 모델을 개발하여 실측이 어려운 다양한 강우조건에 대해 비점유출량을 모의 발생시켜 유역 수질관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 조사지점 특성

Fig. 1에 도시된 바와 같이 조사 대상 지점은 경주시 서면 심곡리에 위치한 포도밭 2개 지점으로, 포도밭_A의 경우 밭의 좌, 우면은 논으로 되어 있으며, 둑이 설치되어 있어 논에서 밭으로의 강우유출수의 유입은 없었다. 밭의 앞, 뒷면의 경우 콘크리트 포장을 한 도로가 있으며, 그 도로와 밭 사이에 배수로가 있어 밭에서의 유출은 밭의 뒤쪽 배수로의 유출구를 통해 이루어지고 있었다.

Fig. 1. Location of sampling sites

포도밭 A 면적은 폭 20 m, 길이 100 m로 2,000 ㎡이며 밭 내부에 다른 작물을 재배 하지 않아 포도밭의 특성을 살펴볼 수 있었다. 포도밭_B 지점의 경우 좌, 우면은 논으로 되어있으며, 최종배출구가 위치한 지점의 경우 콘크리트재질의 농업용 도로가 위치해 있어 외부로 부터의 유입은 없었으며, 면적은 폭 20 m, 길이 90 m로 1800 ㎡이었다. 본 조사 지점에서 가장 가까운 곳에 위치한 강우관측소로는 건천관측소가 있으며, 1998년～현재까지 운영 중이다.

2.2. 입력 변수

수질항목별 비점오염물질 유출 부하량 추정을 위한 독립변수로는 강우량(X1), 강우지속시간(X2), 선행무강우일수(X3), 총 유출고(X4), 강우강도(X5), 유출강도(X6)를 사용하였다.

종속변수로 사용된 수질항목별 비점오염물질 유출부하량 값들은 2008년, 2009년 비점오염물질에 대한 현장 모니터링을 통해 총 19회 실측된 값들을 사용 하였다(신 등, 2008, 이 등, 2009). Table 1에 수록된 바와 같이 포도밭에서 유출이 발생한 조사대상 강우량의 최소와 최대값은 각각 16.5 mm, 79.7 mm로 최대값에 대한 최소값의 비는 4.83이었다. 반면 수질항목별 유출부하량의 경우 최대값과 최소값의 비는 BOD 30.4, COD 14.4, TOC 27.1, SS 23.5, TN 20.3, TP 52.4로서 강우량의 변화에 대해 수질항목별 유출부하량은 대단히 넓은 범위의 변화 양상을 나타내었다. 특

Table 1. The average and range values of input data

	unit	ave.	range
BOD	kg/㎢	39.51	4.69 ~ 142.47
COD	kg/㎢	111.79	20.18 ~ 290.69
TOC	kg/㎢	54.72	6.87 ~ 185.89
SS	kg/㎢	1,661.62	259.93 ~ 6,112.49
TN	kg/㎢	18.17	2.18 ~ 44.16
TP	kg/㎢	4.03	0.46 ~ 24.09
Rainfall	㎜	43.81	16.50 ~ 79.70
SDT	hour	8.84	2.83 ~ 16.46
ADWP	day	3.74	1 ~ 8
TRD	㎜	11.83	1.34 ~ 33.22
ASI	㎜/h	5.52	2.03 ~ 9.29
ARI	㎥/h	3.08	0.32 ~ 7.06

히 TP의 경우 최대 유출부하량과 최소 유출부하량의 비가 52.4배로서 강우량의 변화폭에 비해 약 10배의 변화폭을 보이므로 조사대상 수질항목들 중 강우량의 변화에 대단히 민감하게 반응하였다.

2.3. 상관성 분석

수질항목별 비점오염물질 유출부하량과 독립변수들 간의 상관관계 분석은 SPSS 12.0K를 사용 하였으며, 상관계수는 Pearson 상관계수를 사용하였고, 각 변수들은 정규분포를 따른다는 가정을 하였다. 상관계수 값의 범위는 -1부터 +1까지 이며, 계수의 부호는 관계의 방향을 가리키고 절대값은 관계의 강도를 나타낸다.

유의성 검정은 양측검증으로 하였고, 유의한 상관계수에 대해서는 별표시를 하였으며, 1개의 별표시는 0.05 수준에서 유의한 상관계수를 나타내며, 2개의 별표시는 0.01 수준에서 유의한 상관계수이다.

오염물질별 각 변수들에 대한 상관성 분석 시 결정계수 50%이상, 유의확률 95%이상에 해당하는 항목만을 선택하여 선형 및 선형변환모델에 적용하는 인자로 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질항목별 상관성 분석

수질항목별 비점오염물질 유출부하량에 영향을 미치는 독립변수로 선택한 강우량, 강우지속시간, 선행무강우일수, 총 유출고, 강우강도, 유출강도와 종속변수로 선택한 BOD, COD, TOC, SS, TN, TP 유출부하량과의 상관성 분석결과를 Table 2에 수록하였으며, Table 2에 수록된 바와 같이 독립변수로 제시된 6개의 비점오염물질 유출 영향 인자들 중 선행무강우일수와 강우강도의 경우 비점오염물질의 유출에 대한 영향정도가 낮은 것으로 조사 되었다. 선행무강우일수의 경우 초기세척효과에는 높은 영향정도를 보이나 총 유출고에 대한 영향은 낮게 나타났으며, 강우강도 역시 선행무강우일수와 유사하게 비점오염물질의 유출부하량에 대한 영향 정도는 낮게 나타났다. 비점오염물질의 유출에 가장 큰 영향을 미치는 변수로는 강우량과 총유출고로 나타났으며, 이는 종속변수로 사용된 수질항목별 비점오염물질 유출부하량의 경우 강우에 의한 유출수의 량에 직접적으로 비례하여 높아짐을 확인 할 수 있다.

오염물질별(수질항목) 유출에 영향을 미치는 6개의 독립변수 들 중 상관계수 50%이상, 유의확률 95%이상에 해당하는 강우량, 강우지속시간, 총 유출고, 유출강도 등 4개의 변수들을 우선 적으로 각 수질항목별 비점유출량 추정 모델식의 독립변수의 후보군으로 선택하였다. 수질항목별 비점오염물질 유출량 추정 모델식을 개발하기 위해 각 수질 항목 별 비점오염물질 유출부하량에 영향을 미치는 독립변수를 살펴보면 BOD, COD, SS, T-N은 동일하게 강우량, 강우지속시간, 총 유출고, 유출강도에 가장 큰 영향을 받는 것으

로 나타났으며, TOC와 T-P의 경우 강우량, 총 유출고, 유출강도의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. SS를 제외한 조사대상 모든 수질항목들의 독립변수에 대한 상관계수는 특히 총 유출고와 Person 상관계수 “0.7” 이상으로 높은 상관도를 나타내었다. 반면 SS의 경우 강우량, 강우지속시간, 총 유출고, 강우강도에 영향을 받는 것으로 조사되었지만, 다른 수질항목에 비해 낮은 상관계수(0.464~ 0.552)를 나타내었다.

3.2. 비점오염 부하량 추정 모델식 개발

비점오염물질 발생량은 강수량, 유출량, 강우강도, 선행무강우일수, 강우지속시간 등 다양한 수리 · 수문 인자들과 복합적으로 연관되어있다. 그러므로 다양한 수문인자들 사이의 관계를 통하여 다중회귀식을 수립하는 것이 비점오염물질의 발생량을 예측하는데 신뢰도 및 상관도를 높일 수 있다. 그러나 이를 수행하기 위해서는 다중 상관관계 분석을 위한 인자별 입력 자료에 대한 다량의 수문자료가 필요하다.

본 연구에서는 2008년~2009년 과수원재배지에서 실측된 값을 근거 자료로 하여, 강우 시 비점오염물질의 유출에 관련된 변수들의 상관성 분석을 통해 우선순위를 부여하였다. 선정된 변수를 선형 및 선형변환 모델에 적용하여 적정성을 검토하였으며, 오염물질별 최적 모델을 제시하였다.

3.2.1 입력자료

종속변수로 사용된 비점오염물질 유출부하량과 독립변수로 사용된 강우유출 관련 변수들의 경우 2008~2009년까지 실제 현장에서 19회 측정된 결과 치를 이용하였다. 현장에서의 측정은 강우지속시간 및 유출지속시간 동안 전수조사를 수행하였다.

상관성분석은 Pearson 상관관계분석을 수행하였으며, 분석된 결과 치 중 상과계수 50%이상, 유의확률 95%이상에 해당하는 항목만을 선택하여 선형 및 선형변환모델에 적용하는 인자를 구분하였다. 유의성 검정은 양측검증으로 하였고, 유의한 상관계수에 대해서는 별표시를 하였다.

Table 2. Correlation coefficient among nonpoint source runoff variables

		BOD	COD	TOC	SS	TN	TP	X1	X2	X3	X4	X5	X6
BOD	Pearson	1	.726(**)	.619(**)	.612(**)	.779(**)	.326	**.495(*)**	**.543(*)**	.021	**.729(**)**	-.146	**.594(**)**
	P-value		.000	.005	.005	.000	.173	**.031**	**.016**	.932	**.000**	.550	**.007**
COD	Pearson	.726(**)	1	.909(**)	.746(**)	.798(**)	.693(**)	**.827(**)**	**.505(*)**	-.184	**.939(**)**	.125	**.663(**)**
	P-value	.000		.000	.000	.000	.001	**.000**	**.027**	.451	**.000**	.611	**.002**
TOC	Pearson	.619(**)	.909(**)	1	.429	.828(**)	.857(**)	**.865(**)**	.376	-.330	**.961(**)**	.261	**.667(**)**
	P-value	.005	.000		.067	.000	.000	**.000**	.112	.168	**.000**	.280	**.002**
SS	Pearson	.612(**)	.746(**)	.429	1	.526(*)	.156	**.464(*)**	**.462(*)**	.088	**.552(*)**	-.099	.454
	P-value	.005	.000	.067		.021	.524	**.046**	**.047**	.720	**.014**	.688	.051
TN	Pearson	.779(**)	.798(**)	.828(**)	.526(*)	1	.621(**)	**.786(**)**	**.488(*)**	-.220	**.806(**)**	.152	**.544(*)**
	P-value	.000	.000	.000	.021		.005	**.000**	**.034**	.365	**.000**	.534	**.016**
TP	Pearson	.326	.693(**)	.857(**)	.156	.621(**)	1	**.686(**)**	.194	-.363	**.754(**)**	.302	**.531(*)**
	P-value	.173	.001	.000	.524	.005		**.001**	.426	.127	**.000**	.209	**.019**
X1	Pearson	.495(*)	.827(**)	.865(**)	.464(*)	.786(**)	.686(**)	1	.429	-.323	.806(**)	.394	.485(*)
	P-value	.031	.000	.000	.046	.000	.001		.067	.178	.000	.095	.036
X2	Pearson	.543(*)	.505(*)	.376	.462(*)	.488(*)	.194	.429	1	.330	.422	-.560(*)	-.013
	P-value	.016	.027	.112	.047	.034	.426	.067		.168	.072	.013	.958
X3	Pearson	.021	-.184	-.330	.088	-.220	-.363	-.323	.330	1	-.331	-.569(*)	-.487(*)
	P-value	.932	.451	.168	.720	.365	.127	.178	.168		.166	.011	.035
X4	Pearson	.729(**)	.939(**)	.961(**)	.552(*)	.806(**)	.754(**)	.806(**)	.422	-.331	1	.152	.770(**)
	P-value	.000	.000	.000	.014	.000	.000	.000	.072	.166		.534	.000
X5	Pearson	-.146	.125	.261	-.099	.152	.302	.394	-.560(*)	-.569(*)	.152	1	.342
	P-value	.550	.611	.280	.688	.534	.209	.095	.013	.011	.534		.152
X6	Pearson	.594(**)	.663(**)	.667(**)	.454	.544(*)	.531(*)	.485(*)	-.013	-.487(*)	.770(**)	.342	1
	P-value	.007	.002	.002	.051	.016	.019	.036	.958	.035	.000	.152	

※ ** : items that have high correlation, * : items that have intergrade correlation

Table 3. Linear and non-linear correlation equations (1～5:existing models,6～7: proposed models)

Model No.	Loads	Estimation models
1	p (kg/㎢)	$A+B(X_1)+C(X_2)+D(X_3)+E(X_4)+F(X_5)+G(X_6)$
2		$A+B\ln(X_1)+C\ln(X_2)+D\ln(X_3)+E\ln(X_4)+F\ln(X_5)+G\ln(X_6)$
3		$A(X_1)^B(X_2)^C(X_3)^D(X_4)^E(X_5)^F(X_6)^G$
4		$A+B\ln(X_1)+C\ln(X_2)+D\ln(X_3)+E\ln(X_4)+F(X_5)+G(X_6)$
5		$A+B(X_1)+C(X_2)+D(X_3)+E(X_4)+F\ln(X_5)+G\ln(X_6)$
6		$A+X_1^B\times X_4^E+C\ln(X_2)+D\ln(X_3)+F\ln(X_5)+G\ln(X_6)$
7		$A+X_1^B\times X_4^E\times X_6^G+C\ln(X_2)+D\ln(X_3)+F\ln(X_5)$

※ P : nonpoint source runoff load(㎏/㎢)

3.2.2. 모델의 선정

모델의 선정은 결정계수와 유의 확률 값을 기준으로 하였고, 동일한 오염물에 대해 2～3개의 모델이 비슷한 R^2 값을 가질 때는 각각의 독립변수 중 정확한 자료획득가능성을 고려해서 입력변수가 적은 모델을 선택하였다. 또한 모델식에 포함된 상수값인 B～G의 값이 "-"로 최적적합되는 경우 자연현상과 반대되는 수질항목별 유출부하량 값을 모의 발생시키기 때문에 모델에 포함된 B～G 값이 "-"를 갖는 경우 상관계수의 값과는 관계없이 제외하였으며, 유의도가 없는 독립변수들이 존재하거나 다중 공선성의 존재여부를 검토한 후 변수는 취사선택 하였다. 다중공선성의 검토는 독립변수간의 상관계수가 높을 경우 변수전체를 포함한 회귀식은 다중공선성을 의심하였으며, 분산분석표에서 모델의 적합성을 나타내는 F 값과 R2 이 높음에도 각 독립변수에 대한 모수추정치의 결과를 비교해 유의한 변수를 선택하였다.

3.2.3. 모델의 유의성 평가

유의성 검증은 종속변수(P)와 독립변수(Xi)간에 선형관계를 규명하는 검증으로 귀무가설(H0)와 대립가설(H1)을 설정하여 귀무가설이 기각되면 종속변수 중 적어도 하나는 영향을 미친다는 것을 의미한다.

H0 : A=B=C=D=E=F=0

H1 : A ~ F ≠ 0 (하나의 계수는 '0'이 아니다)

귀무가설의 검증방법으로는 F-검정을 이용하였고, 귀무가설이 기각되어 선형관계가 검정되면 각 회귀계수에 대해 t-검정을 이용하여 유의성 검정을 하였다. F와 t-검정 결과, P-값이 0.01(1% 유의수준)보다 작으면 매우 유의한 수준으로, 0.01과 0.15사이에 있으면 보통 유의한 수준, 0.15보다 크면 유의하지 않은 것으로 판정한다. 본 연구에서는 P<0.15 수준에서 의미가 있는 것만 선택하였다.

각 변수들 간의 상관성 분석 결과 초기에 선정하였던 6개의 독립변수 중 강우량, 강우지속시간, 총유출고, 유출강도가 비점오염물질의 유출부하량과 상관성이 높게 나타났다.

선정된 변수의 경우 BOD, COD, T-N, SS의 경우 동일한 독립변수들에 의한 영향을 받는 것으로 조사되었고, TOC, T-P의 경우도 유사한 변수들의 영향을 받는 것으로 조사 되었다.

선정된 변수에 대해 선형 및 선형 변형식에 적용한 결과 R^2 와 $_{adj}R^2$ 의 차이가 낮게 조사되었는데 수정된 R^2 값의 경우 연구자가 세운 모델이 얼마나 일반성을 가정하고 합리적인지를 R^2 값과의 비교를 통해 알 수 있는데, BOD의 경우 그 차이가 0.01로서 수정되었을 경우 1%의 변산이 줄어들었다. 나머지 항목들도 1 ~ 6%까지 변산이 줄어드는 것으로 조사 되었다.

Table 4. Relevant variables by pollutants

Items	Relevant variables
BOD	X1, X2, X4, X6
COD	X1, X2, X4, X6
TOC	X1, X4, X6
SS	X1, X2, X4, X6
T-N	X1, X2, X4, X6
T-P	X1, X4, X6

Table 5. R square by models

Items		1	2	3	4	5	6	7
BOD	R^2	.79	.87	**.96**	.81	.81	**.92**	.79
	$_{adj}R^2$	.70	.82	**.94**	.73	.73	**.83**	.70
COD	R^2	.96	.94	**.97**	.93	.96	.96	.96
	$_{adj}R^2$	.94	.91	**.96**	.90	.95	.95	.94
TOC	R^2	.98	.92	.98	.92	.98	.98	**.99**
	$_{adj}R^2$	.97	.90	.97	.90	.97	.97	**.98**
SS	R^2	.58	.62	.61	.64	.59	**.64**	.58
	$_{adj}R^2$	.41	.46	.45	.49	.42	**.52**	.40
TN	R^2	.88	**.92**	.89	.92	.91	.91	.89
	$_{adj}R^2$	.82	**.88**	.84	.88	.88	.87	.84
TP	R^2	.79	.70	.90	.70	.79	**.92**	.87
	$_{adj}R^2$	.72	.60	.86	.61	.72	**.89**	.84

Table 6. Selected models and R square

	Model	Loads	Equations	R^2
BOD	6	p (kg/㎢)	$(X_1)^{0.4423}(X_4)^{0.6287} + 8.2392\ \ln(X_6)$	0.92
COD	3		$(X_1)^{0.5162}(X_2)^{0.6353}(X_4)^{0.5336}$	0.97
TOC	7		$(X_1)^{0.5532}(X_4)^{0.7623}$	0.99
SS	6		$(X_1)^{1.2827}(X_4)^{0.1868} + 672.4619\ \ln(X_2)$	0.64
TN	2		$-46.7093 + 13.1009\ \ln(X_1) + 8.0322 \ln(X_4)$	0.92
TP	6		$-6.9154 + (X_1)^{0.5725}(X_4)^{0.2817}$	0.92

2년간에 걸쳐 측정된 강우량, 선행무강우일수, 강우지속시간, 총 유출고, 유출강도, 강우강도 등의 자료를 활용하여 이들 변수와 비점오염물질 별 유출부하량과의 통계분석을 통해 비점오염물질 별 유출부하량에 영향을 미치는 변수들의 영향 정도를 구하였다. 유출에 미치는 영향정도가 큰 변수들을 활용하여 수질항목별 비점오염물질 유출부하량 추정 모델식을 제시하였다. 추정된 모델식은 특히 유기물 항목에 대해 높은 유의성을 보였다. 현재의 결과는 19회 현장 측정자료를 이용하여 수행하였지만, 도출된 식의 신뢰도 향상을 위해 지속적으로 실측결과를 추가 할 계획이며, 아울러 지목을 확대하여 비점오염물질 유출부하량 추정 모델식의 일반화를 동시에 추구할 예정이다.

3.2.4. 비점부하량 추정 모델식의 활용

기존 연구자(모델1-5) 및 본 연구(모델6-7)에서 제안한 총 7개의 수질항목별 비점오염물질 유출부하량 추정 모델식 들 중 실측치와의 적합도가 높은 Table 2에 수록된 모델을 선정하여 비점오염물질의 유출부하량에 영향이 높은 강우량(X1)과 총 유출고(X4)를 변화시키면서 각 수질항목별 유출부하량을 추정하여 Table 7-8 및 Fig. 1에 수록하였다.

Table 7에는 강우량의 변화가 비점오염물질의 유출에 미치는 영향을 조사하기 위하여 강우량 범위를 10-200 mm 까지 변화시키면서 수질항목별 유출부하량의 변화를 관찰하였다. Table 7 및 Fig. 1에 수록된 바와 같이 강우량이 증가함에 따라 수질항목별 비점오염물질 유출부하량은 증가하는 경향을 보였지만 증가하는 정도는 수질항목별로 큰 차이를 보였다. 특히 영양염류 항목인 TN과 TP 항목이 강우량의 변화에 대해 민감하게 반응하였으며, 강우량 15 mm 일 때 TN과 TP의 유출부하량은 각각 8.6, 2.5 kg/㎢인 반면

강우량이 10배 증가된 150 mm 일 때 TN 및 TP 각각 38.8, 28.4 kg/㎢으로 TN 4.5배, TP 11.4배 증가하는 결과를 보였다. 반면 BOD와 SS의 경우 15 mm에서 각각 24.9, 1,517 kg/㎢인 반면 강우량 150 mm에서 각각 BOD 52.6, SS 2,447 kg/㎢의 값으로 BOD 2.1배, SS 1.6배 증가하여 TN 및 TP에 비해서는 강우량의 변화에 덜 민감하게 반응하였다.

Table 8에는 총 유출고 변화가 수질항목별 비점오염물질의 유출량에 미치는 영향을 살펴보기 위해 총 유출고의 값을 5-60 mm까지 변화 시키면서 수질항목별 유출부하량의 변화를 조사하여 Table 8에 수록하였다. Table 8에 수록된 바와 같이 강우량의 변화에 비해 총 유출고의 변화는 수질항목별 비점오염물질의 유출부하량 변화에 대한 영향 정도가 낮게 나타났다. 수질항목별로 살펴보면 TOC와 COD의 경우 총 유출고 변화에 대해 비교적 영향을 크게 받았으며, 총 유출고 5 mm에서 50 mm로 10배 증가시킬 경우 TOC 유출부하량 27.6 kg/㎢에서 159.7 kg/㎢으로 5.8배 증가하였으며, COD의 경우 5 mm에서 유출부하량 73.1 kg/㎢, 총 유출고를 10배 증가시킨 50 mm에서 315.7 kg/㎢값으로 4.3배 증가하였다. 반면 SS, TP, TN 및 BOD의 경우 총 유출고 5 mm에서 50 mm로 10배 증가시켰지만 유출부하량의 경우 1.1-3.0배 증가로 그 변화폭이 낮게 나타났다.

또한 Fig. 1에 도시된 바와 같이 수질항목별 강우량 및 총 유출고 변화에 대한 비점오염물질 유출부하량을 비교한 결과 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SS와 TP항목의 변화폭이 크게 나타났다. 강우량과 총 유출고의 값을 유사한 비율로 증가시킨 결과 BOD와 TOC의 변화 양상이 강우량 및 총 유출고의 값이 낮은 범위에서는 TOC의 유출부하량의 변화가 BOD의 유출부하량 변화보다 민감하게 나타났으며, 조사대상 강우량 및 총 유출고의 중간 값을 지나면서 BOD의 유출부하량 증가율이 TOC의 증가율을 추월하였다.

Table 7. Stormwater runoff loads estimation according to rainfall changes

Items	Precipitation(X1, mm)							
	15	20	30	50	70	100	150	200
BOD	24.9	27.1	30.5	35.9	40.2	45.5	52.6	58.5
COD	60.4	70.1	86.4	112.4	133.7	160.8	198.2	229.9
TOC	29.4	34.5	43.2	57.3	69.0	84.0	105.1	123.3
SS	1,517	1,540	1,590	1,705	1,835	2,049	2,447	2,884
T-N	8.6	12.4	17.7	24.4	28.8	33.5	38.8	42.5
T-P	2.5	4.2	7.1	11.9	15.9	21.1	28.4	34.7

Table 8. Stormwater runoff loads estimation according to total runoff depth changes

Items	Runoff Depth(X4, mm)							
	5	10	15	20	30	40	50	60
BOD	23.9	31.9	38.5	44.3	54.4	63.4	71.5	79.1
COD	73.1	113.6	146.9	176.4	228.2	274.0	315.7	354.5
TOC	27.6	46.8	63.8	79.4	108.2	134.7	159.7	183.5
SS	1,638	1,662	1,677	1,689	1,706	1,720	1,730	1,740
T-N	15.7	21.3	24.6	26.9	30.1	32.4	34.2	35.7
T-P	6.8	9.7	11.8	13.3	15.8	17.7	19.3	20.7

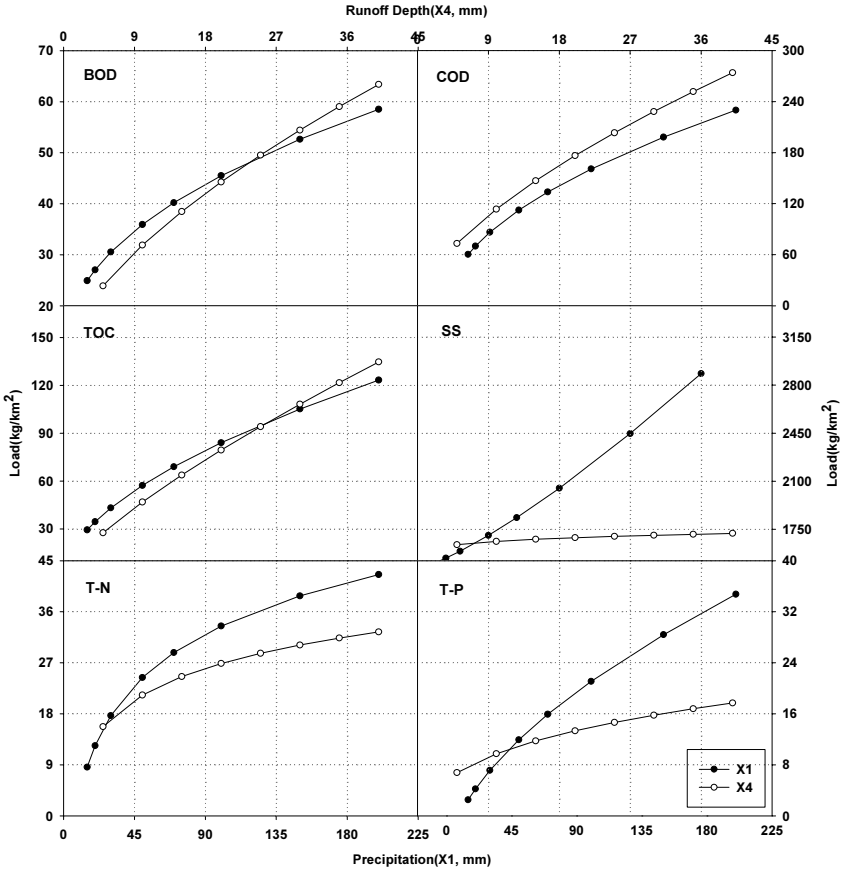

Fig. 1. The comparison of stormwater runoff loads estimation according to the rainfall and total runoff depth.

4. 결 론

하천 및 호소의 수질관리를 위해서 필수적인 토지이용별 비점오염물질 유출부하량 산정을 위해 2008년에서 2009년까지 2년간에 걸쳐 토지피복분류 단계 중 중분류에 해당하는 과수원재배지에 대해 실측자료를 바탕으로 비점오염물질 유출에 직접적인 영향을 미치는 강우량, 강우강도, 강우지속시간 등의 자료를 독립변수로하여 BOD, COD, TN, TP, SS, TOC에 대한 유출부하량을 추정할 수 있는 수학적인 모델식을 제시하였다. 각각의 수질항목에 대한 영향정도를 비점오염물질의 유출에 영향을 미치는 수리수문학적인 인자를 활용하여 통계분석결과 BOD, COD의 경우 강우량, 강우지속시간 및 총 유출고에 민감하게 반응하였으며, TN과 TP의 경우 강우량과 총 유출고에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 조사 대상 6개의 수질항목에 대한 비점유출부하량 추정 모델식의 경우 독립변수들을 지수함수의 곱으로 표현한 기존 연구자가 제시한 Model 3와 지수함수와 로그함수를 적절히 조화시킨 본 연구에서 개발한 Model 6이 실측치를 가장 잘 대변하였다.

또한 비점오염물질의 유출부하량을 수질항목별로 정량적으로 추정할 수 있는 모델 개발을 통해 모델에 포함되어 있는 유출 변수의 변화에 대한 수질항목별 비점오염물질의 유출 특성을 정량화함에 따라 비점최적관리를 위한 구조적인 시설을 설치할 때 시설의 부피, 적정처리시간, 처리율 등에 대한 종합적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

권순국, 1998, 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, 대한환경공학회지, 20(11), 1497-1510.

박연희, 박석순, 2004, 강우강도에 따른 토지이용별 비점오염원 부하량 산정 함수 연구, 대한환경공학회지 26(10), 1070-1078.

방기웅, 이준호, 유명진, 1997, 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국수질보전학회지, 13(1), 79-99.

방기웅, 이준호, 최종수, 2000, 강우시 산업단지에서의 오염물질 유출 특성, 대한환경공학회지, 22(2), 341-353.

신찬기 등, 2008, 주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법연구, 환경기초조사사업, 낙동강수계관리위원회, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소, 연차보고서.

이재관 등, 2009, 주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법연구, 환경기초조사사업, 낙동강수계관리위원회, 국립환경과학원 낙동강물환경연구소, 연차보고서.

이현동, 배철호, 2002, 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안, 한국물환경학회지, 18(6), 569-576.

이현동, 안재환, 김운지, 배철호, 2001, 토지이용별 강우시 비점오염 물질의 유출특성, 한국물환경학회지, 17(2), 147-156.

환경부, 1995, 비점오염원조사연구사업보고서.

Patrick, L. B., Teresa, H. S., 2002, Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA, Water Research, 36(1), 1743-1757.