

농촌 소유역에서 EMC를 이용한 오염물질 부하량 산정기법의 개발

Development of the EMC-based Empirical Model for Estimating Pollutant Loads from Small Agricultural Watersheds

김 영 철* / 김 건 하** / 이 동 루***

Kim, Youngchul / Kim, Geonha / Lee, Dongryul

Abstract

In this paper, a new and integrated approach easily used to calculate the pollutant loads from agricultural watersheds is suggested. Basic concepts of this empirical tool are based on the hypotheses that variations in event mean concentrations(EMCs) of the pollutants from a given agricultural watershed during rainstorms are only due to the rainfall pattern. This assumption would be feasible to agricultural watersheds whose land uses does not change during the cultivation period overlapped by rainy season and also in which point-sources of the pollutants are rare. Therefore, if EMC data sets through extensive sampling from various rural areas are available, it is possible to establish relationships between EMCs, shapes and land uses of the watersheds, and rainfall events. For this purpose, fifty one sets of EMC values were obtained from nine different watersheds, and those data were used to develop predictive tools for the EMCs of SS, COD, TN and TP in rainfall runoff. The results of the statistical tests for those formulas show that they are not only fairly good in predicting actual EMC values of some parameters, but also useful in terms of calculating pollutant loads on any time-spans such as the day of rainfall event or weekly, monthly, and yearly. Their applicability was briefly demonstrated and discussed.

Also, the unit loads calculated from EMCs based on different land uses and real rainfall data over one of the watershed used for this study, were provided, and they are compared with other well-known unit loads.

Keyword : Event mean concentration (EMC), Pollutant loads, Unit loads

* 한서대학교 환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Envir. Eng., Hanseo Univ., Chungnam, 356-820, Korea
(E-mail: ykim@hanseo.ac.kr)

** 한남대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil and Envir. Eng., Hannam Univ., Daejeon, 606-791, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원

Research Fellow, Water Resources Division, KICT, Kyonggi, 411-712, Korea

요 지

본 논문에서는 유역과 강우특성을 통합하여 오염물질 부하량을 계산할 수 있는 접근방법을 제시하였다. 이 방법의 기본적인 개념은 특정유역에서 강우시 발생하는 오염물질의 유량 가중평균 농도, 즉 EMC 변화는 오로지 강우패턴에 의해 결정된다는 가정에 기초하고 있다. 이러한 가정은 적어도 유역의 토지이용에 급격한 변화가 없고 (적어도 강우가 집중되는 경작기간동안) 점 오염원이 적은 농촌유역에서는 타당하다. 따라서, 다양한 농촌유역과 강우 패턴 조건에서 조사된 많은 EMC 자료가 있다면 EMC와 토지이용, 그리고 강우특성 사이의 유용한 경험적인 관계식을 도출할 수 있을 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 9개의 서로 다른 유역에서 51개의 독립적인 강우사상에서 조사된 EMC 자료를 이용하여 강우시 발생하는 EMC 값을 예측할 수 있는 도구를 개발하였다. 통계학적인 검토결과 개발된 경험식은 실제 측정된 EMC 값을 양호한 수준에서 예측할 수 있는 것으로 판명되었을 뿐만 아니라 EMC 자료와 유효 강우량에 기초하여 강우일, 주, 월, 년 단위의 부하량을 산출이 가능하였다. 또한, EMC 값과 유효 강우량에 의해 계산된 부하량으로부터 산출한 원 단위를 기존의 잘 알려진 경험적 원 단위와 비교 평가하였다.

핵심용어 : 유량가중 평균농도, 오염물질 부하량, 오염물질 원 단위

1. 서 론

전 세계적으로 1970년부터 수행된 비점원 오염물질에 관한 많은 연구결과로 인해 강우시 발생하는 오염물질의 양을 추산할 수 있는 다양한 형태의 모델이 수많은 기관에서 개발되었다. 이러한 모델은 기초적인 수문 정보와 원 단위를 결합한 간단한 수식으로부터 유역의 특성뿐만 아니라 지표수와 지하수 유출량을 고려한 매우 복잡한 형태의 모델을 망라하고 있다.

특정유역으로부터 강우시 오염물질 부하량을 산정할 수 있는 방법은 크게 1) 원단위 법, 2) 유량-농도 자료로부터 얻은 부하량-유량 관계를 이용하여 추산하는 방법, 그리고 3) 수학적 모델에 의한 방법 등으로 구분할 수 있다.

기존의 조사자료를 바탕으로 개발된 원 단위법은 유역에서 각각의 토지이용에 따른 면적과 그에 해당하는 원 단위 값을 곱하여 산정하는 방법으로 발생량에 적절한 유달률을 추정하여 부하량을 산출하는 방법이다. 이 방법은 적용하고자 하는 원 단위 값이 충분한 보편성을 갖고 있다면 매우 쉽게 현장에 적용할 수 있는 장점을 갖는 반면에 부하량이 강우 유출수량 또는 강우 패턴과 관계없이 년 단위로 계산되므로 농촌 하천이나 농업용 저수지와 같은 소규모 수계의 단기적 또는 계절적 수질 변화를 평가하는 데에는 한계가 있다.

유량자료와 L-Q 관계식(load-flow rating curve)을 활용한 부하량의 계산은 먼저 유역으로부터 L-Q 식의 도출을 위한 예비 조사가 선행되어야 하며 연속적

으로 측정된 수문 자료가 반드시 필요하다. 이러한 접근법은 소규모 저수지 유역 유입하천과 같이 소규모 하천에서 일련의 수량-수질조사와 함께 연속적인 수문자료의 측정에 한계가 있으므로 적용이 어렵다.

농촌유역으로부터 부하량 산출을 위한 다양한 모델이 개발되어 왔다. 먼저, HSP-F 모델은 강우사상 당 유출량뿐만 아니라 일반적인 수질인자와 독성물질의 농도를 예측할 수 있도록 개발된 모델로 ARM(agricultural runoff model)과 NPS(nonpoint simulator)를 기본 프레임으로 하여 1차원 하천에서 오염물질의 운송과 변화를 모의할 수 있다(Novotny and Olem, 1994). 그러나, 모델의 적용을 위해서 경험적인 오염물질의 축적과 세정 함수의 개발과 상세한 토양관련 정보가 요구된다.

이외에 미국의 퍼듀대 농공학과에서 개발한 ANSWERS (areal, nonpoint source watershed environment response simulation) 모델이 있는데 이 모델은 유역을 일정한 크기의 격자로 나눈 후 각각의 요소에서 강우 유출수의 차단, 침투, 지표면 자유, 지표면 유출, 토사유실 등의 이동경로를 모의하여 한 요소의 출력을 인근 요소의 입력 값으로 사용된다. 영양소 농도는 각종 물질의 농도와 토사유실량과 유출량 상호간의 관계식으로부터 모의된다(Leon et al., 2002). 그러나, 이와 같은 수학적 모델을 구축하기 위해서는 많은 모델인자의 분석과 보정, 검증 단계를 거쳐야 할 뿐만 아니라 아직 개발된 대부분의 모델의 예측성능이 미약한 형편이다.

어떤 강우사상에 대해서 특정유역으로부터의 오염물

질 유출특성은 침투농도, 산술 평균농도, 침투 오염물질 부하량, 평균 오염물질 부하량 또는 총 유출 부하량 등으로 나타낼 수 있다(이재수와 김영철, 2001). 그러나, 대부분의 경우 강우시 발생하는 총 부하량이 개개의 농도 또는 침투 부하량보다 더욱 중요하다. 그 이유는 유출사상이 비교적 짧고, 강우 유출수가 유입되는 수체, 특히 저수지나 댐 내에서는 어느 정도의 혼합 현상이 수반되므로 저수지내의 오염물질 농도는 강우로 인한 유출수(저수지로 유입되는)내 개개의 농도변화보다는 결국 총 부하량의 반응이기 때문이다.

특히, 저수지나 호수에서 질소와 인과 같은 영양염류에 대해서 총 부하량은 가장 중요한 수질영향 및 결정변수일 수밖에 없다. 이와 같은 이유로 강우사상에 대한 평균농도 또는 유량기중 평균농도(EMC, event mean concentration)는 비점원 오염물질의 유출을 평가하는데 가장 적절한 인자로 인식되고 있으며, 가장 널리 이용되고 있다 (Ellis, 1986).

본 연구에서 개발하고자 하는 EMC 값에 의한 부하량 산출기법은 개개의 강우사상에 대한 유량기중 평균 농도자료를 활용하는 방법에 말한다. 강우 사상에 따라서 관측된 유량자료와 이에 해당하는 수질 자료에 대한 EMC 값은 아래 식에 의해서 계산할 수 있다(Fig. 1).

$$EMC = \frac{\text{총유출량 중 총오염물질중량}}{\text{총유출량}} \quad (1)$$

$$= \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

여기서 Q_i 는 관측시간 t 에서의 유출량(m^3/hr), C_i 는 오염물질 농도(mg/L), EMC는 강우사상에 대한 유량기중 평균농도(mg/L)를 나타낸다. 어떤 강우사상으로부터 적절한 수준에서 EMC 값을 산출하려면 강우시작 직후부터 시작하여 강우 종료 후 시간동안 관측지점에서 수위관측 및 강우 유출수 채취에 상당한 노력을 기울여야 가능하다.

특정유역에서 특정 강우사상으로부터 발생하는 EMC 값과 오염물질 부하량은 조사과정에서 자연스럽게 계산되므로 큰 문제는 없다. 그러나, 실제로 그 유역으로부터 발생하는 대표 EMC 값을 찾기 위해 수많은 강우사상에 대한 수문곡선 및 오염물질 농도곡선(pollutograph)의 조사를 수행하는 것은 불가능한 일이다.

Fig. 2에는 대부분의 유역이 임야로 구성되어있는 유역에서 2002년 3월부터 7월 중순 사이에 10회에 걸쳐 조사된 부유물질의 EMC 값을 누적확률 그래프에

나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 EMC 값은 매우 폭 넓게 분포하고 있다. 이러한 EMC 값의 변화는 자연적으로 나타나는 변동 이외에 인위적인 토지이용 변경이 적고 점 오염원이 존재하지 않는 동일한 임야유역에서 조사된 것이므로 오로지 강우특성에 의해 초래된 것으로 볼 수 있다.

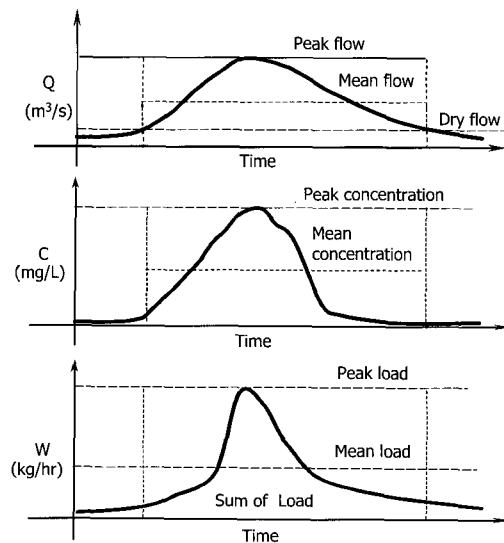


Fig. 1. Characterization of the Pollutant Discharge during Rainstorm Event

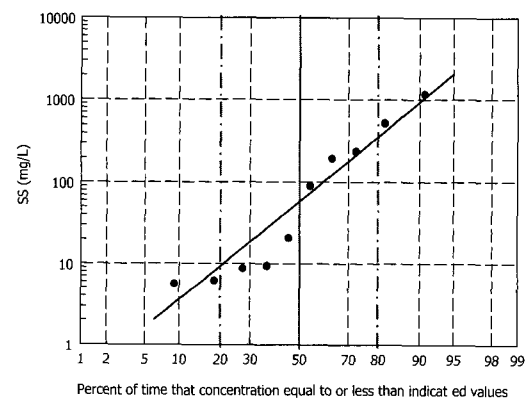


Fig. 2. Cumulative Probability Distribution of Suspended Solid's EMC from Forest

따라서, 이러한 유역에서 EMC 값과 강우특성 사이의 관계를 규명하게 되면 적어도 임야유역에서 경험적인 EMC 관계식을 얻을 수 있으며, 따라서 이와 같은

강우특성-EMC 관계를 이용하면 강우사상에 따른 부하량을 쉽게 산출할 수 있을 것이다. 이와 같은 논리를 기초로 서로 다른 유역특성과 토지이용을 갖는 유역에서 다양한 강우사상에 대해 EMC 자료가 있다면 경험적으로 유역별 EMC 계산기법의 개발이 가능하다. 본 논문에서는 연구자에 의해 직접 조사한 자료와 함께 기존의 문헌에 소개된 강우시 수량-수질 조사자료를 활용하여 농촌유역에서 쉽게 적용할 수 있는 EMC와 부하량 산출기법을 제안하고자 한다.

2. 연구방법 및 실험

2.1 유역의 선정

본 연구에서는 다음과 같은 사항을 염두 해 두고 연구대상 유역을 선정하였다. 먼저, 우량 관측지점으로부터 최대한 가까운 유역을 선택하였다. 본 연구를 위하여 별도의 우량계를 설치할 수 없으므로 공간적 강우편차를 최소화하기 위함이다. 장래에 강우 유출수의 조사연구가 진행되는 동안(2002년 2월~2002년 8월) 유역 내에서 건설활동과 같은 토지이용에 변동이 없을 것으로 예상되는 지역을 선정하였다. 선정된 유역은 접근성이 양호하여야 한다. 강우사상과 강우량에 따라서는 24시간 이상의 시료채취가 필요하고 유역 당 총 10여 차례의 시료채취가 계획되어 있으므로 안전사고 등을 고려하여 접근성을 우선적으로 고려하였다. 농촌 유역을 대표할 수 있도록 유역의 토지이용과 유역의 특성 등이 최대한 다양하게 구성되도록 선정하였다.

연구대상 유역으로 임야지역, 임야+농지 혼합지역, 농지지역을 포함하는 4개의 유역을 선정하였다. 선정된 유역의 명칭(약호 포함), 위치 및 주변지역을 Table 1에 나타내었다. Rural 1 유역 하천은 산수천(지방 2급

하천), Rural 2 유역하천은 대곡천(지방하천 2급)으로 서산 A, B 지역 간척지 호 유역에 위치하고 있다. Rural 3 유역하천은 계곡형 하천으로 정식 하천 명이 존재하지 않으며, Rural 4 유역하천은 대전지역 갑천 지류중 하나인 건천(乾川)으로 농촌지역을 관통하는 지방 1급 하천이다(김건하, 2003). 이외에 지난 1999년 농업기반공사에 의해 수행되었던 5개 농촌유역(Rural 5~Rural 9)의 강우시 수질조사 자료를 활용하였는데, 유역 코드 등의 정보를 Table 1에 제시하였다. 분석대상 EMC 자료는 총 51세트(51개의 강우사상)였다. Table 2에는 본 연구에서 수행한 조사대상 유역 및 기존 자료가 얻어진 유역에서 강우사상별 강우량, 강우지속시간, 강우강도, 그리고 유역중의 농지가 차지하는 비율, 평균 유역경사, 그리고 강우사상 사이의 청천일수(dry days)를 나타내었다. Table 2의 연구대상 유역의 면적은 1.191~27.37 km², 유역에서 농경지의 % 구성은 0.4~39.5%, 강우사상별 강우량 범위는 1.0~260 mm, 평균 유역경사는 8~63% 범위로 다양한 형태의 유역특성과 강우특성을 가지고 있다.

2.2 시료채취와 수질분석

강우시 유출수의 시료채취는 강우시작 직전에 수위 및 유속측정과 함께 착수하였으며 강우가 지속되는 시간동안에는 시간 간격으로 채취가 이루어지도록 하였다. 강우 지속시간이 길어지면 앞에서 채취한 시료를 가급적 등 시간 간격이 이루어지도록 선택하여 시료를 교체함으로써 강우가 종료되어 하천수위가 충분히 감소할 때까지 채취하도록 하였고(김영철과 이재수, 2002), 강우사상 당 시료 개수는 최소한 15회 이상이 이루어지도록

Table 1. Description of the Watersheds Used for this Study

CODE	Site	Others	Source
Rural 1	Chungnam, Seosan City	Regional II Class River	Authors
Rural 2	Chungnam, Seosan City	Regional II Class River	Authors
Rural 3	Daejeon City	Creek	Authors
Rural 4	Daejeon City	Regional I Class River	Authors
Rural 5	Jeonbuk, Iksan City	Creek(Reservoir)	Authors
Rural 6	Jeonbuk, Iksan City	Creek(Reservoir)	Authors
Rural 7	Jeonnam, Muan County	Creek(Reservoir)	Authors
Rural 8	Jeonnam, Muan County	Creek(Reservoir)	Authors
Rural 9	Kyungbuk, Andong City	Creek(Reservoir)	KARICO

Table 2. Description of the Rainfall Events and Watersheds

Site	Rainfall depth(mm)	Duration (hr)	Intense (mm/hr)	Area (km ²)	Measured Runoff(m ³)	Agro. fraction	Slope	Dry days
Rural 1	1.0	3	0.33	2,850	1,945	0.025	0.63	3
	16.5	5	3.30	2,850	12,065	0.025	0.63	6
	44.2	15	2.95	2,850	84,146	0.025	0.63	9
	129.5	13	9.92	2,850	220,267	0.025	0.63	2
	24.0	12	2.0	2,850	10,968	0.025	0.63	7
	0.1	1	0.10	2,850	7,056	0.025	0.63	1
	19.5	20	0.98	2,850	2,851	0.025	0.63	7
	89.5	34	2.63	2,850	123,789	0.025	0.63	2
	12.0	8	1.50	2,850	4,121	0.025	0.63	7
	118.0	12	9.83	2,850	152,202	0.025	0.63	2
Rural 2	1.0	2	0.50	4,968	127	0.148	0.23	3
	16.5	5	3.30	4,968	1,442	0.148	0.23	6
	22.0	13	1.69	4,968	2,631	0.148	0.23	14
	129.0	13	9.92	4,968	672,328	0.148	0.23	2
	24.0	12	2.00	4,968	103,788	0.148	0.23	7
	0.1	1	0.10	4,968	3,655	0.148	0.23	1
	19.5	20	0.98	4,968	11,979	0.148	0.23	7
	89.5	34	2.63	4,968	450,810	0.148	0.23	2
	12.0	8	1.50	4,968	95,415	0.148	0.23	7
Rural 3	18.5	7	2.64	3,384	254,221	0.004	0.41	7
	67.0	12	5.58	3,384	856,239	0.004	0.41	13
	14.4	5	2.88	3,384	26,763	0.004	0.41	3
	43.5	6	7.25	3,384	108,940	0.004	0.41	2
	44.5	12	3.71	3,384	572,722	0.004	0.41	1
	259.8	6	43.3	3,384	230,6296	0.004	0.41	2
	35.0	9	3.89	3,384	434	0.004	0.41	2
	4.5	6	0.75	3,384	64,363	0.004	0.41	5
	37.0	5	7.40	3,384	168,834	0.004	0.41	5
	135.0	10	13.50	3,384	317,0668	0.004	0.41	1
Rural 4	18.5	7	2.64	27.37	80,984	0.395	0.06	7
	66.5	12	5.54	27.37	1,572,475	0.395	0.06	13
	14.4	5	2.88	27.37	83,196	0.395	0.06	3
	43.5	6	7.25	27.37	69,087	0.395	0.06	2
	44.5	12	3.71	27.37	378,330	0.395	0.06	1
	259.8	6	43.3	27.37	1,492,376	0.395	0.06	2
	35.0	9	3.89	27.37	478,975	0.395	0.06	2
	4.5	6	0.75	27.37	61,853	0.395	0.06	5
	135.0	10	13.50	27.37	1,847,475	0.395	0.06	1
Rural 5	3.0	1	3.00	2.28	1400	0.205	0.25	9
	15.7	6	2.62	2.28	4,327	0.205	0.25	1
	33.8	3	11.27	2.28	18,029	0.205	0.25	2
Rural 6	15.7	4	3.93	1.19	1,695	0.367	0.15	2
	33.8	3	11.27	1.19	19,598	0.367	0.15	2
	38.5	2	19.25	1.19	9,834	0.367	0.15	1
Rural 7	49.0	6	8.17	5.873	414,303	0.107	0.12	1
	32.5	5	6.50	5.873	82,592	0.107	0.12	7
	47.7	6	7.95	5.873	25,477	0.107	0.12	18
Rural 8	28.0	7	4.00	5.048	49,766	0.382	0.19	1
	36.0	12	3.00	5.048	31,838	0.382	0.19	5
Rural 9	28.0	7	4.00	8.326	111,110	0.209	0.08	1
	80.0	13	6.15	8.326	447,757	0.209	0.08	1
	36.0	12	3.00	8.326	128,304	0.209	0.08	5

록 하여 EMC를 산출할 때 오차가 최소화되도록 하였다. 시료채취가 이루어지는 동안 수위관측과 함께 유속을 측정하여 유량을 산출하였다.

강우유출수의 수질분석은 Standard Methods (1998)와 수질오염 공정 시험법(1999)에서 제시된 분석법을 이용하였다. 시료내의 유기물질 함량을 나타내는 COD는 크롬법을 이용하여 측정하였다. 총질소(total nitrogen)는 시료를 분해병에 넣고 알카리성 과황산칼륨 용액을 가하여 고압 증기 멸균기안에서 분해한 후 발색후 자외선 흡광도(General Spectronic 123)를 측정하여 분석하였다. 총인(total phosphorus)의 분석을 위해서는 Standard Method에 따라 분해시킨 후 Stannous Chloride 법(염화제일주석 환원법)을 이용하였다. 기타 항목은 수질오염공정 시험법과 Standard Method에 의거해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 EMC 값의 계산

각각의 유역에서 개개의 강우사상에 따라 발생된 시간에 따른 유출유량(Q)과 각각의 유출시간(t)에 해당하는 오염물질 농도를 곱하여 부하량을 계산하고 강우 유출수 유출 종료까지 누적 계산한 후 이 값을 총 강우 유출유량으로 나누어 산출하였다. 이와 같은 방법에 의해 계산한 유역별 강우사상에 대한 EMC 자료를 Table 3에 제시하였다.

3.2 모델의 구성

통계 프로그램 SPSS ver. 10.0에 Table 2와 Table 3에서 제시한 9개 유역 51개의 강우사상으로부터 얻은 자료를 입력하여 아래와 같은 통계분석을 실시하였다.

- 기술통계분석
- EMC에 영향을 미치는 인자에 대한 분산분석 및 Tukey 사후분석
 - 유역특성 인자군(유역면적, 농지이용율, 유역경사, 하상계수)
 - 강우특성 인자군(유효 강우량, 강우시간, 강우강도, 청천일수)
 - 유출유량 인자군(평균유량, 최대유출유량, 청천시 유량, 총유출유량)
- EMC 항목간, 영향인자간 상관도 분석

○ EMC 예측을 위한 선형회귀분석

이상과 같은 일련의 통계작업을 통하여 EMC에 영향을 미치는 인자를 추출하였다. EMC 항목간에 가장 영향을 미치는 인자는 각기 다를 수 있지만 실제 적용할 수 있는 경험식은 일관성이 있어야 하며 입력자료가 가용하여야 하므로 농지이용율(AGRO), 유역경사(SLOPE), 유효 강우량(Re), 청천일수(DRYDAY)가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구에서 구상한 EMC 예측식을 도출하기 위하여 다중선형회귀식 작성을 여러 인자와 여러 회귀식 형태에 대하여 반복 작업하였으며 아래 Table 4와 같은 경우에 가장 높은 수준의 결정계수를 얻을 수 있었다.

3.3 모델의 성능

강우사상 별 EMC 관측치와 계산치를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 따르면 도출된 경험식은 대체로 모든 수질인자의 증감과 대체로 일치하고 있음을 보여주고 있다. 관측값과 계산값 사이의 상관관계를 나타내는 결정계수(R^2)는 SS와 TP인 경우 각각 0.64와 0.60으로 자연계에서 고려되지 않은 다른 다수의 자연변수를 고려하면 매우 의미 있는 산출식으로 볼 수 있다. 이와 반면에 COD와 TN은 0.28과 0.32 수준으로 부유물질과 TP에 비해 낮은 수준으로 이들 물질의 공급과 존재형태의 다양성이나 이동경로의 복잡성(불용성/용존성 성분의 혼재) 때문으로 판단된다(김영철과 이재수, 2002; Novotny and Olem, 1994).

3.4 표본지역에서 장기간의 EMC 생성

Table 5에 제시된 식을 이용하여 2000년 1월에서 2002년 10월까지 Table 2의 Rural 5 유역의 하천(전북 익산시 왕궁면 소재 왕궁저수지 유입하천)에 대해 EMC를 계산하였다. 이 기간동안 가장 가까운 우량 관측소의 자료를 조사한 결과 강우일수는 336일, 강우사상으로는 158회였다. 조사대상 기간 동안의 일일 평균 강우량은 10.9mm, 최저 0.1mm, 최고 161mm이었다(기상청, 2002).

강우사상별 강우량과 청천일수, 농지비율, 유역경사 자료 등과 EMC 계산식을 이용하여 SS, COD, TN, TP의 EMC 값을 계산한 결과를 정리하여 누적확률 분포지에 나타내었다. 그 결과 앞서 Fig. 2에 나타낸 임야지역의 EMC 확률분포와 마찬가지로 표본지역에서 장기간 동안 EMC 값의 확률분포를 생성할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Calculated EMC Values from the Rural Watersheds

Site	SS EMC (mg/L)	COD EMC (mg/L)	TN EMC (mg/L)	TP EMC (mg/L)
Rural 1	7.8	6.0	1.3	0.15
	132.0	9.8	1.2	0.14
	97.0	8.0	0.8	0.28
	51.6	8.3	0.6	0.11
	16.3	10.4	0.8	0.03
	7.1	4.2	0.8	0.18
	4.4	3.6	1.0	0.17
	195.4	10.9	1.1	0.24
	3.1	3.2	0.7	0.17
	106.9	7.5	1.1	0.14
Rural 2	8.8	11.4	2.5	0.15
	197.4	14.1	2.5	0.09
	20.9	9.6	1.6	0.29
	523.5	65.0	2.1	1.06
	90.7	12.4	2.5	0.52
	9.4	8.5	2.6	0.96
	6.2	9.9	1.3	0.27
	240.2	12.1	2.1	0.74
	5.6	2.8	1.3	0.37
Rural 3	0.6	4.2	1.8	0.10
	2.3	3.9	2.2	0.25
	0.7	3.8	0.4	0.41
	0.5	3.9	1.1	0.20
	3.8	6.0	0.3	0.52
	37.0	11.5	0.3	0.43
	1.3	11.7	0.1	0.18
	0.2	2.8	0.1	0.23
	0.6	4.8	0.8	0.35
	3.8	16.6	1.4	0.24
Rural 4	52.7	18.7	5.4	1.44
	662.0	37.3	3.9	2.08
	13.6	5.2	1.9	1.07
	54.0	24.1	3.2	1.60
	43.2	37.5	3.3	2.29
	22.0	14.9	4.9	1.24
	34.7	6.0	5.6	0.88
	8.4	16.9	5.7	0.55
	99.1	23.9	4.0	1.14
Rural 5	47.0	20.0	5.0	0.40
	5.0	9.0	4.0	0.40
	55.0	19.9	9.0	1.20
Rural 6	30.0	11.0	4.0	0.40
	221.0	21.0	7.0	0.80
	281.0	20.0	3.0	0.90
Rural 7	155.0	28.0	9.0	1.00
	54.0	11.0	5.0	0.50
	25.0	6.0	6.0	0.50
Rural 8	75.0	6.0	5.0	1.10
	29.0	7.0	5.0	1.20
Rural 9	30.0	7.0	8.3	1.10
	254.0	12.0	8.3	1.50
	10.0	7.0	8.3	1.00

Table 4. Empirical EMC Estimation Equations

Parameters	Proposed EMC Equations
SS(mg/L)	$EMC_{SS} = 1.3 \cdot AGRO^{1.3} \cdot DRYDAY^{0.5} \cdot SLOPE \cdot (Re)^{0.7}$
COD(mg/L)	$EMC_{TCOD} = 1.5 \cdot DRYDAY^{0.17} \cdot AGRO^{0.34} \cdot Re^{0.32}$
TN(mg/L)	$EMC_{TN} = 1.5 \cdot AGRO^{0.37} \cdot Re^{0.19}$
TP(mg/L)	$EMC^{TP} = 1.1 \cdot AGRO^{0.64} \cdot Re^{0.1}$

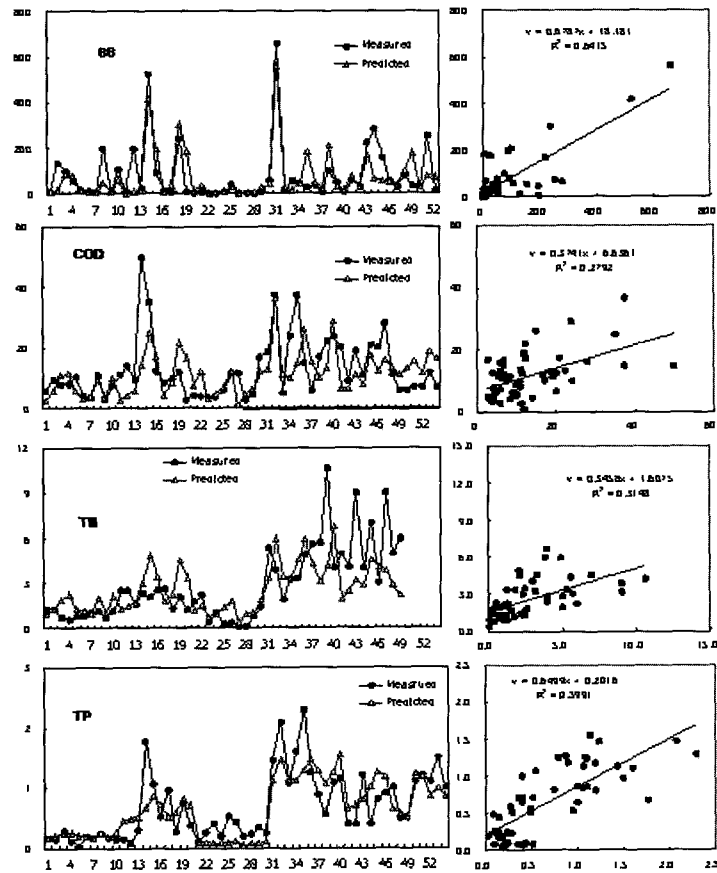


Fig. 3. Correlation between Measured and Calculated Values

3.5 표본지역에서 부하량의 계산

앞서 제시한 계산식으로부터 산출된 EMC 값을 이용하여 아래와 같은 방법에 의해 주간, 월별 또는 년 단위의 SS, COD, TN, TP의 부하량(load)을 산출할 수 있다.

$$SS\ Load = \sum_{i=1}^n (EMC_{ssi} \cdot Re_i \cdot A \cdot f) \quad (2)$$

$$COD\ Load = \sum_{i=1}^n (EMC_{CODi} \cdot Re_i \cdot A \cdot f) \quad (3)$$

$$TN\ Load = \sum_{i=1}^n (EMC_{TNi} \cdot Re_i \cdot A \cdot f) \quad (4)$$

$$TP\ Load = \sum_{i=1}^n (EMC_{TPi} \cdot Re_i \cdot A \cdot f) \quad (5)$$

식(2)~식(5)에서 SS, COD, TN, TP Load 단위

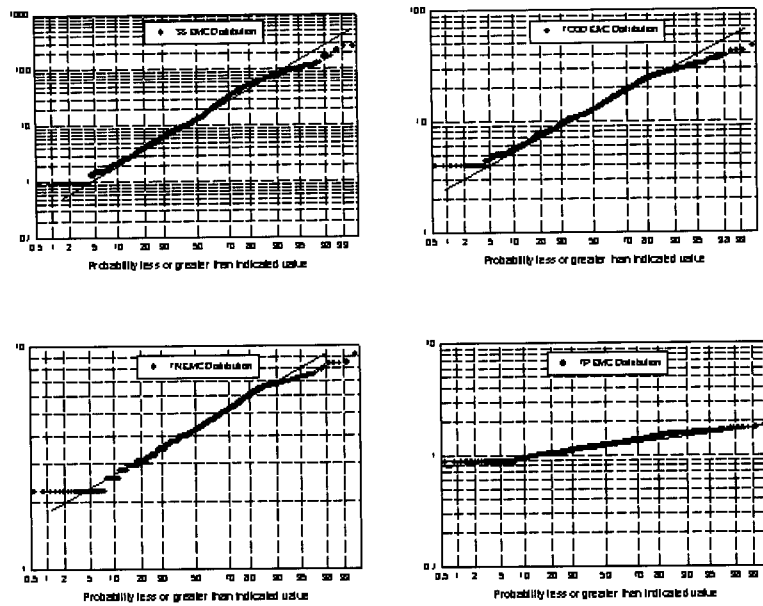


Fig. 4 Cumulative Probability Distribution of EMC Values for the Rural 5 Watershed

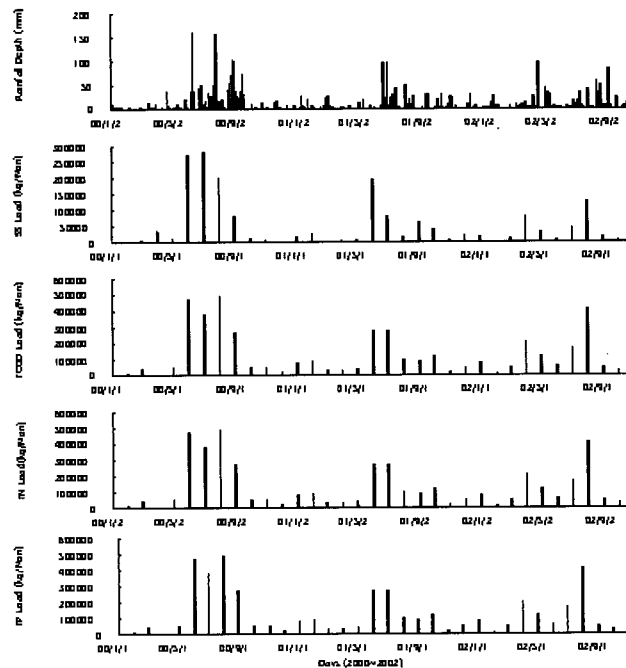


Fig. 5. Monthly Distribution of the SS, COD, TN, and TP Loads in Rural 5 Watershed

는 주간, 월 또는 년 간 강우시 발생하는 kg 또는 ton, EMC_{SSi} 등은 계산기간에서 i 번째 강우사상에 해당되는 유량기중 평균농도(mg/L), Rei 는 i 번째 강우사상의 유효 강우량(mm)을 나타내며, A 는 유역면적(km^2), 그리고 f 는 부하량을 kg 또는 ton 단위로 나타내기 위한 환산계수를 나타낸다.

유효 강우량의 계산을 위해 Rural 5 유역에 대한 유출계수는 기록이 있는 농지와 임야에 해당하는 유출계수 C 값은 0.5 ~ 0.75의 평균치 0.625를 사용하였다. 이상과 같은 방법에 의해 계산한 Rural 5 왕궁 저수지 유입하천에 대해 계산된 SS, COD, TN, TP 부하량의 월별 분포를 아래 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4의 EMC 값을 적용한 Fig. 5의 부하량 계산 결과를 이용하여 SS, COD, TN, TP의 년 평균 단위 부하량(원단위)으로 환산하면 SS는 55 kg/ha-년, COD 9 kg/ha-년, TN 4.2 kg/ha-년, TP 0.95 kg/ha-년 수준이었다. 이와 같이 본 연구에서 제안한 부하량 산출기법을 이용하면 앞서 연구배경에서 기술한 다른 기법과 비교하여 쉽게 부하량을 산출할 수 있을 뿐만 아니라 유역에서 발생한 오염물질 부하량의 시간적 분포를 파악할 수 있다.

3.6 EMC 모델식의 타당성에 대한 논의

이상과 같이 제시한 경험적 EMC 회귀모델의 타당

성은 다양한 작업을 통하여 검증이 가능하다. 먼저, 표본유역에서처럼 농업용 저수지가 있는 경우에 EMC 모델식에 의해 계산된 부하량을 기초로 호내 수질변동을 모의하고 이를 실측 호내 수질변동과 비교하는 방법이 있다. 수리학적 체류시간이 짧은 일반 농업용 저수지에서 수질변동은 정성적인 측면에서 보면 틀림없이 Fig. 5에 제시된 부하량의 분포에 따라 반응하겠지만 정확한 정량적인 검증작업에는 적지 않은 시간과 노력이 필요하다. 두 번째 방법으로는 실제 표본지역 하천 수질과 본 연구에서 제안한 EMC 값을 상호 비교하는 것으로 마찬가지로 정성적인 측면에서 비교가 가능하다.

아래 Fig. 5에는 3년 동안(2000 ~ 2002년)에 수행된 Rural 5 유역의 하천 수질조사 결과와 EMC 계산값을 누적 확률지에 나타내었다. 조사된 결과는 강우와 관계기간을 포함한 기간동안 임의채취를 통하여 분석한 자료(농업기반공사, 2002)로 질소 농도는 강우시 EMC 자료분포와 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. 이것은 강우시 EMC 농도가 강우기를 포함한 기간동안에 임의 시간에 채취한 질소농도와 큰 차이가 없음을 시사해 주고 있는데, 이러한 연구결과는 대체로 다른 연구결과와 일치하고 있다(농업기반공사, 1999a, b, c). 이와 반면에 SS와 COD, 그리고 TP 농도는 EMC 계산값과 임의채취한 농도에 비해 높게 나타나고 있는데, 그 이유는 이들 인자에 미치는 강우효과가 TN에 비해 상대적

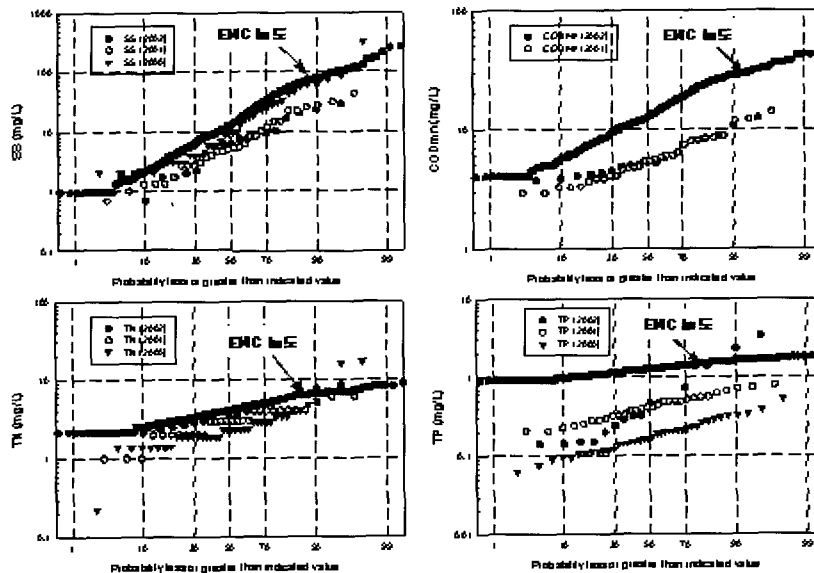


Fig. 6. Comparison between Calculated and Measured EMC Values from Grab Samples

으로 크게 작용함을 의미하며 마찬가지로 정성적인 측면에서 문헌과 대체로 일치한다(이현동 등, 2001; 신은성 등, 2001).

세 번째 검증방법으로는 기존에 각종 문헌에서 제시하고 있는 토지이용별 부하량 원단위와 EMC 기법에 의해 계산된 결과와 비교하는 방법이 있다. 아래 Table 5에는 본 연구에서 제안한 EMC 기법에 의해 계산한 년 간 단위 면적당 오염물질 발생량 자료로부터 계산된 원단위와 환경부, 그리고 외국의 문헌에 나타나있는 원단위 값을 비교하였다. EMC 기법에 의한 계산은 유역의 평균경사 0.25, 전체 유역면적 중에 % 농지 이용률이 각각 10%, 30%, 60%, 그리고 강우패턴은 Rural 5 유역의 과거 약2년 동안에 관측된 강우사상을 기준으로 실시하였다. 이와 같은 비교는 실제 어느 값이 더 정확한지를 검토하자는 취지가 아니라 단순히 상대적으로 비교해보는데 의미가 있음을 밝혀둔다.

먼저, 계산에 따른 부유물질의 원단위는 그림에 나타난 것처럼 농지(논과 밭) 이용률이 증가함에 따라 급격히 증가하지만 1995년 환경부의 비점오염원 조사연구 사업 보고서(1995)에서 제시하고 있는 원 단위 값은 농

지에서 최대 약 22 kg/ha-년으로 EMC 기법에 의한 계산 값 보다 훨씬 적었다. 환경부의 유기물질 원단위가 BOD 기준으로 조사되어 본 연구의 크롬 COD 원단위와 직접적인 비교는 어려웠으나 농지 강우 유출수에는 토사나 부유물질과 관련된 Lignin이나 Cellulose 등과 같은 난 분해성 물질이 다량 함유되어있는 점을 고려하여 평가가 이루어져야 할 것이다.

환경부 TN의 원 단위는 본 연구의 EMC 기법으로 산출한 값에 비해 약 3배 이상 큰 차이를 보였다. 경작 방법과 작물이 다르므로 미국자료(Thomann and Muller, 1987)와 직접적인 비교는 어렵지만 미국의 일반 농촌지역에 적용되고 있는 원 단위 값과 비교하면 계산치는 농지비율이 약 45%에서 유사한 수치를 보였다. TP는 환경부 원 단위와 비교하여 농지비율이 증가함에 따라 상당히 유사한 수준을 나타내었고 미국의 일반 농촌과 비교하면 전체적으로 높은 수치를 보였다.

3.7 EMC 모델식의 활용

지금까지 논의한 EMC 모델식이 어느 정도 타당성을 부여할 수 있다면 강우시 농업용 저수지에 유입되는

Table 5. Comparison between Unit Loads from this Study and Others

Parameters Sources	SS (kg/ha-yr)			Organic matters (kg/ha-yr)			TN (kg/ha-yr)			TP (kg/ha-yr)		
	% AGRO			% AGRO			% AGRO			% AGRO		
	10%	30%	60%	10%	30%	60%	10%	30%	60%	10%	30%	60%
This study	25	40	220	14b	16	27	3.0	4.4	5.7	0.46	0.84	1.42
Kor. M.o.E.a	22	22	22	3.8c	4.6	5.8	10.2	14.4	20.8	0.62	0.80	1.10
U.S.A	-			-			5.0			0.50		

a: Korean Ministry of the Environment, b: BOD₅, c: COD_{Cr}

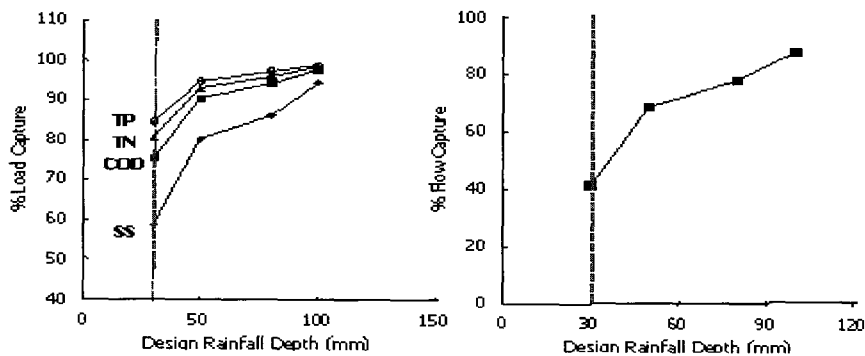


Fig. 7. Percent Capture of the Pollutant Loads versus the Design Rainfall Depth

오염물질을 차단 할 수 있는 체류지(detention ponds)의 설계에 편리하게 적용될 수 있다. 지금까지 국내에서 체류지를 설계할 때 부하량 기준의 오염물질 포착율(capture)을 고려하지 않고 일반적으로 설계 강우량을 설정한 후 체류지의 용량을 결정하였다(이재수와 김영철, 2001; Roesner, 1988). 그러나, 본 연구에서 제안한 강우사상별 EMC 산출기법에 의해 강우량에 따라서 체류지에 포착되는 강우 유출수량과 이에 해당하는 포착 부하량을 직접 산출할 수 있다.

Fig. 9에는 왕궁지 구역에서 2000~2002년에 관측된 강우사상별 강우자료를 이용하여 계산된 EMC 자료와 설계 강우량 30, 50, 80, 100mm에 대해 계산된 % 포착 부하량과 포착유량을 나타내었다. 그림에서 체류지, 수계, 강우량, 유출수, EMC, 한, 격은, 강, 노, 유, 량, 포, 착, 율, 은 대략 40%이고, 년 간 왕궁지로 유입되는 SS, COD, TN, TP 부하량을 각각 60%, 75%, 80%, 85%를 포착할 수 있다. 따라서, 합리적이고 경제적인 선에서 목표 오염물질 저감량(포착 부하량)을 선정하게 되면 자연스럽게 설계강우량을 결정할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 유역과 강우특성을 통합하여 오염물질 부하량을 계산할 수 있는 접근방법을 제시하였다. 이 기법의 기본적인 개념은 특정유역에서 강우시 발생하는 오염물질의 유량 가중평균 농도, 즉 EMC는 오로지 강우패턴에 때문에 변화한다는 가정에 기초하고 있다. 이러한 가정은 적어도 유역의 토지이용에 급격한 변화가 없는 농촌유역에서는 타당하다. 따라서, 다양한 농촌유역과 강우 패턴 조건에서 조사된 많은 EMC 자료가 있다면 EMC 값과 토지이용, 그리고 강우특성 사이의 유용한 경험적인 관계식을 도출할 수 있을 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 9개의 서로 다른 유역에서 51개의 독립적인 강우사상에서 조사된 EMC 자료를 이용하여 강우시 발생하는 EMC를 예측할 수 있는 도구를 개발하였다. 통계학적인 검토결과 개발된 경험식은 실제 측정된 EMC 값을 양호한 수준에서 예측할 수 있는 것으로 판명되었을 뿐만 아니라 EMC 자료와 유효 강우량에 기초하여 강우일, 주, 월, 년 단위의 부하량을 산출이 가능하였다. 또한, EMC 값과 유효 강우량에 의해 계산된 부하량으로부터 산출한 원 단위를 기존의 경험적 원 단위와 비교 평가하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호# 1-5-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 기상청 (2002). **전주지역 기상자료 민원 서비스 자료**.
- 김진하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현 (2003). "우리나라 농지-임야유역으로부터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정." **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제25권, 제6호, pp. 760-770.
- 김영철, 이재수 (2002). "강우시 유역특성에 따른 유출 오염물질 농도곡선의 형상." **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제24권, 제4호, pp.633-645.
- 농업기반공사 농어촌연구원 (1999a). **왕궁지구 유입하천, 호소 퇴적물 조사 및 강우시 수질조사 보고서**. 연구보고 99-11, pp. 30-45.
- 농업기반공사 농어촌연구원 (1999b). **감동지구 유입하천, 호소 퇴적물 조사 및 강우시 수질조사 보고서**. 연구보고 99-11, pp. 29-40.
- 농업기반공사 농어촌연구원 (1999c). **만은지구 유입하천, 호소 퇴적물 조사 및 강우시 수질조사 보고서**. 연구보고 99-11, pp. 30-45.
- 농업기반공사 농어촌연구원 (2002). **저수지와 담수호의 수질개선방안(최종보고서)**. 연구보고 2002-05-13, pp. 146-257.
- 신은성, 최지용, 이동훈 (2001). "농업지역 비점원 오염물질 유출특성에 관한 연구." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제17권, 제3호, pp. 299-311.
- 이재수, 김영철 (2001). "소규모 농업용 저수지 유역으로부터 비점원 오염물질 유출특성 및 오염물질 제거를 위한 체류지 용량분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제5-B호, pp. 575-588.
- 이현동, 안재환, 김운지, 배철호 (2001). "토지 이용별 강우시 비점오염물질의 유출특성." **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제17권, 제2호, pp. 147-156.
- 환경부 (1995). **비점오염원 조사연구 사업 보고서**. 국립환경연구원 1995. 11.
- 환경부 (1999). **수질오염 공정시험법**.

- APHA, AWWA and WEF (1993). *Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater*, 18th edition, Washington D.C., USA.
- Ellis, J. B. (1986). "Pollutional aspects of urban runoff." in *Urban Runoff Pollution*, Edited by H. C. Torno, J. Marsalek, and M. Desbordes, Springer Verlag, Berlin, New York, pp. 1-38.
- Leon, L. F., Soulis, E. D., Kouwen, N., Farquhar (2002). "Nonpoint Source Pollution: A Distributed Water Quality Modeling Approach." *Water Research*, Vol. 35, No. 4, pp. 997-1007.
- Roesner, L.A. (1988). "Aesthetic Implementation of Nonpoint Sources Control." in *Proceedings, Symposium on Nonpoint Pollution: 1988-Policy, Economy, Management, and Appropriate Technology*, Edited by Novotny, V., American Water Resources Association, Bethesda, M.D., pp. 213-223.
- Thomann, R.V., Muller, J. A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper Colins, New York, pp. 394-397.
- Novotny, V., Olem, H. (1994). *Water Quality Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 507-571.

(논문번호:03-45/접수:2003.04.28/심사완료:2003.07.21)