

농지-임야 구역의 비점원 발생 BOD 부하의 추정

김건하[†] · 권세혁^{*}

한남대학교 토목환경공학과

^{*}한남대학교 정보통계학과

Estimation of BOD Loading of Diffuse Pollution from Agricultural-Forestry Watersheds

Kim, Geonha[†] · Kwon, Sehyug^{*}

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

^{*}Department of Information and Statistics, Hannam University

(Received 28 June 2005, Accepted 8 August 2005)

Abstract

Forestry and agricultural land uses constitute 85% of Korea and these land uses are typically mixed in many watersheds. Biological Oxygen Demand (BOD) concentration is a primary factor for managing water qualities of the water resources in Korea. BOD loadings from diffuse sources, however, not well monitored yet. This study aims to assess BOD loadings from diffuse sources and their affecting factors to conserve quality of water resources. Event Mean Concentration (EMC) of BOD was calculated based on the monitoring data of forty rainfall events at four agricultural-forestry watersheds. Exceedence cumulative probability of BOD EMCs were plotted to show agricultural activities in a watershed impacts on the magnitude of EMCs. Prediction equation for each rainfall event was proposed to estimate BOD EMCs: $EMC_{BOD}(mg/L) = EXP(0.413 + 0.0000001157 \times (\text{discharged runoff volume in } m^3) + 0.018 \times (\text{ratio of agricultural land use to total watershed area}))$.

keywords : Agriculture, Forestry, Event mean concentration, Biological oxygen demand, Topography, Rainfall runoff, Water quality

1. 서 론

우리나라 전 국토면적은 9,943,000 ha로 이중 농지는 1,876 ha (19%), 산림은 6,422,000 ha (65%)를 차지하고 있다. 국토의 대부분을 차지하고 있는 농지, 임야 지역에서의 강우유출수 수질은 물 관리에 있어서 매우 중요한데 이는 지표수의 바탕수질(Background water quality)이기 때문이다.

농촌, 임야구역의 비점원에 관한 연구는 80년대 후반부터 단속적으로 실시되어왔으나 수질오염총량제의 시행 후 집중적으로 수행되고 있다. 비점오염원 부하가 수질에 미치는 영향은 하수처리율이 향상되고 토지이용이 고밀도가 될수록 높아지고 있다. 특히 농지와 임야지역은 도시지역과 축산지역과 비교하여 강우유출수의 농도는 낮더라도 유량이 많아서 부하량 기여도는 매우 높다. 그러나 농업에서 배출되는 비점오염원량은 정확한 기작의 분석이 안되고 있으며, 특히 비료, 농약의 사용증가에 따라 영양염 및 유해물질에 의한 수질영향이 갈수록 문제가 되고 있다(최 등, 1998).

농업지역의 주요한 비점오염원은 가축배설물과 농작폐기물이다. 유기물질은 고형물 또는 수용성의 형태로 강우유출

수에 의해 지표수로 유출되거나 침투를 통해 지하수로 유입될 수 있다. 또한 강우자체에도 상당한 양의 유기물질 농도가 검출된다(최, 1991).

빗물은 지표면을 흐르고 대지에 흡수되는 등 수자원을 형성하는 과정에서 수질이 변하게 되는데 이에 영향을 주는 인자는 매우 다양하다. 강우유출수의 수질에 영향을 주는 인자는 선행강우 일수, 토지이용의 형태, 강우 유출률 등 복잡한 자연현상이 모두 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한 토양의 종류, 비료의 살포시기와 종류, 경작형태, 농작물 형태 및 경작 방법등 또한 비점원 오염물질의 배출에 영향을 미친다.

대부분의 경우 강우시 발생하는 총 유출부하량이 시계열 농도변화보다 더 중요한데 강우유출수가 유입되는 수체에서 혼합 현상이 수반되므로 수체의 수질은 강우사상 동안의 시계열 농도변화보다는 총유입부하량으로 파악하는 것이 옳은 접근방법이다.

수질환경보존법의 환경기준에 있어서 하천의 수질오염을 나타내는 일반지표로 생화학적 산소요구량(Biological Oxygen Demand: BOD)가 많이 사용된다. 이는 하천의 정화작용은 미생물을 매체로 하는 유기물 산화에 의한 무기화의 작용이기 때문이며 다른 자료가 충분히 축적되지 않은 이유도 있다. 그러나 먹는 물 수질기준 항목에서는 BOD가 포함되지 않으므로 일반 오염지표로 보는 경우, 이를 정수

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimgh@hannam.ac.kr

처리과정과 연관시켜 상수원수 급수와 직접 비교하는 것은 무리가 있다. 대신, 기존의 BOD등급을 더욱 세분화하는 것이 바람직하다(최 등, 1997). 그러나 임야와 농지 등에서 발생하는 비점원에서 난분해성유기물질이 지표수 유기물질 농도에 미치는 영향이 크기 때문에(최, 2005; Kim et al., 2004) 하천의 유기물질 오염의 평가하는데 BOD만을 사용하는 것에는 더 많은 논의가 필요하다.

대부분의 비점원 오염물질의 유출량을 산정하는 작업에서 접근법은 기존문헌의 도시지역, 농촌지역, 축산지역의 원단위 부하량과 유역면적 또는 발생개체수를 곱하여 사용하는 것이다. 국내의 논, 밭 또는 임야 유역의 비점원발생 BOD 부하량을 측정된 성과로는 논외의 BOD부하량은 5.5-31.4 kg/ha/yr, 밭의 경우 5.8-25.9 kg/ha/yr, 임야의 경우 0.68-1.37(평균 1.00) kg/km²/d으로 보고되고 있다(최, 1991, 1999). 이러한 접근법은 원단위의 산정작업에서 배출 부하량과 발생부하량의 개념이 명확하게 구분되어 있지 않고 계절의 오차가 무시되어 있기 때문에 부하량의 추정에서 오차가 발생할 수 있다. 또한 강우유출수의 많은 부분을 차지하는 임야 등의 유출수 특성을 조사한 연구가 적으며 한정된 자료를 이용한 특정유역에서의 원단위 발생량의 추정은 특성이 다른 유역에서의 적용이 어렵다. 또한 발생부하량과 배출부하량간의 차이를 고려하기 위하여 배출율을 고려하지만 이의 정량화에는 상당한 오차가 발생할 수 있다.

농경지의 비점원오염 부하량을 측정하는 경우 물수지의 해석이 매우 복잡하므로 오염물질 수지를 작성하는 것이 어렵다. 대부분의 경우 1) 증발산계(lysimeter)를 이용한 물질수지 실험방법, 2) 소규모 면적 농지를 이용한 물질수지 조사, 3) 대규모 농지 조사, 4) 농경지 하천조사 등의 방법이 있는데(國松孝男, 1989), 이때 대상으로 하는 지역의 규모와 물수지 조건 등이 다르므로 나타나는 결과도 상당한 차이가 있다.

비점원 오염물질이 유입하는 지표수 수질을 모니터링하고 이 자료의 통계처리를 통하여 비점원 부하량을 예측하는 시도가 근래에 있었다. Brezonik 등(2002)은 문헌상의 도시유역 유출수 농도를 사용하여 강우유출수 농도에 영향을 미치는 인자를 파악하고 TSS, VSS, COD, Pb 및 영양

염류 부하량을 추정하는 경험식을 제안하였다. 경험식은 강우량과 불투수층, 유역면적의 함수로 나타내었으며 R²값은 0.78이었다. 그러나 이 경험식은 도시유역을 대상으로 하고 있으며 BOD항목을 제외하고 있다. 김 등(2003)은 농지-임야 4개 유역의 40개 강우사상에 대한 강우유출수의 유량평균가중농도(EMC: Event Mean Concentration)를 측정하고 EMC에 영향을 미치는 여러 인자를 독립변수로 하여 여러 수질항목의 EMC를 예측하는 예측식을 제시하였다. 그러나 생화학적 산소요구량(Biological Oxygen Demand: BOD) 부하량에 대한 측정치를 제시하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 농지와 임야가 혼합된 유역에서의 강우유출수 측정성적을 이용하여 발생량의 특성을 통계적으로 파악하고 강우유출수의 농도와 부하량에 영향을 미치는 인자를 연구하였다. 또한 BOD 부하량과 인자간의 관계를 연구하여 타 지역에 적용할 수 있는 BOD 부하량 예측식을 작성하였다.

2. 연구 방법

농지와 임야 지역에서 발생하는 강우유출수의 수질을 측정하기 위하여 4개의 농지-임야 유역을 선택하였다. Table 1은 연구대상인 4개 유역의 특성을 나타내고 있다. 유역은 임야와 농지가 혼합되어 있으며 농경지 이외의 지역은 임야지역이 대부분이다. 유역 번호(1-4)는 유역내 농지의 면적비 순으로 유역 1은 대부분이 임야이고 유역 4의 경우는 농지가 35.9%를 차지하고 있다. 각 유역에서 2002년 4월~9월까지 유역당 10개의 강우사상씩 총 40개 강우사상의 강우유출수를 측정하였다. Table 2는 본 연구에서 측정 대상으로 한 40개 강우사상의 강우량, 강우시간, 청천일수를 정리한 것이다. 강우사상당 유량 및 15개 이상의 시료를 채취하였으며 채취한 시료는 COD_{cr}, SS 등의 유기물질 항목을 수질오염공정 시험법과 Standard Methods 20th ed. (APHA, 1999)에 의거해 분석하였다. 강우유출수 시료의 채취 및 화학분석결과는 보고서(김, 2004)에 자세하게 수록하였으며 본 논문에서는 자료의 통계처리에 대해 다루었다.

지표수 수질의 유기물질 항목(BOD, COD_{cr}, SS)간의 관

Table 1. Topography and land use description of the study watersheds (after Kim, 2004)

Watershed	Name	Area A (Km ²)	Length ^a L (Km)	Mean width A/L (Km)	Shape factor A/L ² (Km)	Density L/A (Km ⁻¹)	Mean slope (%)	RAIN _{ave} ^b (mm)	Land use (%)
1	Sutong	3.38	2.875	1.176	0.409	0.851	62.61	1356.7	forest 99.5, road 0.1, others 0.4
2	Sansuchon	2.85	1.575	1.810	1.149	0.553	22.64	1252.1	rice paddy 1.8, cropland 0.7, forest 94.2, road 0.7, others 2.6
3	Daegokchon	4.97	1.649	3.014	1.828	0.332	41.17	1252.1	rice paddy 8.4, cropland 6.4, forest 82.3, road 1.4
4	Sinheung	27.37	6.173	4.434	0.718	0.226	5.97	1356.7	rice paddy 35.9, forest 44.8, road 4.7, residential 13.3, others 1.3

^a channel length

^b average annual precipitation depth

Table 2. Description of rainfall events monitored in this study (after Kim, 2004)

Event #	1 ^a			2			3			4		
	RAIN ^b	T ^c	DAY ^d	RAIN	T	DAY	RAIN	T	DAY	RAIN	T	DAY
1	18.5	67.5	5	1.0	9.8	3	1.0	9.8	3	18.5	67.5	5
2	66.5	60.7	12	16.5	8.2	5	16.5	8.2	5	66.5	60.7	12
3	14.4	26.5	3	42.2	39.3	2	22.0	20.6	5	14.4	26.5	3
4	43.5	36.0	2	129.0	46.0	2	42.2	39.3	2	43.5	36.0	2
5	44.5	47.6	1	24.0	36.2	7	129.0	46.0	2	44.5	47.6	1
6	259.8	123.8	11	0.1	17.0	1	24.0	36.2	7	259.8	123.8	11
7	35.0	41.3	1	19.5	31.0	10	0.1	17.0	1	35.0	41.3	1
8	4.5	22.3	4	89.5	52.0	2	19.5	31.0	10	4.5	22.3	4
9	37.0	30.0	3	12.0	24.0	7	89.5	52.0	2	37.0	30.0	3
10	135.0	60.0	2	118.0	252.0	2	12.0	24.0	7	135.0	60.0	2

^a watershed

^b precipitation depth (mm)

^c rainfall duration time (hr)

^d dry days since last rainfall event (day)

계를 파악하기 위하여 2003년 10월부터 2004년 4월까지 일주일 간격으로 금강 하류의 현도, 매포, 부강, 금남, 공주, 유구 및 Table 1의 유역 1, 유역 4의 시료채취지점 등 8개 지점에서 일주일 간격으로 6개월간 채취한 시료(시료의 수:184=8지점×24회)를 채취하여 유기물질의 농도를 분석하였다.

연구대상 유역에서 발생하는 비점원 BOD부하에 대한 영향인자 파악을 위하여 수질 및 유량 자료를 통계적으로 분석하였다. 통계처리는 SPSS ver. 12K를 이용하였으며 기술 통계, 인자간 상관분석, 다중 선형회귀분석을 수행하였다. 4개의 시범유역간 강우유출수의 EMC크기의 차이를 분석하기 위하여 분산분석(ANOVA: ANalysis of VAriance)과 Tukey 사후분석을 실시하였다. 유의수준(α)는 0.05 이상인 경우와 0.01인 경우를 구분하여 각각 *, **로 표시하였다.

3. 연구 결과 및 토론

우리나라는 지표수 수질의 등급 분류를 위하여 BOD농도를 주로 사용한다. 이는 수질항목인 pH, DO 농도, SS 농도, BOD 농도, 대장균수 중 BOD농도가 등급간 차등이 뚜렷하기 때문이다. 그러나 BOD는 실제 측정오차가 상당히 많은 수질 항목이어서 신뢰성 있는 자료의 축적이 어렵다. 따라서 재현성이 비교적 높고 상대적으로 측정이 간편한 수질항목인 화학적산소요구량(COD)과 부유물질(SS) 농도를 이용하여 BOD간 상관식을 구하고자 하였다. 금강 하류 내 8개 지점의 24회 수질측정성과를 이용하여 상관도 분석을 실시한 결과 SS는 BOD와 상관도가 통계적으로 유의하지 않은 반면(Pearson계수=-0.091, 유의확률=0.347), COD는 BOD와 매우 높은 상관도(Pearson 계수=0.732, 유의확률<0.01)를 보였다. Fig. 1은 COD와 BOD간의 선형관계를 보임을 알 수 있고 회귀분석 결과 다음 추정식을 얻었다.

$$BOD = 0.5146 \times COD + 0.6929 \quad (p<0.01) \quad (1)$$

여기서, BOD=BOD 농도 (mg/L); COD=COD 농도 (mg/L)

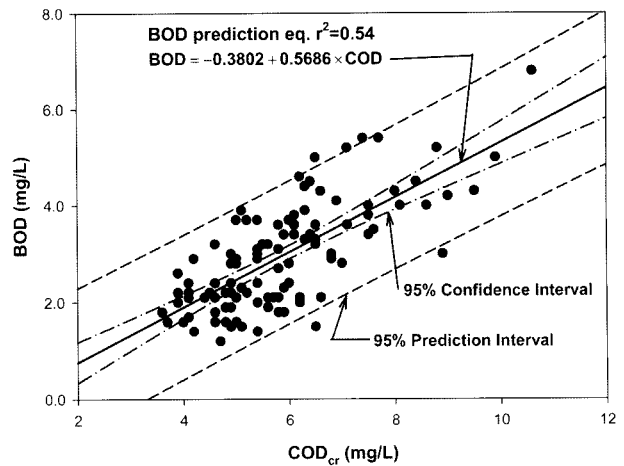


Fig. 1. Biological Concentration Prediction as a Function of Chemical Oxygen Demand Concentration.

이다. 식 (1)을 이용하여 강우유출수 수질의 COD 농도를 BOD 농도로 전환하였다.

Table 3은 4개 유역 40개 강우사상에 의한 강우유출수 농도분석 자료에 대한 기술통계치를 나타내고 있다. n은 각 유역에서의 측정된 시료의 총 개수이며 각 유역에서의 평균과 표준편차, 표준오차($\sigma/n^{0.5}$), 최소값, 최대값 및 유역간 평균값을 나타내고 있다. 부유물질 농도는 임야가 대부분인 유역 1과 비교하여 유역 2, 유역 3, 유역 4의 평균농도가 큰 것을 보이고 있으나, 특별한 경향을 보이고 있지 않으며 표준 편차의 값이 크므로 강우시 부유물질 유출농도의 변화가 큰 것을 나타내고 있다. 유기물질의 농도 또한 1유역에서 가장 작고 2, 3, 4 유역으로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다.

강우유출수의 수질이 지표수의 수질에 영향을 미치지만 농도의 변화 보다는 총 부하량이 중요한 수질영향 및 결정 변수이다. 이는 수질 농도의 변화보다는 오염물질이 수체에 유입되면 확산 및 혼합 등의 과정을 거쳐 수체에 영향을 미치기 때문이다. 이와 같은 이유로 강우사상에 대한 평균 농도 또는 유량가중 평균농도(Event Mean Concentration:

Table 3. Descriptive statistics of concentration range of organics of rainfall runoff from agricultural-forestry watersheds (unit: mg/L)

Constituent	Watershed	n ^a	Average ^b	SD ^d	SE ^e	Minimum	Maximum
SS	1	147	2.1	10.0	.83	nd ^e	112
	2	150	60.8	180.4	14.7	.30	1425
	3	149	116.4	398.1	32.6	.30	3510
	4	143	86.2	294.0	24.6	2.50	2612
	Average ^c			66.4	266.1	10.9	
COD	1	147	4.9	4.9	.41	nd	28.6
	2	150	17.1	54.1	4.42	.70	442.0
	3	149	12.6	16.5	1.4	1.10	141.8
	4	143	19.8	38.3	3.2	nd	423.4
	Average			13.6	34.7	1.4	
BOD	1	147	2.4	2.8	.23	nd	15.9
	2	150	9.3	30.8	2.5	.02	250.9
	3	149	6.8	9.4	.77	.25	80.3
	4	143	10.9	21.8	1.8	nd	240.4
	Average			7.3	19.7	.81	

^a number of samples taken at the designated watershed^c standard deviation^e not detected^b average of the designated watershed^d standard error

EMC)는 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 평가하는데 가장 적절한 인자로 인식되고 있으며, 가장 널리 이용되고 있다(Novotny et al., 1994).

강우 사상에 따라서 관측된 유량자료와 이에 해당하는 수질 자료를 이용한 EMC 농도는 아래 식 (2)에 의해서 계산할 수 있다.

$$EMC_i = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \quad (2)$$

여기서 Q_i 는 관측시간 t 에서의 유출량(m^3/hr), C_i 는 오염물질 농도(mg/L), EMC는 강우사상에 대한 평균농도(mg/L)이

다. 본 연구와 같이 강우사상 당 산정 되는 EMC 농도는 1) 직관적으로 요약 할 수 있으며, 2) 서로 다른 유역과 강우 사상에 대해 상호 비교평가 가능하며, 3) 어떤 강우 사상으로 부터 발생하는 총 강우 유출수내 오염물질 농도를 발생빈도 개념을 도입해서 해석할 수 있으며, 4) 해석상 오류를 범할 수 있는 자료를 활용자의 취사선택을 위해 보다 더 유용한 형태로 보고 할 수 있다는 장점이 있다(US. EPA, 1983).

Table 4는 유역별 오염물질 항목별 EMC에 대한 기술통계치를 나타내고 있다. SS를 제외하고 임야가 대부분인 유역 1의 EMC 농도가 대체적으로 낮은 값을 보이고 있으며, 유역내 농도가 가장 많이(35%) 포함된 유역 4의 EMC 농도는 높은 값을 보이고 있다. 부유물질(SS) EMC의 평균치

Table 4. Descriptive statistics of EMCs of rainfall runoff from agricultural-forestry watersheds

Constituent	Watershed	n ^a	Average ^b	SD ^d	SE ^e	Minimum	Maximum
SS	1	10	5.0	11.3	3.6	0.2	37.0
	2	10	62.2	67.4	21.3	3.1	195.4
	3	10	227.2	369.9	116.9	5.6	1169.7
	4	10	236.9	439.3	138.9	8.4	1335.6
	Average ^c			132.8	296.2	46.8	
COD	1	10	5.9	4.6	1.4	2.1	16.6
	2	10	7.2	2.8	.89	3.2	10.9
	3	10	16.6	14.4	4.5	2.8	49.8
	4	10	41.1	65.0	20.6	5.4	223.3
	Average			17.7	35.1	5.6	
BOD	1	10	3.0	2.6	.8	1.08	9.05
	2	10	3.7	1.6	.5	1.44	5.82
	3	10	9.2	8.6	2.7	1.22	29.75
	4	10	22.7	37.0	11.7	2.49	126.58
	Average			9.7	19.9	3.2	

^a number of data^c average of all four study watershed^e standard error^b average of the designated watershed^d standard deviation^f not detected

를 보면 유역의 대부분이 임야지역인 유역 1이외의 유역 3과 유역 4는 매우 유사한 값을 보이고 있다. 임야유역과 농지-임야 혼합유역의 SS EMC는 큰 차를 보이지만, 농지의 혼합비율에 따른 농지-임야 혼합지역인 유역 3, 4의 경우 배출되는 토사의 영향은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 COD와 BOD는 대체적으로 유역내 농지의 비율이 높을수록 증가하는 양상을 보이므로 농경활동과 유기물질의 배출이 밀접한 관계가 있음을 보이고 있다.

Fig. 2는 Table 1의 4개의 유역에서 산정된 BOD의 EMC에 대한 초과누적 확률(Exceedence Cumulative Probability)을 계산하여 BOD EMC와 같이 도시한 것이다. 초과누적 확률 p 는 어떤 크기의 EMC인 L 이 확률치 l_p 보다 p 의 시간 동안 같거나 큰 확률을 나타내며 통계적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

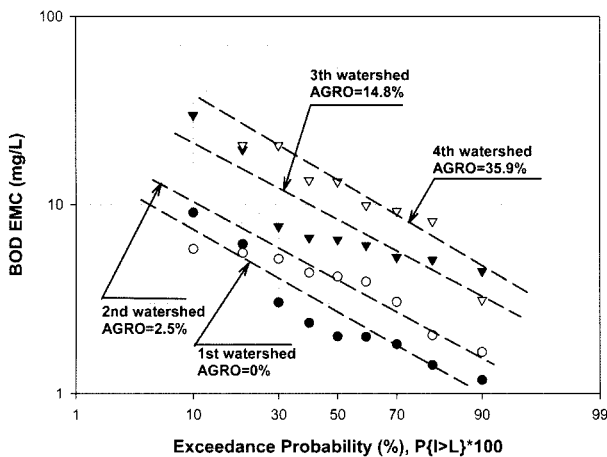


Fig. 2. Load Duration Curve for Biological Oxygen Demand (BOD).

$$p = \Pr\{L > l_p\} = EP_L(l_p) = 1 - F_L(l_p) \tag{3}$$

여기서, $F_L(l_p)$ 는 EMC의 누적분포함수를 나타낸다. Fig. 2는 대수함수를 취한 EMC의 값을 내림차순으로 정렬하고 다음과 같은 방법으로 누적확률을 계산하여 x축을 확률함수로, y축을 선형대수로 하여 그릴 수 있다.

$$p(\text{in } \%) = \frac{100m}{n+1} \tag{4}$$

여기서, m =내림차 순서; n = 시계열 자료의 수 이다. Fig. 2를 이용하면 유역 면적, 토지이용도 등 특성이 유사한 지역에서 발생하는 오염물질 부하량을 확률적으로 구할 수 있다.

도시유역의 경우에는 주거지역, 상가지역, 도로지역, 공단지역 등의 토지이용특성이 강우유출수의 수질의 변화에 미치는 영향은 적다고 한다. 공단지역에서 발생하는 강우유출수에 중금속이 많이 포함되어 있는 등 주거지역에서의 강우유출수 배출양상과는 다르겠지만 강우의 특성으로 인한 영향이 더 크기 때문이다. 그러나 Fig. 2에 보인 것과 같이 농지와 임야지역에서는 농지가 많이 포함될수록 모든 항목의 EMC가 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 유역 내 농지의 비율 이외에도 유역의 특성으로는 유역의 형상, 유출률, 유역의 면적, 하상계수 등을 들 수 있다. 그 중 유역의 면적은 많은 영향을 미치는데 유역면적이 클수록 유달률이 작아지므로 발생부하량과 배출부하량간의 차이가 발생하는 것이다.

강우유출수의 측정 자료를 통계적으로 분석하여 EMC의 크기에 영향을 미치는 인자에 대하여 분석하였다. 유역의 특성인자로 유역내 농경지 비율(AGRO), 면적(AREA), 하도길이(LENGTH), 유역폭(MWIDTH), 형상계수(SFACTOR), 유역밀도(DENSITY), 유역경사(MSLOPE)를 고려하였으며 강우의 특성에는 강우시간(T), 총 강우량(RAIN), 강우전 청천일수(DAY)를 고려하였다. 유출유량의 특성은 총 유출유량(V)을 고려하였다. Table 5는 EMC와 영향인자의 Pearson 상관계수를 나타낸 것이다. 1%, 5% 유의 수준을 갖는 인자는 각각 **와 *로 표시하였다. Pearson 상관계수는 -1~+1의 값을 가지며 완전 상관은 +1, 완전 역상관은 -1의 값을 나타낸다. Table 5에서 농경지 비율, 유역폭, 하도길이, 유역면적의 변수가 비슷한 Pearson 계수를 보이고 있다. 총 유출유량은 EMC와 선형상관도가 낮은 것으로 나타났다.

EMC와 강우량(RAIN), 강우시간(T) 간의 상관계수가 낮게 나타나고 있다. 이는 많은 강우량이 높은 오염물질의 유출을 유발하지는 않는다는 것을 의미하며 따라서 큰 강우사상이 청정수자원 형성에서의 효용성이 높다. 유역면적과 EMC간의 상관계수도 높은 것으로 나타나고 있으나 연구대상유역은 유역면적이 일정하지 않으므로 유역면적의 효과에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 측정된 40개 강우사상의 유출수 분석자료를

Table 5. Correlation analysis result between EMCs and rainfall runoff variables

EMC	RAIN ^a	V ^b	T ^c	DAY ^d	AREA ^e	LENGTH ^f	MWIDTH ^g	SFACTOR ^h	DENSITY ⁱ	MSLOPE ^j	AGRO ^k
BOD	.030	.057	-.023	-.129	.390*	.348*	.387*	-.024	-.323*	-.295	.399*
SS	.053	.032	.013	-.216	.224	.145	.321*	.183	-.332*	-.206	.298

^a precipitation depth (mm)

^c rainfall duration time (hr)

^e watershed area (km²) (A)

^g mean width (A/L)

ⁱ density (L/A)

^k agricultural area ratio to total area (%)

^b total discharged volume (m³)

^d number of dry days before rainfall event (day)

^f channel length (km) (L)

^h shape factor (A/L²)

^j mean slope (%)

이용하여 각 오염물질별 EMC를 예측하는 다중선형 회귀식을 구하였다. 회귀식에는 유역의 특성, 강우의 특성, 유출유량의 특성 등 환경인자만을 포함하였다. 회귀식은 특성상 독립변수를 많이 포함할수록 R²의 값이 증가하지만 다중공선성(multi-collinearity)의 문제가 발생할 수 있고(김, 1978), 또한 실무에서 가용한 자료는 한정되어 있다. 따라서 EMC의 추정에서는 Table 5의 상관도 분석결과에서 보인 바와 같이 EMC에 영향을 많이 미치는 유역의 특성인자와 유량인자 및 강우사상의 자료에서 손쉽게 얻을 수 있는 독립변수만을 사용하였으며 단계변수선택으로 가장 간단한 모형을 찾고자 하였다.

Fig. 3은 BOD EMC와 강우량(RAIN), 배출유량(V), 유역의 농지비(AGRO)간의 산점도 행렬이다. 강우량과 배출량 간에는 뚜렷한 선형관계가 존재하고 있으며 BOD EMC와 V간에도 선형관계가 존재함을 알 수 있다. Table 5에서 BOD EMC와 V간의 선형상관도가 낮았으나 각 유역별 BOD EMC와 V의 선형상관도는 높은 것을 알 수 있다. Table 5에서 EMC에 영향을 미치는 여러 인자가 있으나 유역의 수가 4개이므로 AGRO와 같은 인자의 값이 4개밖에 존재하지 않고, 따라서 추정형 변수이지만 계급별 변수와 같이 계산된다. 이러한 경우 가용한 인자를 모두 사용하면 다중공선성의 문제가 발생하게 된다.

다중선형회귀분석으로 얻어진 BOD항목 EMC 예측식은 다음과 같다:

$$EMC_{BOD} (mg/L) = 10^{0.413+1.157 \times 10^{-7} \cdot V+0.018 \cdot AGRO} \quad (5)$$

여기서 AGRO = 유역에서 논, 밭 등 농경지가 차지하는 비율(%); AREA = 유역면적(Km²). 식 (5)를 이용하면 농지

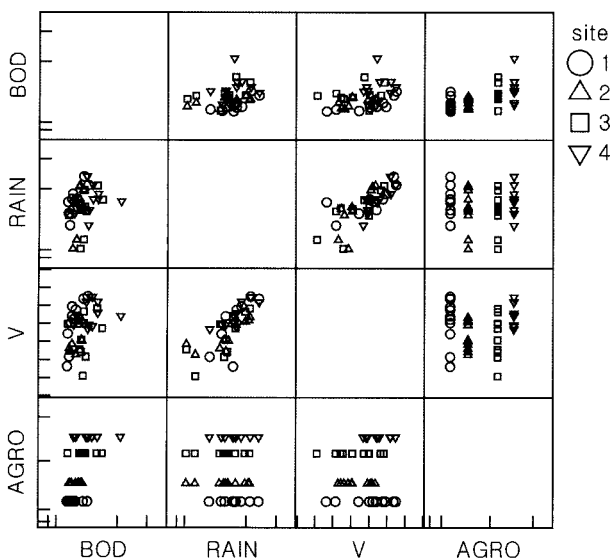


Fig. 3. Scatter plot matrix of BOD EMC (mg/L), precipitation depth (mm), total discharged volume V (m³), and rate of agricultural land use to total watershed area (dimensionless).

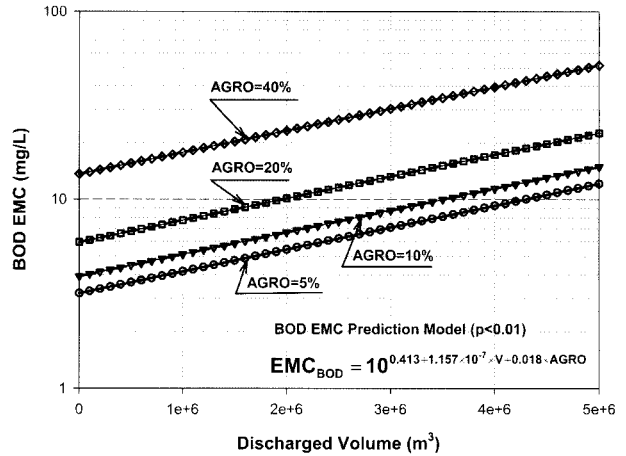


Fig. 4. Prediction chart of Event Mean Concentrations of Biological Oxygen Demand as functions of discharged volume and rate of agricultural land use to total watershed area (AGRO).

-임야 혼합지역에서 유역, 강우 및 유량 특성의 함수로 여러 오염물질 항목의 배출부하량을 계산할 수 있다.

Fig. 4는 식 (5)를 이용하여 BOD 항목 EMC의 예측값을 유역내 농지비(AGRO)와 강우유출유량(V)의 함수로 나타낸 것이다. 유역내 농지의 비가 각각 5%, 10%, 20%, 40%이고, 강우유출수의 유량이 0으로부터 5,000,000 m³까지 증가할 경우 BOD 항목의 EMC를 계산할 수 있다.

예를 들어 유역면적이 100 ha, 토지이용도는 농지가 20%, 임야가 80%이고, 평균 지표면 직접유출율이 0.15인 지역의 년 부하량을 구하려고 할 때, 연간 강우량이 1300 mm이고 연간 52회의 강우사상이 있다고 가정하고 원단위를 이용한 산정결과와 비교하면 다음과 같다. 농지의 비점원 원단위를 35 kg BOD/ha/yr, 임야의 원단위를 3.5 kg BOD/ha/yr라고 할 때 대상유역에서 발생하는 년 부하량은 980 kg BOD/yr 이다(35×20+3.5×80). 대상 유역의 1회당 강우유출 유량은 3,750 m³ (=1300/52×0.15×1×1000)이며 이때 BOD EMC는 식 (5)에서 5.93 mg/L가 된다. 따라서 연간 부하량은 1,156 kg/yr (=5.93×3,750×52/1000)가 된다. BOD EMC 예측식과 원단위 산정법을 이용한 부하량 산정치가 비슷한 값을 보이지만 표면 유출율과 유달율의 자료가 부하량에 많은 영향을 미치므로 유역의 물수지분석 결과를 참조하여 부하량을 산정할 필요가 있다.

5. 요약 및 결론

우리나라 토지이용의 대부분(84%)을 차지하는 농지-임야 유역의 BOD 부하량 예측식을 작성하였다. 화학적산소요구량(COD)과 생화학적산소요구량(BOD)간의 관계를 이용하여 BOD 항목의 EMC를 계산하였고 계산된 BOD EMC와 제반 영향인자간의 통계분석을 실시하여 BOD EMC 추정식을 산정하였다. 유역의 특성인자들로 BOD EMC를 추정하고 강우량으로 BOD 부하량을 계산하는 BOD 항목 EMC 추정식은 수체의 오염부하추정을 위한 노력과 시간을 많이

줄일 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 금강수계 환경기초조사사업의 지원을 일부 받았습니니다. 연구 결과는 저자의 견해이며 연구비 지원기관의 공식적인 자료가 아닙니다.

참고문헌

- 김건하, 통합 물수지 분석기법의 도입을 위한 기초 수질기반 평가 최종보고서, 수자원의 지속적 확보기술개발사업, 한국건설기술연구원, pp. 711-765 (2004).
- 김영철, 김건하, 이동률, 농어촌 소유역에서 EMC 농도를 이용한 오염물질 부하량 산정기법의 개발, 한국수자원학회지, **36**(4), pp. 691-703 (2003).
- 김정년, 통계학, 경문사, pp. 496-500 (1978).
- 최의소, 영양염류 원단위 산정에 관한 연구, 한국 환경과학 연구 협의회, pp. 87-127 (1991).
- 최의소, 상하수도공학, 청문각, pp. 200-203 (1999).
- 최의소, 우리나라 물환경산업의 과거와 현재, 세계화를 지향하는 한국의 물 산업 논문집, 고려대학교 100주년 기념 학술시리즈, #18, 한림원, pp. 13-29 (2005).

- 최지용, 신은성, 수질환경 및 규제기준의 합리적 조정, 한국 환경정책평가연구원, pp. 114-115 (1997).
- 최지용, 신은성, 농업지역 비점오염원 관리방안 연구, 한국 환경정책평가연구원, pp. 1-2 (1998).
- 國松孝男, 村岡浩爾 編著, 河川汚濁 Model 解析, 技報堂出版, pp. 54-55 (1989).
- APHA, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th ed. (1999).
- Brezonik, P. L. and Stadelmann, T. H., 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**(7), 1743-1757 (2002).
- Kim, S., Kim, T., Kim, G., Choi, S. and Choi, E., Diffuse Sources Contribute Non-Biodegradable COD in Reservoirs in Korea, Proceeding of 8th Diffuse/Nonpoint source pollution IWA Special Conference, Kyoto, Japan, CD-Rom (2004).
- Novotny, V. and Olem, H., *Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*. Van Nostrand Reinhold, New York (1994).
- SPSS ver. 12k for Windows User's Manual.
- US EPA, Results of the Nationwide Urban Runoff Program, 1, Final Report. Water Planning Division, U.S. EPA, Washington DC. (1983).