

연구논문

교외 산업단지지역 강우유출수내 비점오염물질의 유출특성 및 원단위 산정

김성준 · 신선미 · 전용태 · 원찬희

전북대학교 환경공학과

(2012년 3월 2일 접수, 2012년 4월 17일 승인)

Washoff Characteristics of Non-point Source pollutants and Estimation of Unit Loads in Suburban Industrial Complex Areas Runoff

Sung-Joon Kim · Seon-Mi Shin · Yong-Tae Jeon · Chan-Hee Won

Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

(Manuscript received 2 March 2012; accepted 17 April 2012)

Abstract

The characteristics of stormwater runoff and estimation of unit loads were examined in suburban industrial complex areas. During rainfall event, the peak concentrations occurred within the first 100 minutes after rainfall and then the highest concentration of NPS pollutants sharply decreased, showing strong first flush effect in suburban industrial complex. The cumulative load curves for NPS pollutants showed above the straight line, indicating that first flush effect occurred in suburban industrial complex. While the mean TSS, BOD, COD, TN and TP EMCs values were shown the highest values as 120.6 mg/L, 20.8 mg/L, 44.0 mg/L, 5.58 mg/L and 1.46 mg/L respectively. Unit loads estimated from the EMCs were TSS 43.86kg/km²/day, COD 52.45kg/km²/day, BOD 24.79kg/km²/day, T-N 6.65kg/km²/day, T-P 1.75kg/km²/day, and Pb 0.10kg/km²/day. Results of unit loads were compared with the unit pollutant loads from land-use in Korea and USA. The unit load of TSS was lower than that of USA. Estimated BOD and T-N and T-P unit loads were lower than that of Korea.

Keywords : EMC, Unit Loads, First flush effect, Suburban Industrial Complex, Non-point source, Runoff

1. 서론

그동안 우리나라의 수질관리는 수질오염저감 효과와 투자비 우선순위에 의거하여 하수처리장, 하수관거, 폐수처리장 및 축산폐수 공공처리장 등 점오염원 위주의 오염저감시설을 확충해 왔다. 이러한 정부의 노력으로 하천과 호소에 대한 수질개선의 효과는 어느 정도 효과를 이루었으나 더 이상의 진전을 보이지 않는 시점에서 비점오염원 관리의 중요성이 대두되고 있다. 이에 환경부는 총괄적인 오염원관리를 위하여 유역으로부터 유입되는 오염물질의 총량을 규제하는 오염총량관리제를 도입하였으며 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원의 관리에 대한 중요성을 부각시켰다(이은주 등, 2006). 국내 4대강에서의 수계별 오염총량 목표수질은 BOD 기준으로 1~6 mg/L 범위로 산정되어 있으며 비점오염원에 의한 오염 부하량 기여율은 약 22~37% 정도 범위를 차지하고 있다.(김이형 등, 2006; 환경부, 2005). 따라서, 환경부에서는 “비점오염원 관리 대책 수립 계획”을 2002년도에 마련하였으며, 2004년 6월에 “물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원 관리 종합대책”을 발표하며 비점오염원 관리에 대한 종합적인 관리계획을 수립하여 실시하고 있다(환경부, 2004).

이러한 비점오염원의 효율적인 관리를 위하여 환경부에서는 각종 개발사업 및 수질오염총량 산정시 토지이용별 비점오염부하량 산정을 위한 원단위를 Table 1과 같이 제시되고 있다. 비점오염부하원단위는 수계의 오염을 예방하는 저감시설 설계 및 총량관리에 매우 중요함에도 불구하고 기존 수계오염총량관리기술지침에 제시된 발생부하원단위는 전, 담, 임야, 대지, 기타의 총 5개의 대표적인 지목에 대한 원단위만을 제시하고 있다. 이중 가장 높은 부하원단위를 가지고 있는 대지의 경우 실제 지목상 대지, 산업용지, 도로, 철도 등을 포함하고 있어 각 지목별로 상세한 원단위가 제시되어 있지 않고 있어 토지이용의 고도화를 반영하지 못하고 있어 적용에 다양한 문제점을 가지고 있으며, BOD, T-N, T-P에 한정되어 제시되고 있는 오염원단위는

Table 1. Unit pollutant loads from landuses in Korea(MOE, 1999)

Land uses (kg/km ² /day)	BOD ₅	T-N	T-P
Wet paddy fields	2.3	6.56	0.61
Dry paddy fields	1.6	9.44	0.24
Forest	1.0	2.20	0.14
Urban	85.9	13.69	2.10
Prairies	35.1	53.7	1.72
Golf course	1.0	3.56	2.76
Others	1.0	0.06	0.03

Table 2. Unit pollutant loads from homogeneous urban watersheds in Milwaukee, USA (Bannerman *et al.*, 1983)

Land uses (kg/km ² /day)	TSS	T-P	Pb
Highways	268.22	0.28	1.36
Industrial areas	262.19	0.41	0.74
Commercials areas	262.19	0.41	0.74
Parking lots	142.11	0.21	0.26
High density residential areas	133.42	0.31	0.25
Medium density residential areas	59.18	0.16	0.07
Low density residential areas	3.01	0.01	0.00
Parks	0.82	0.01	0.00

비점오염원의 현실을 반영하지 않은 것으로, 도심 및 산업단지에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 입자상 물질과 각종 중금속에 대한 원단위의 산정과 제시가 필요하다(이소영 등, 2008). 이와는 다르게 Table 2에 제시되어 있는 미국내 토지이용에 따른 오염물질 발생 원단위를 살펴보면 국내 기준과 다르게 도심지역의 다양한 토지이용에 따른 원단위를 세부적으로 분류하여 제시하고 있으며 입자상물질과 중금속에 대한 오염원단위를 제시하고 있다(Bannerman *et al.*, 1983).

이러한 세분화된 지목별 오염원단위 수립을 위해서는 토지이용에 따른 지목별 비점오염원 유출특성에 대한 장기적인 모니터링과 체계적인 비점오염원 관리에 대한 연구가 필요하나 국내 비점오염원에 대한 연구는 한정된 조사범위 및 조사방법, 모니터링 기초자료 및 결과부족으로 인하여 비점오염원에 대한 체계적인 관리에 대하여 어려움이 크다(김이형 등, 2005). 따라서, 세분화된 비점오염원의 효율적인 관리를 위해서는 우선적으로 토지이용별 대상지역에 대한 강우사상별 비점오염원 유출특성에 관

한 자료들이 데이터베이스화 되어야 하며, 이때 임의적 추정을 최소화하기 위해서는 개별 지적단위의 오염현황 조사가 필요하다. 최근에는 이러한 이유를 근거로 하여 주요 비점오염원을 세분화된 지목별 비점오염원의 유출특성에 대한 연구가 진행되었다(이소영 등, 2008; 강창국 등, 2009; 최윤영 등, 2011). 그러나, 이러한 선행연구는 입지여건 및 환경적 요인이 비슷한 지역에서 조사가 이루어져 왔다.

산업단지의 비점오염물질의 발생과 유출특성은 도시지역과 유사한 경향을 보이고 있으나, 원료 및 부산물의 야적, 노면상에 비산분진 등의 다량 축적으로 인해 지표면의 침투/불침투성에 관계없이 강우유출수에 고농도의 오염물질이 유입될 것으로 예상되고 있다. 특히, 다른 지역에 비하여 불투수층의 구성비가 높고 산업단지 구성업종의 종류에 따라서 공장 부지내 기름성분, 중금속 성분, 난분해성 물질 및 물류 이동량 집중으로 인한 도로변 오염물질을 포함한 비점오염물질이 유출될 가능성이 매우 높고 강우사상에 따라 인근 하천에 유입되어 수계에 영향을 미친다. 이러한 산업단지는 산업화에 따라서 매년 증가하는 추세이며, 이에 따라서 비점오염원에서의 차지하고 있는 비중이 증가되고 있으나, 국내에서는 산업단지에서의 강우유출 특성 및 오염물

질 발생에 관한 조사가 매우 빈약하고, 적정기준조차 마련되지 않은 상태이다. 또한 산업단지 입지여건 및 환경적 요소에 따라서 비점오염원의 배출에 대한 영향이 예상되나, 일부 선행연구에서는 도시 근교에 입지한 산업단지에 치중하여 연구가 진행되고 있는 것으로 보고되고 있으며 교외 산업단지에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구는 교외 산업단지로부터 유출되는 강우유출수내 비점오염물질의 유출특성을 파악하고, 유량기중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)와 지역평균농도(Site Mean Concentration : SMC)을 산정하였으며, 도출된 모니터링 결과를 바탕으로 발생부하원단위를 산정하여 국내 및 국외 발생원단위 및 선행연구에서 제시된 결과를 비교하여 효율적인 비점오염원 저감시설의 설계 기초자료 및 적정규제기준등 비점오염원의 최적관리를 위한 기초를 마련하고자 수행하였다.

II. 연구 방법

1. 모니터링 지점 및 방법

모니터링 대상지역은 전라북도 W군 일원에 위치

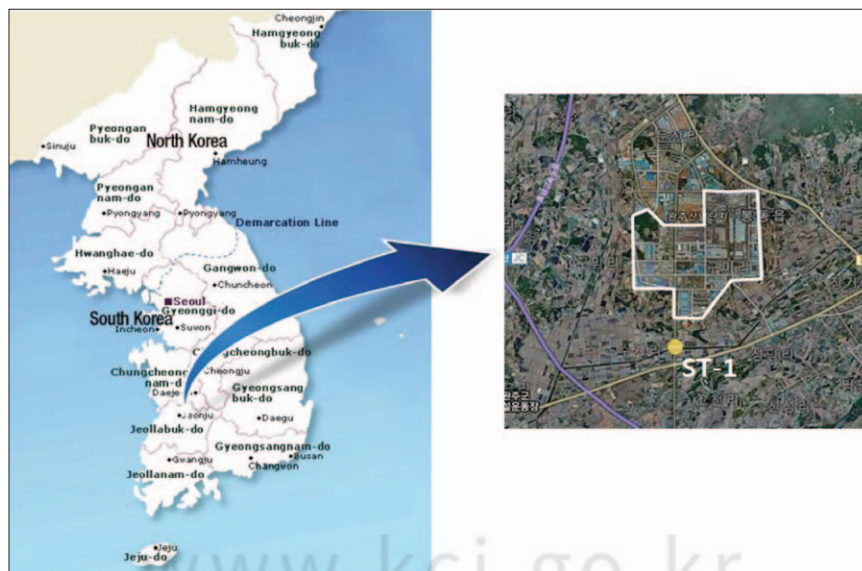


Figure 1. Monitoring locations of study sites.

Table 3. Characteristics of Monitoring locations (Unit : m²)

Monitoring site	Total areas	Industrial areas	Parks areas	Urban areas
W industrial Complex	3,359,000	2,605,000	404,000	350,000

한 W산업단지이며, 배수구역면적은 3,359천m²이다. 전체 입주업체중 금속산업이 차지하는 비중이 78.4%를 차지하고 있으며 기타 석유화학업종이 12.3%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 이 지역은 불투수층의 비율이 88.0%를 차지하고 있어 강우에 대한 유출반응이 매우 민감한 특성을 가지고 있으며, 모니터링지역 북쪽과 남쪽을 관통하는 주도로를 기준으로 배수구역내 분류식 우수관거가 설치되어 있어 발생하는 지표 유출수가 전량 차집되어 만경강으로 배출되고 있다.

본 조사에서는 2010년 3월부터 10월까지 총 8회의 모니터링을 수행하였으며, 초기강우현상을 고려한 모니터링 방법을 선택하였다. 강우 시작 후 유량 측정은 사전에 설치한 초음파식 자동유량계(AMERICA SIGMA INC 910)를 이용하여 5분단위의 측정이 이루어지도록 유량측정을 실시하였다. 강우가 시작된 후 유출되는 최초 수질을 첫 번째 시료로 하여 초기에는 5분 간격으로, 15분 이후부터는 15분 간격으로, 30분 이후는 30분 간격으로 현장 강우조건에 따라 유동성 있게 간격을 조절하여 유출이 끝나는 시점까지 모니터링을 수행하였다. 채취된 수질 시료는 강우 사상이 끝난 후 실험실로 운반되어 가능한 빠른 시간에 수질분석을 실시하였다. 수질시료의 분석 항목은 TSS, BOD, COD, T-N, T-P 및 영양염류 및 중금속등을 Standard Method와 수질오염 공정시험법에 따라 분석하였다.

2. 강우시 비점오염물질 유출특성 분석 및 발생부 하원단위 산정

강우시 비점오염물질 유출성분별 특성을 분석하기 위하여 강우사상별 연속조사를 실시하였다. 강우에 의한 초기세척효과(First flush effect)를 분석하기 위하여 무차원의 누적 유출량과 누적 부하량과의 비율에 의한 방법이 가장 많이 적용되고 있

으며, 이에 따라 본 연구에서도 이 방법을 적용하여 대상구역의 초기세척효과 분석을 하였다.

$$M(V) = \frac{L(t)/\sum L(t)}{Q(t)/\sum Q(t)} \quad (1)$$

$$\frac{L(t)/\sum L(t)}{Q(t)/\sum Q(t)} > 1 : \text{Flushing} \quad (1-1)$$

$$\frac{L(t)/\sum L(t)}{Q(t)/\sum Q(t)} \leq 1 : \text{No Flushing} \quad (1-2)$$

여기서, 강우기간 중 이산시간 동안의 유량 Q(t)에 대한 누적유량 $\sum Q(t)$ 비인, Q(t)/ $\sum Q(t)$ 를 x축으로 하고, 이산시간 동안의 오염부하량L(t)에 대한 누적오염부하량 $\sum L(t)$ 비인, L(t)/ $\sum L(t)$ 를 y축에 도시하였다. 누적유량-부하량비 곡선은 각 강우사상의 유출 특성을 잘 표현하고 있으며, 식 (1-1)과 같이 그래프의 기울기가 1보다 큰 경우는 관측치가 이등분선 위쪽에 위치하고, 초기세척효과가 나타나는 것을 의미하며, 식 (1-2)와 같이 반대 경향은 초기세척효과가 없고 강우 후기에 오염물질 유출이 일어나는 것으로 해석하였다(Bedient *et al.*, 1978; Gupta and Saul, 1996).

본 연구에서는 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)와 지역평균농도(Site Mean Concentration: SMC)를 산정하여 비점오염물질의 유출특성을 파악하였다. 식 (2)는 강우사상에 대한 EMC 산정식을 나타낸 것이다.

$$EMC(mg/l) = \frac{\sum_{t=1}^T C(t) \cdot q_{run}(t)}{\sum_{t=1}^T q_{run}(t)} \quad (2)$$

여기에서 C(t)와 q(t)는 시간 t에서의 오염물질 유출농도와 강우유출량을 의미하고, T는 전체 유출시간을 나타낸다. 이들 값은 모니터링 결과를 통해 구할 수 있다. 그리고 다음의 식 (3)은 개별강우사상의 EMC를 산술평균하는 방법으로 산정되는 SMC를 나타내었다.

$$SMC(mg/l) = \text{Averag EMC of Site} \quad (3)$$

발생부하원단위 산정은 기존 선행연구에서 제시된 실측에 의한 원단위 추정 방법(이소영 등, 2008)에 의하여 산정하였다. 실측에 의한 원단위 추정은 식 (4)에 의하여 추정하였으며, 식 (2)에 의하여 산정된 각 오염물질별 EMC를 이용하여 평균 SMC를 산정한 후 총강우량(mm/day)과 곱한 후, 유역면적(km²)으로 나누어 산정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Unit Load}(kg/km^2 - \text{day}) \\ & = \frac{EMC \times \text{Total Yearly Effective Rainfall}}{\text{Area of Catch Basin}} \quad (4) \end{aligned}$$

III. 결과 및 고찰

1. 강우사상에 따른 모니터링 결과

2010년 3월부터 10월까지 총 8회의 모니터링에 대한 강우사상이 Table 4에 정리 되었다. 선행 건기일수(antecedent dry days, ADD)는 3~10일, 전체 강우량(total rainfall)은 5.0~17.5 mm, 강우 지속시간(runoff duration)은 2.7~4.1 hr, 평균 강우 강도(average rainfall intensity)는 6.0~17.5 mm/hr의 범위로 나타났다.

강우 유출수의 오염물질별 농도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 각 오염물질별 농도 분포는 TSS 1.8~478.1 mg/L, BOD 2.5~56.8 mg/L, CODCr 5.6~120.1 mg/L, T-N 1,240~13,520 mg/L, T-P 0.230~6,490 mg/L Cd은 0.002~0.064 mg/L, Pb은 0.011~0.319 mg/L, Zn은 0.005~

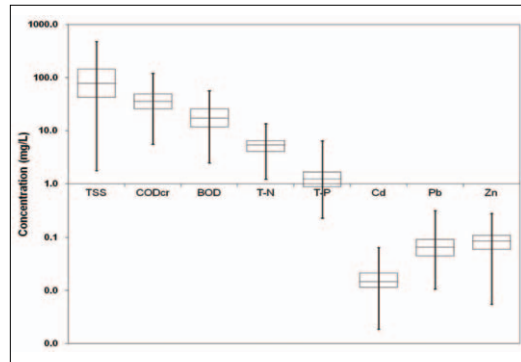


Figure 2. Statistical analysis for pollutants concentrations.

0.283 mg/L의 범위로 나타났다. 이 중 부유물질인 TSS의 최소값과 최대값 농도차이가 271배로 가장 컸고 그 다음은 중금속, 인 영양물질 그리고 유기물질 순이었다. 질소영양물질은 11배로 가장 작은 농도차이를 보였으며 김세원 등의 연구에 비해 다소 낮은 농도분포를 나타냈다(김세원 등, 2009).

Fig. 3은 모니터링을 통한 강우 유출수내 오염물질의 농도변화와 유출량의 관계를 수리·수문 농도 곡선으로 나타내었다. 강우 발생 형태에 따라 각 강우사상의 침투유량은 강우발생시점으로부터 30~110분 후에 나타났으며 대부분의 오염물질 침투농도는 침투유량이 발생하기 15~75분 전에 나타나는 것으로 확인되었다. 즉, 대부분의 강우사상은 강우가 시작된 이후 초기 30분 또는 60분 이내에 침투농도를 보이고 뒤이어 발생하는 침투유량 이후에 저농도로 완만하게 감소하는 전형적인 초기강우 현상을 보였으며, 각 오염물질들은 유량곡선과 유

Table 4. Event table for the suburban industrial complex areas site

Event No.	Event Date	ADD (days)	Total Rainfall (mm)	Duration (hr)	Avg. Rainfall Intensity(mm/hr)	Runoff Coeff. (max)
E-1	2010-03-31	8	6.5	4.0	6.0	0.16
E-2	2010-04-26	3	8.0	3.7	6.9	0.19
E-3	2010-05-17	10	6.0	3.3	7.2	0.15
E-4	2010-06-18	5	5.5	3.2	7.3	0.12
E-5	2010-07-02	4	17.5	3.3	17.5	0.75
E-6	2010-07-16	3	5.0	3.4	6.0	0.15
E-7	2010-08-25	6	15.5	2.7	16.9	0.49
E-8	2010-10-02	9	5.5	4.1	8.3	0.07

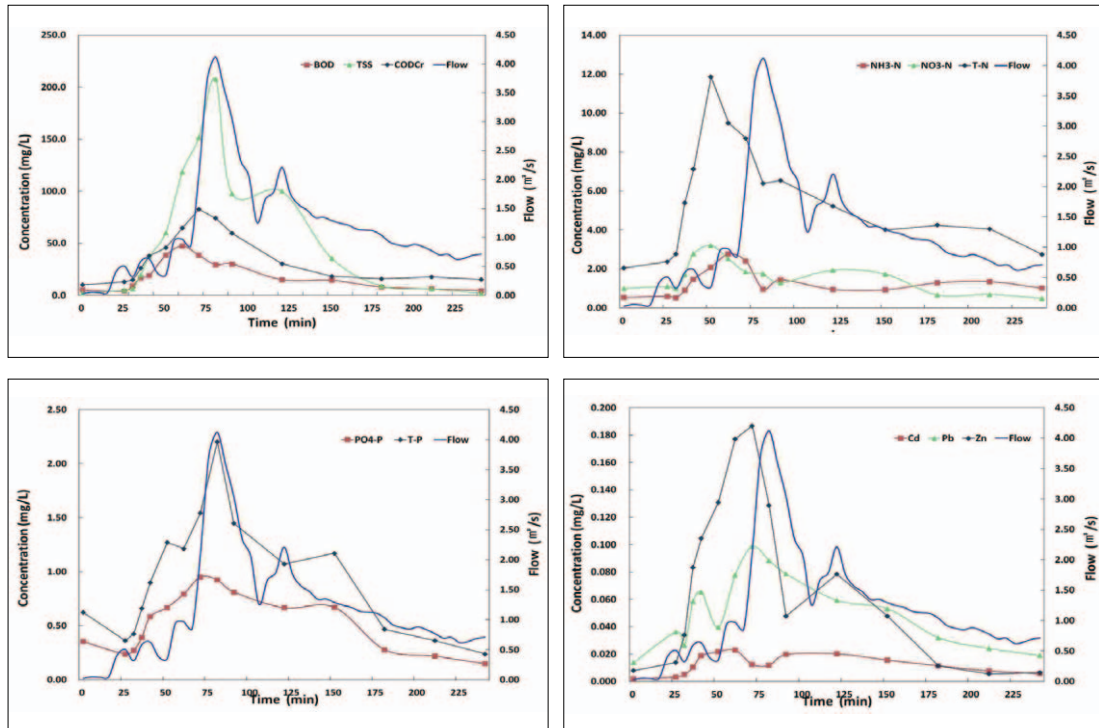


Figure 3. Hydrograph and pollutograph of the rainfall events(Event 2)

사한 유출경향을 보였다.

2. 유출시간에 따른 오염물질의 평균 농도 변화

강우 초기 비점오염물질의 유출특성을 검토하기 위하여 전체 강우사상의 농도 자료를 활용하여 통계분석을 실시한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 강우 초기 유출량의 증가에 따라서 강우유출 직후 TSS의 평균농도는 257.6 mg/L, 강우지속시간이 100분 경과후 103.5 mg/L로 약 2.5배 감소하였으며, BOD의 평균농도는 37.7 mg/L에서 18.4 mg/L로 약 2배 감소한 것으로 나타났다. COD 78.9~30.1 mg/L, T - N 10.32~5.82 mg/L, T - P 3.70~1.53 mg/L으로 약 1.7~2.6배 감소하는 것으로 나타났다. 각 강우사상에 따라서 일부 차이를 보였지만 유출초기 40분부터 100분 이내 오염물질의 농도가 1.7~2.6배의 감소경향을 보였으며, 강우종료 시는 이보다 큰 차이를 보였다. 이는 불투수층의 비중이 높은 타 연구 결과와 비슷한 경향을 보이는 것으로, 초기유출, 희석작용 및 침출효과가 유출능

도에 영향을 미치는 불투수층의 전형적인 특성을 보이는 것으로 판단되며, 비점오염원 중 불투수층의 비중이 높은 토지이용에서의 초기 강우유출수 관리의 중요성을 확인할 수 있었다.

3. 초기세척효과 검토

Cumulative load curve ratio를 이용하여 초기 세척효과를 평가한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 산업단지유역의 불투수층의 비율이 88.0%를 차지하고 있어 강우유달시간이 짧고, 표면유출율이 큰 특성을 가지고 있어 유출반응이 매우 민감한 특성을 가지고 있다. 또한 유역면적이 작아 강우초기에 유량 및 비점오염물질이 일시적으로 다량 유출되는 초기세척효과가 강하게 나타나는 경향이 있다. 분석결과 대상지역에서는 TSS, BOD, COD, T - N, T - P의 모니터링 결과 대부분이 이등분선 위에 위치하고 있으며, 또한 대부분 높은 쪽으로 이격된 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 오염물질의 유출이 강우초기에 치중하여 배출되며 시간이 경과함에

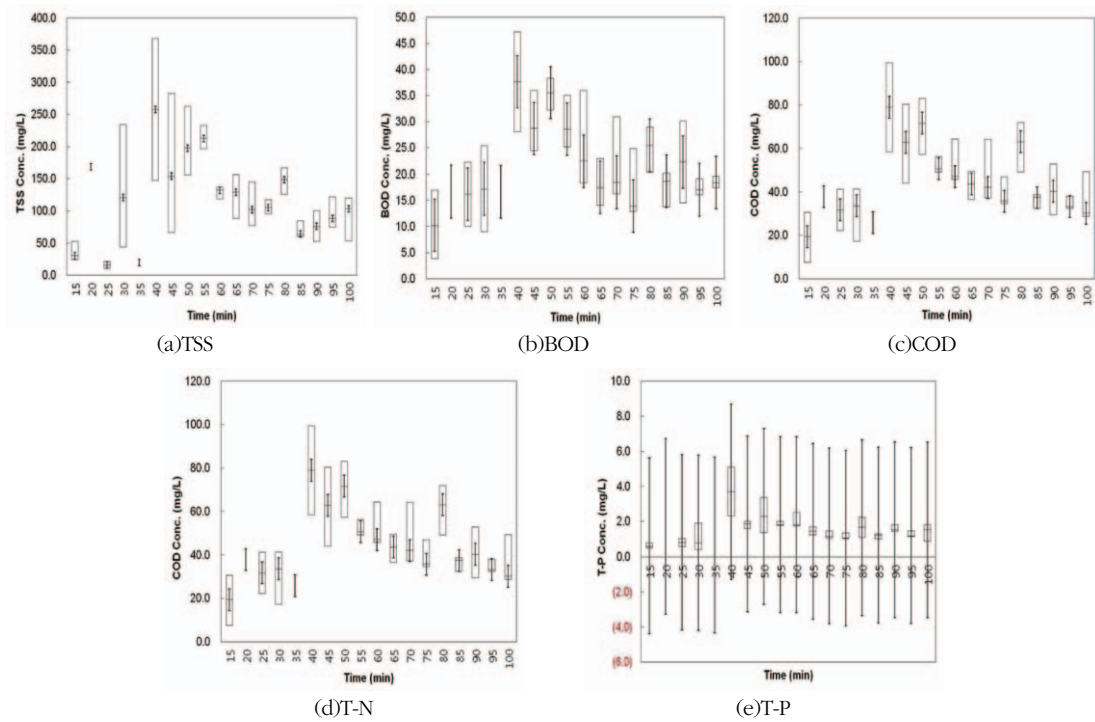


Figure 4. Descriptive statistics concentration changes during initial 100min. (a)TSS, (b)BOD, (c)COD, (d)T-N, (e)T-P

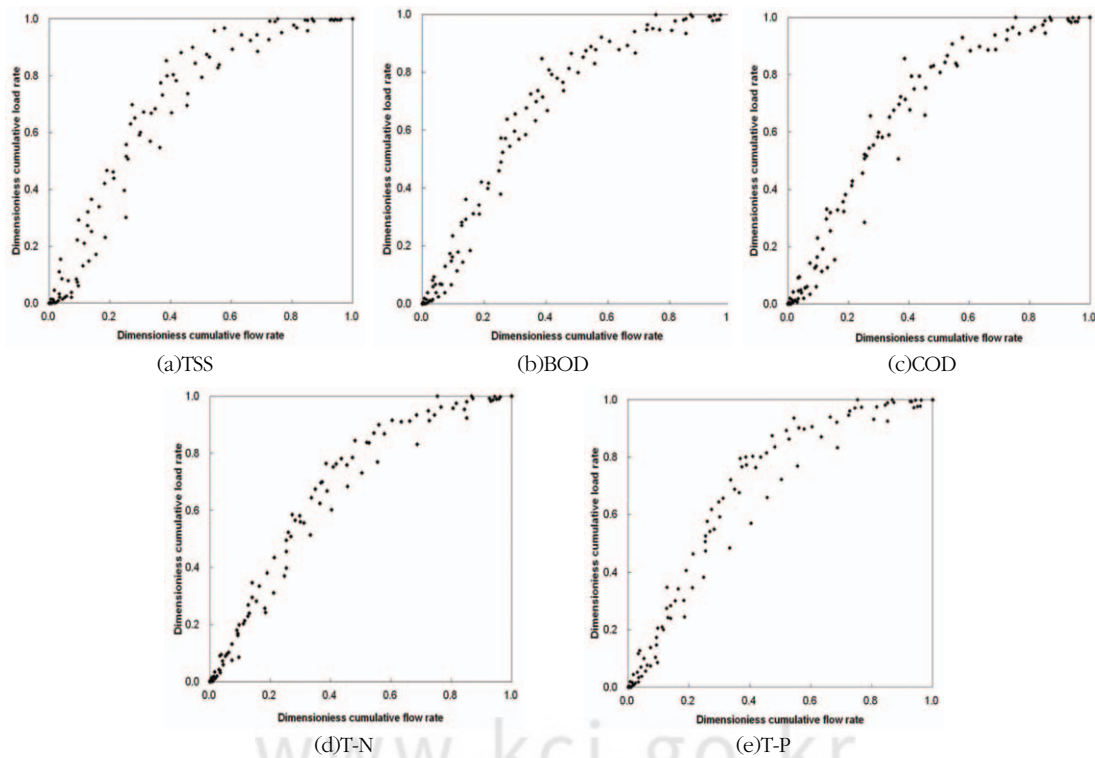


Figure 5. Cumulative mass and volume curve of (a)TSS, (b)BOD, (c)COD, (d)T-N, (e)T-P

Table 5. Statistical summaries of EMC

Parameters (mg/L)	Basic statistics					Confidence interval	
	min	max	median	Mean	St. Dev	95% Upper	95% Lower
TSS	67.0	166.4	114.1	120.6	34.3	144.4	20.5
COD	30.9	52.0	46.1	44.0	7.7	49.3	9.8
BOD	12.3	26.7	23.0	20.8	5.4	24.5	3.8
T-N	3.68	6.99	5.85	5.58	1.05	6.30	1.21
NO ₃ -N	1.12	2.57	1.76	1.83	0.43	2.13	0.35
NH ₃ -N	0.64	1.87	1.29	1.27	0.34	1.51	0.23
T-P	0.83	2.06	1.43	1.46	0.39	1.73	0.26
PO ₄ -P	0.25	0.87	0.69	0.64	0.21	0.79	0.09
Cd	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00
Pb	0.06	0.12	0.08	0.08	0.02	0.10	0.01
Zn	0.08	0.12	0.09	0.10	0.02	0.11	0.02

따라서 유출부하량이 감소하는 것을 의미하며, 초기세척효과가 뚜렷하게 나타나고 있다고 평가할 수 있다. 따라서 산업단지에서 발생하는 초기우수에 의한 높은 오염물질 유출부하량에 의하여 인근 만경강 수계에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며 초기우수에 대한 집중적인 관리가 필요할 것으로 사료된다.

4. EMC 및 SMC 통계분석

이벤트 기간 동안에 조사대상 지역에서 유출되는 강우유출수의 유출특성을 파악하기 위하여 식 (2)과 (3)를 적용하여 EMC와 SMC를 산정한 후 통계분석을 실시하였으며 그 결과를 Table 5에 정리하였다. EMC 산정결과 TSS 67.0~166.4 mg/L, BOD 12.3~26.7 mg/L, COD 30.9~52.0 mg/L, T-N 3.68~6.99 mg/L, T-P 0.83~2.06 mg/L의 범위로 나타났으며, 중금속의 경우 Cd 0.01~0.02 mg/L, Pb 0.06~0.12 mg/L, Zn 0.08~0.12 mg/L로 나타났다. SMC 산정결과는 TSS 120.6 mg/L, BOD 20.8 mg/L, COD 44.0 mg/L, T-N 5.58 mg/L, T-P 1.46 mg/L로 나타났고, 중금속의 경우 Cd 0.02 mg/L, Pb 0.08 mg/L, Zn 0.10 mg/L로 나타났다.

산업단지에 대한 선행연구의 EMC 산정결과를 살펴보면 TSS 87~327 mg/L, COD 28.3~137.8 mg/L, T-N 5.4~26.6 mg/L, T-P 0.35~3.69 mg/L로

나타났다(김세원 등, 2009). 결과를 서로 비교해볼 때 본 연구 대상지에서 산정된 EMC결과가 상대적으로 낮은 결과를 알 수 있다. 이러한 결과는 모니터링 시기, 선행건기일수 및 강우사상에 대한 영향도 있지만, 각 연구대상지의 입지 조건, 산업단지 입주 가동율, 교통량 및 대기오염도 등 복합적 사회 요인에 의한 영향이 클 것으로 판단된다. 또한 넓은 범위의 EMC를 보여주고 있는데 이는 같은 토지 지목에서도 EMC를 예측하는 것은 비점오염물질 유출에 미치는 복합적인 인자의 영향으로 예측이 쉽지 않음을 나타내고 있다.

유출되는 비점오염물질의 EMC에 대한 95% 신뢰구간을 살펴본 결과, TSS 20.5~144.4 mg/L, BOD 3.8~24.5 mg/L, COD 9.8~49.3 mg/L, T-N 1.21~6.30 mg/L, T-P 0.26~1.73 mg/L의 범위로 나타났으며, Cd, Pb, Zn 등 중금속의 경우 각각 0.00~0.02 mg/L, 0.01~0.10 mg/L, 0.02~0.11 mg/L로 나타났다.

그리고 강우특성 인자에 의한 비점오염물질 유출 영향에 미치는 영향을 파악하기 위해 강우사상별 인자와 유출된 오염물질과의 상관성을 분석하였으며 도출된 Pearson correlation matrix를 Table 6에 나타내었다. 대각선 아래는 상관계수(R, correlation coefficients)를 나타낸 것이고, 대각선 위는 유의수준(P value, confidence values)를

Table 6. Pearson Coefficients from the correlation analysis between EMCs and rainfall runoff variables

	TSS	COD	BOD	T-N	T-P	T.R	ADD	R.I	R.C
TSS	1.0	0.025	0.003	0.004	0.002	0.008	0.001	0.000	0.122
COD	.773*	1.0	0.001	0.005	0.026	0.074	0.037	0.022	0.053
BOD	.891**	.914**	1.0	0.000	0.011	0.037	0.013	0.006	0.147
T-N	.874**	.867**	.946**	1.0	0.015	0.010	0.009	0.005	0.135
T-P	.898**	.768*	.829*	.807*	1.0	0.021	0.007	0.001	0.014
T.R	.846**	.661	.738*	.835**	.786*	1.0	0.001	0.003	0.144
ADD	.937**	.737*	.819*	.842**	.853**	.922**	1.000	0.000	0.071
R.I	.947**	.783*	.858**	.871**	.915**	.887**	.986**	1.000	0.033
R.C	.592	.701	.562	.576	.815*	.565	.666	.748*	1.000

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

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

Note : T.R(Total Rainfall), ADD(Antecedent Dry Day), R.I(Rainfall Intensity), R.C(Runoff coefficient)

Table 7. Comparison of unit pollutant loads with advanced research

Reference sources	Site	TSS (kg/km ² /day)	COD (kg/km ² /day)	T-N (kg/km ² /day)	T-P (kg/km ² /day)	Pb (kg/km ² /day)
This study	Industrial	143.86	52.45	6.65	1.75	0.10
MOE (1999)	Urban	-	-	13.69	2.10	-
Bannerman et.(1983)	Industrial	262.19	-	-	0.41	0.74
LEE <i>et al.</i> (2008)	Highway	399.50	356.30	12.29	2.46	-
Go <i>et al.</i> (2009)	Road	580.13	331.17	14.68	1.43	-
NFWMD (1994)	Industrial	213.73	-	3.05	1.46	-
Novotny <i>et al.</i> (1997)	Industrial	262.25	-	-	0.41	0.74

나타낸 것이다. 강우특성인자와 오염물질과의 상관성을 살펴본 결과 총 강우량의 경우 TSS, COD, T-N, T-P 0.738~0.846의 범위로 높은 상관관계를 보였으며, 선행건기와 강우강도의 경우 모든 수질항목에서 높은 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 또한 오염물질간의 상관관계를 살펴보면 TSS의 경우 모든 오염물질과 높은 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 즉, 강우특성에 따라서 지표의 입자성물질의 유입수준에 따라서 오염물질의 농도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 P vlaue 값이 0.00~0.03의 범위를 보이며 분석된 상관관계의 유의수준을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

5. 비점오염원 발생부하원단위 산정

비점오염원 발생부하원단위를 산정하기 위하여 모니터링 결과에 의하여 산정된 EMC와 대상지역

의 연평균 강우량 자료를 활용하여 각 오염물질별 발생부하원단위를 산정한 결과와 국내 및 국외에 제시된 발생원단위 및 선행연구결과에 대한 비교분석 결과를 Table 7에 나타내었다. 산정된 발생부하원단위의 결과는 TSS의 경우 143.86kg/km²/day로 산정되었으며, COD는 52.45kg/km²/day, BOD 24.79kg/km²/day, T-N 6.65kg/km²/day, T-P 1.75kg/km²/day, Pb 0.10kg/km²/day로 산정되었다.

선행연구의 경우 산업단지를 대상으로 한 연구결과와 미비로 도심 및 포장지역을 대상으로 조사한 결과와 비교하였으며 국내 발생원단위는 대지 원단위를 대상으로 비교검토 하였다. 본 연구에서 산정된 유기물과 영양염에 대한 발생부하량은 환경부에서 제시되고 있는 부하량에 비교하여 낮은 결과를 보이는 것으로 검토 되었으며, 입자성 물질의 결과는 미국의 산업단지에 대한 원단위 연구결과에 비하여

Table 8. Comparison of unit pollutant loads depending on the Urban Land use

Reference sources	TSS(kg/ha/yr)	BOD(kg/ha/yr)	COD(kg/ha/yr)	T-N(kg/ha/yr)	T-P(kg/ha/yr)
This study	291.8~724.6	53.7~116.3	134.7~226.2	16.0~30.4	3.6~9.0
Lee(2008)	44.0~359.2	32.5~67.5	92.9~332.1	7.53~22.58	1.32~3.20
Choi <i>et al.</i> (2002)	274~1605	61.9~153.2	161.6~858.7	33.1~119.8	1.1~4.8

Unit : 1km² = 100ha, 1yr = 365day

낮은 결과를 보였으나 영양염은 높게 산정되었다. 선행연구의 결과에 대하여서는 입자성물질과 유기물의 경우 제시원단위의 결과와 마찬가지로 낮게 산정된 결과를 보였으며 영양염의 경우 다소 높거나 낮은 결과를 확인할 수 있었다. 또한, 도시적 토지이용에 대한 발생부하원단위의 비교 결과를 Table 8에 나타내었으며 선행연구의 결과와 마찬가지로 다소 높거나 낮은 결과를 보였다. 이러한 결과는 각각의 연구 대상지의 차이에 의한 입지여건 및 환경적인 요소에 의한 것으로 사료되며 동일한 토지이용의 지역에 대하여 장기적인 모니터링을 실시하여 비점오염물질 유출특성에 대한 추가적인 자료축적을 통하여 세부적인 토지이용에 따른 신뢰성 있는 발생부하원단위를 산정할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 산업단지 입지여건 및 환경적 요소에 따라 비점오염원 배출에 대한 영향을 분석하기 위하여 교외 산업단지 지역에서의 강우사상별 비점오염물질 유출특성을 분석하기 위하여 강우시 유출되는 비점오염물질의 유출경향과 유출시간에 따른 농도 분포 및 강우특성인자별 오염물질과의 상관분석을 수행하였으며 수행 결과를 바탕으로 발생부하 원단위를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 수질항목 농도변화는 강우유출수 유출경향과 유사한 경향을 보였으며 침투유량이 발생하기 전에 침투농도치를 보였으나, 대상지역의 불투수층 비율이 88.0%로 매우 높아 작은 누적강우에도 유출량이 급변하나 비점오염물질의 침투농도는 강우시작 후 30~40분 이내에 나타나는 것으로 조사되었다.

2. 초기강우 유출량 증가에 따라 강우유출 직후 TSS의 평균농도는 257.6 mg/L, 강우지속시간 100분 경과후 103.5 mg/L로 약 2.5배 감소하였으며, BOD의 평균농도는 37.7 mg/L에서 18.4 mg/L로 약 2배 감소한 것으로 나타났다. 각 강우사상에 따른 일부 차이를 보였지만 유출초기 40분부터 100분 이내 각 오염물질의 농도가 1.7~2.6배로 감소하는 경향을 보였으며, 강우종료 시는 이보다 큰 차이를 보였다.

3. 초기세척효과 분석결과, 대상지역에서는 TSS, BOD, COD, T-N, T-P의 모니터링 결과 대부분이 이등분선 위에 위치하고 있으며, 또한 대부분 높은 폭으로 이격되어진 결과를 보였다. 이를 통해 오염물질의 유출이 강우초기에 대부분 배출되며 시간이 경과함에 따라서 유출부하량이 감소하는 것으로 초기세척효과가 뚜렷하게 나타났다.

4. EMC 산정결과 TSS 67.0~166.4 mg/L, BOD 12.3~26.7 mg/L, T-P 0.83~2.06 mg/L의 범위로 나타났으며, SMC 산정결과는 TSS 120.6 mg/L, BOD 20.8 mg/L, T-P 1.46 mg/L의 범위를 보였으며 이는 타 연구결과에 비해 다소 낮은 범위의 농도를 보였다. 또한 강우특성과 오염물질과의 상관관계를 분석한 결과 TSS가 가장 높은 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다. 이는 강우특성에 따라 지표의 입자성물질 유입수준에 따라서 오염물질의 농도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

5. 산정된 발생부하원단위의 결과는 TSS의 경우 143.86kg/km²/day로 산정되었으며, COD는 52.45kg/km²/day, BOD 24.79kg/km²/day, T-N 6.65kg/km²/day, T-P 1.75kg/km²/day, Pb 0.10kg/km²/day로 산정되었으며 선행연구결과에 비하여 입자성 물질 및 유기물의 농도는 낮은 분포를 보였으며, 영양염의 경우 다소 낮거나 높은 분포를 보였으며 이러

한 결과는 각각의 연구 대상지의 차이에 의한 입지 여건 및 환경적인 요소에 의한 것으로 사료되며 연구 결과를 바탕으로 효율적인 비점오염원 저감시설의 설계 기초자료 및 적정규제기준등 비점오염원의 최적관리를 위한 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

참고문헌

- 강창국, 이소영, 조안, 이재운, 김이형 (2009). 산림 활엽수 지역의 강우유출수 유출특성 및 EMC 산정. 환경형향평가학회지, 18(6), 393-399.
- 김세원, 최광순, 김동섭, 이미경 (2009). 강우시 시화호 농촌 및 공단구역의 비점오염물질 유출특성. 수질보전 한국물환경학회지, 25(5), 768-777.
- 김이형, 이선하 (2005). 주차장 및 교량지역의 강우 유출수내 비점오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs. 수질보전 한국물환경학회지, 21(3), 248-255.
- 김이형, 고석오, 이병식, 김성길(2006). 국내고속도로 강우유출수의 EMCs 및 유출부하량 산정. 대한토목학회 논문집, 26(2B), 255-231.
- 이소영, 이은주, Marla C. Maniquiz, 김이형 (2008). 교통관련 포장지역 비점오염원에서 의 오염물질 유출원단위 산정. 수질보전 한국물환경학회지, 24(5), 543-549.
- 이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 이병식, 임경호, 김이형 (2006). 포장지역에서의 강우사상별 EMC산정 및 단순샘플농도와의 비교. 수질보전 한국물환경학회지, 22(1), 104-109.
- 최윤영, 정세영, 최정우 (2011). 토지이용별에 따른 초기강우 유출량의 비점오염물 특성 분석. 한국환경과학회지, 20(3), 417-426.
- 김태원, 길경익 (2011). 교량지역의 다양한 비점오염물질 원단위 산정방법 비교. 수질보전한국물환경학회지, 27(5), 597-604.
- 고성훈, 쉬라즈 아메드 메몬, 이창희 (2009). 경안천 지역의 도로 및 주차장에 대한 강우유출수의 특성분석과 원단위 산정. 수질보전한국물환경학회지, 25(5), 689-696.
- 환경부 (2005), 비점오염원 업무편람
- 환경부 (2004), 관계부처합동 물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강비점오염원관리 종합대책.
- 환경부(1999). 수질오염총량관리계획수립지침, 환경부 고시 제 1999-143호.
- 이홍신 (2008). 도시지역 강우유출수의 유출특성. 금오공과대학교 석사학위논문.
- 최지용, 신창민 (2002), 비점오염원 저감을 위한 우수 유출수 관리방안, 한국환경정책평가연구원.
- Bannerman, R., Baum, k., Hughes, P., and Graczyk, D. (1983)3 Nationwide Urban Ruboff Program, Milwaukee, Wisconsin: Evaluation of Urban Nonpoint Source Polletion Management in Milwaukee Country, Wisconsin, Vol. 1.
- North Florida Water Management Distrit (1994). St Marks and Wakulla River Resource Assessment and Greenway Protection Plan. Appendix 4.
- Novotny, V. and Olem, H. (1997). Water Quallity: Prevention, Identification and Management if diffuse Pollution, John Wiley, New York.
- Bedient, P. B., Harned, D. A., and Characklis, W. G. (1978), Stormwater analysis an prediction in Houston, Journal of the Environmental Engineering., ASCE, 104(EE6), 1087-1100.
- Gupta, K. and Saul, A. J. (1996), Specific relationship for the first flush load in combined sewer systems, Water Research., 30(5), 1244-1252.