

강우시 시설재배지역의 오염물질 유출 EMC 및 원단위 산정

전제찬 · 권구호 · 이상협 · 이재운* · 권헌각* · 민경석+

경북대학교 환경공학과

* 국립환경과학원 낙동강 물환경연구소

EMC and Unit Loads of Pollutants Generated from Tomato Cultivation during Rainfall

Je Chan Jeon · Koo Ho Kwon · Sang Hyeub Lee · Jea Woon Lee* ·

Heun Gag Gwon* · Kyung Sok Min⁺

Department of Environmental Engineering, Kyungpook national university

* Nakdongriver Environment Research Center

요 약

2004년에 도입된 오염총량관리제는 각종 토지이용형태별로 오염물질의 배출량을 산정하여 하천의 목표수질을 정하고 관리하는 것이다. 이에 따라 토지이용형태 별로 오염물질의 유출부하량을 산정하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 연구 또한 토마토 시설재배지역을 대상으로 강우유출수 내 오염물질의 EMC, 부하량 및 원단위 등을 산정하기 위해 실시되었다. 산정된 평균 EMC 값은 BOD 9.6mg/L, COD_{Mn} 17.2mg/L, TOC 5.5mg/L, TSS 319.4mg/L, T-N 4.4mg/L, T-P 2.6mg/L, NH₃-N 0.5mg/L, NO₃-N 2.6mg/L, PO₄-P 0.8mg/L로 조사 되었다. 이 중 영양염류인 TN은 대부분 NO₃-N의 형태, TP는 입자성인의 형태로 유출되는 것으로 파악되었다. 오염물질의 원단위는 BOD는 21.8~56.8g/m²/yr의 범위로 나타났으며, COD_{Mn}은 38.9~101.7g/m²/yr로 나타났다. 또한, TSS의 경우에는 179.5~1878g/m²/yr의 범위로 분석되었고, TN과 TP는 10.7~26.3g/m²/yr 및 5.8~15.2g/m²/yr로 각각 분석되었다. 한편, NH₃-N, NO₃-N 및 PO₄-P는 1.3~3.4g/m²/yr, 5.9~15.4g/m²/yr 및 1.8~4.8g/m²/yr의 범위로 각각 분석되어졌다.

핵심어 : 강우유출수, 농촌지역, 비점오염, 오염물질 부하량, 원단위, 유량가중평균농도

Abstract

Total maximum daily load enforced in 2004 is a program to evaluate the amount of pollutants by each land use type and manage to meet a target water quality of each waterbody. The many research to calculate runoff load of pollutants by landuse type have been studied. This study was conducted to calculate pollutants EMC, load and unit load in stormwater runoff generated from tomato growing area. Monitoring was conducted about 32 event during 4years and water quality parameters such as BOD, COD_{Mn}, TOC, TSS, TN, TP, NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P were analyzed at the laboratory. The average EMC were measured as follows: 9.6 BOD mg/L, 17.2 COD_{Mn} mg/L, 5.5 TOC mg/L, 319.4 TSS mg/L, 4.4 T-N mg/L, 2.6 T-P mg/L, 0.5 NH₃-N mg/L, 0.04 NO₂-N mg/L, 2.6 NO₃-N mg/L, 0.8 PO₄-P mg/L. TN and TP is discharged as NO₃-N and particle phosphorus type, respectively.

Keywords : EMC, Farming area, Nonpoint pollutant, Pollutant load, Stormwater runoff, Unit loads

1. 서론

소하천 유역내 오염부하 발생원은 점오염원과 비점오염원으로 구분된다. 이 중 비점오염물질(non-point pollutants)은 농지에 살포된 비료와 농약, 낙엽, 동식물의 사체 및 지표상에 퇴적된 각종 오염물질 등으로 주로 강우시 강우유출수와 함께 유출되는 오염물질을 말

한다(MOE, 2001). 강우시에 불특정 장소에서 불명확하게 발생하는 비점오염물질은 유역이 지니는 환경적·지리적·수문학적 특성에 의해 크게 영향을 받아 발생량, 배출량, 배출시기와 배출지점 등이 일정하지 않고 변화가 심하다. 따라서 효율적인 관리에 큰 어려움이 있다(MOE, 2006). 한편, 과거 우리나라는 점오염원 위주의 수질개선대책만 실행해오다가 최근에 들어서는 점오염

+ Corresponding author : ksmin@knu.ac.kr

원의 개선만으로는 더 이상 수질을 개선하는데 어려움이 있다는 것을 인식하기에 이르렀다(Jung et al. 2004). 이에 따라 1994년 비점오염원 저감 대책마련을 위해 7개 토지이용별로 비점오염원의 원단위와 오염기여도 조사 연구를 시작하여 오염물질의 배출량을 산정하고자 하였다(MOE, 1995). 그 후, 1998~2000년에 4대강 물관리 종합대책을 수립하여 비점오염원 관리 방안을 제시하였으며, 2004년에는 관계부처 합동으로 체계적인 비점오염원 관리계획을 수립추진하기 위해 4대강 비점오염원관리 종합대책(Integration of Relevant Ministry, 2004)을 발표하는 등 본격적인 비점오염원관리를 위한 노력을 시작했다(Jung et al. 2004). 이러한 노력의 결과로 2005년 비점오염원을 법정오염원으로 명시하게 되었고, 최근에는 국토교통부, 환경부, 농림축산식품부와 같은 관계부처별로 비점오염원 제어하기 위한 다양한 지침 및 규정들을 마련하고 있다. 한편, 2004년에 도입한 오염총량관리제는 비점오염원 관리에 대한 제도적 근거를 마련해 주었다는 점에서 큰 의미가 있다(KEI, 2002). 오염총량관리제는 목표수질에 의한 오염물질의 총량관리이며 단위유역별 오염 부하량을 할당하는 것으로 점오염원 부하량, 비점오염원 부하량 및 안전율의 합으로 산정된다. 오염총량관리제의 시행에 따라 강우시 비점오염원으로 부터 발생하는 오염물질에 대해 단위유역별로 유출부하량이 산정되어야 하기 때문에 최근 다양한 토지이용 형태에 따른 강우유출특성에 관한 연구가 많이 진행되

었다(Kim et al. 2012; Yang, 2006; Kim et al, 2008; Choi, 2012; Kim et al, 2002). 그러나 비점오염원은 강수량, 선행건기 일수 등 자연 및 지리적 특성에 많은 영향을 받으므로 현재까지 조사된 자료들만으로는 부족하다는 인식이 많다. 이에 제2차 비점오염원관리 종합대책(2012~2020년)에는 모니터링 등을 통한 부하량 자료의 신뢰성 향상 방안이 포함되어 자료의 다양성과 신뢰성의 확보를 위해 노력하고 있다.

한편, 기존 연구자들에 의해 토지이용별로 조사된 비점오염원의 원단위는 아래 표 1과 같다(Won et al. 2009). 농장 지역을 보면 동일한 연구자에 의해 연구가 수행되었는데도 불구하고 오염물질의 원단위 유출범위가 넓게 나타나 오염물질의 삭감량 평가시 원단위 적용에 큰 어려움이 있을 것으로 예상된다. 오염물질의 원단위 유출범위가 넓게 나타나는 이유는 강수량, 강우강도, 선행건기일수 등 강우사상과도 영향이 있지만 재배되는 농작물의 종류에 따라서도 오염물질의 유출 농도가 달라질 것으로 판단된다. 따라서 더욱 장기적인 모니터링과 토지이용형태를 더욱 세분화하여 원단위를 조사할 필요가 있을 것으로 사료된다. 이에 본 연구는 농장지역 중에서도 토마토 시설재배지역을 대상으로 비점오염물질의 발생 및 배출특성을 조사 및 분석하였으며, 본 연구의 결과는 비점오염 관리방안의 기초자료로 활용 될 것으로 기대한다.

Table 1. Unit loading on land-use type

Land use	BOD (kg/ha/year)	COD (kg/ha/year)	TSS (kg/ha/year)	TN (kg/ha/year)	TP (kg/ha/year)
Farm	11.0~2,047	16.8~7,201	11,8~1,147.3	1.5~850.8	0.26~315.4
Forest	2.6~13.9	9.8~13.9	4.0~1,143	0.95~16.1	0.04~0.91
Rice	2.8~41.6	7.1~135.0	16.1~167.9	19.3~82.5	0.37~16.4
Crops	2.9~25.9	12.2~91.0	23~4,800	1.3~36.9	0.18~3.98
Urban	29.2~816.1	113~1,226.4	460~4,792	1.1~157.0	0.4~31.0

2. 연구방법

2.1 연구 대상지역

본 연구는 시설재배지역에서 발생하는 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위해 실시되었다. 연구대상지역은 대구시의 외곽에 위치하고 있는 토마토 시설재배지역으로 선정하였다. 강우시 강우유출수는 비닐하우스 사이에 있는 배수로를 따라 흐르게 되며, 배수구역 내에 있는 모든 강우유출수는 한 지점으로 모이게 되어 단일 지목인 시설재배지역의 비점오염 유출특성을 파악할 수 있는 구조로 되어 있다. Fig. 1에 샘플링 지점과

강우 유출수의 흐름에 대해 나타내었다. 배수구역의 면적은 4,029m²이며, 비닐하우스에 의한 불투수면적은 3,456m²으로 전체 면적의 약 85.8%를 차지한다(Table 2). 농경지의 경우 질소의 시비, 거름, 잡초의 제거, 밭갈이 등의 재배방법에 따라 강우유출수의 오염물질 농도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구의 대상지역에서 토마토의 재배방법은 Fig. 2에 나타내었다. 토마토 재배방법은 12월에 파종하여 4월과 5월에 수확하는 방식으로 이루어진다. 또한, 1월부터 5월까지 질소의 시비 및 거름의 살포가 이루어진다. 수확 후 경작지는 지력의 보호를 위해 휴면상태로 비닐하우스를 덮은 채 방치한다.

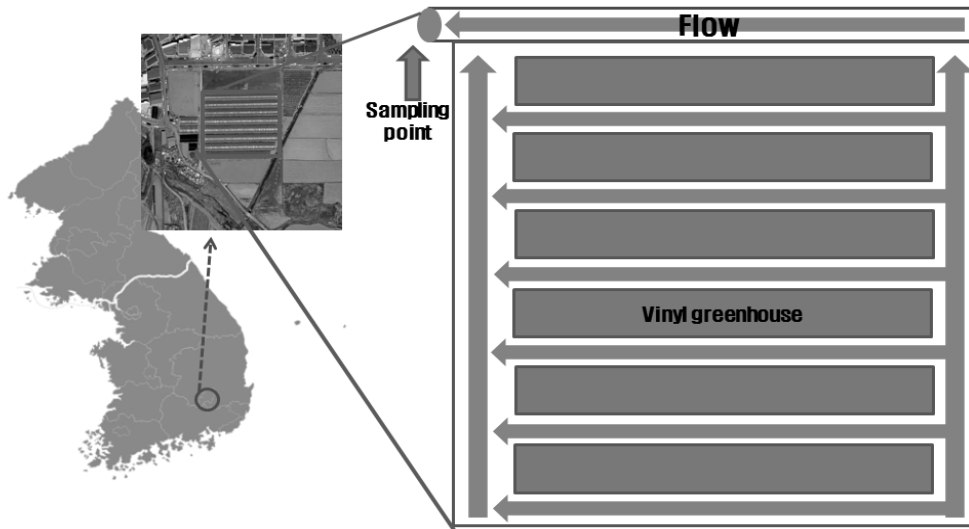


Fig. 1. Location and sampling point of catchment area

Table 2. Summary of the monitoring site

Crops of cultivatoin	Address	catchment area(m ²)	Impermeable ratio(m ²)
Tomato	Kum-kang dong, Daegu	4,029	3,456(85.8%)

Month	Nov.	Dec.	Jen.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul. ~Oct.	
Cultivation method	<ul style="list-style-type: none"> • Installation of vinyl green house • Disinfection of soil • Disinfection of seed Seeding 		Nitrous fertilization		additional fertilizer	additional fertilizer	additional fertilizer	harvest		rest period

Fig. 2. Cultivation method of tomato

2.2 모니터링 방법 및 모니터링 대상 강우사상

모니터링은 2008년 4월부터 2011년 10월까지 총 32회 실시되었으며, 배수구역 내에 발생한 강우량 및 유출유량 측정, 오염물질의 분석이 이루어졌다. 강우량 모니터링은 1분 간격으로 측정이 가능한 강우강도계(Raingage-20, Environdata Environmental Monitoring & Management사)를 현장에 설치하여 측정하였다. 또한 강우유출수는 강우가 발생하기 전 현장에 도착하여 1분 간격으로 측정이 가능한 전자식 유량계(Flo-Tote3, MARSH McBIRNEY사)를 미리 설치하여 측정하였다. 시료의 채취는 강우유출수가 발생한 시점부터 유출 초기, 5분, 10분, 15분, 30분, 60분 각각 2회씩 채수하고, 이후 강우유출수가 유출되지 않을 때까지 1시간 에서 2시간 간격으로 실시하였다. 채취된 유출수 시료는 냉장보관 후 실험실로 옮겨져 크게 입자상 물질, 유기물질, 영양염류 등을 분석하였다. 입자상 물질로는 TSS가 분석

되었으며, 유기물질로는 BOD, COD_{Mn}, TOC가 분석되었다. 또한, 영양염류로는 TN, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, TP 및 PO₄-P가 분석되었다. Table 3에 모니터링 날짜와 선행건기일수(ADD, Antecedent dry day), 강우량, 강우지속기간, 유출량, 유출율 및 강우강도를 나타내었다. 선행건기일수는 2~12일까지 분포되어 있으며, 강우량은 1~160mm 까지 다양한 강우량에 대하여 모니터링을 실시하였다. 또한, 강우강도는 0.14~6.3mm/hr의 범위로 분포되어 있다. 2009년 4월 20일(E-6), 2009년 6월 10일(E-9), 2009년 9월 11일(E-14), 2010년 3월 25일(E-16), 2011년 5월 21일(E-28)에는 강우유출수가 발생하지 않았다. E-9와 14의 경우는 강우유출수가 발생할만큼의 충분한 강우가 발생하지 않았으며, E-6, 16, 28은 최대 13.8mm까지 강우가 발생하였으나, 강우가 발생한 후 멈췄다가 한참 후 다시 발생하는 등의 긴 강우지속기간으로 인해 강우유출수가 유출되지 않았다.

Table 3. Summary of rainfall event

Event No.	Date (YY.MMDD)	ADD (day)	Rainfall (mm)	Rainfall Duration (hr)	Runoff flow (m ³)	rainfall intensity (mm/hr)
E-1	08.04.09	2	17.9	16.0	5.83	1.12
E-2	08.05.18	3	12.0	3.5	5.30	3.44
E-3	08.05.28	3	39.8	11.9	43.43	3.36
E-4	08.06.05	6	17.0	2.7	4.21	6.30
E-5	08.06.17	8	36.0	17.2	54.06	2.09
E-6	09.04.20	4	13.8	16.0	-	0.86
E-7	09.04.24	3	7.0	6.6	2.04	1.06
E-8	09.05.20	2	72.6	15.8	166.27	4.60
E-9	09.06.10	6	1.2	5.2	-	0.23
E-10	09.06.29	6	43.6	8.0	125.97	5.48
E-11	09.07.24	3	18.0	9.2	34.09	1.95
E-12	09.07.28	3	51.4	15.3	86.41	3.36
E-13	09.08.11	4	32.6	12.5	91.94	2.61
E-14	09.09.11	3	1.0	7.3	-	0.14
E-15	10.02.25	12	33.5	10.6	46.20	3.18
E-16	10.03.25	3	8.0	14.6	-	0.55
E-17	10.03.31	6	9.4	12.3	5.85	0.77
E-18	10.04.21	7	14.0	11.8	42.15	1.18
E-19	10.04.26	3	11.0	14.4	31.54	0.77
E-20	10.04.28	2	5.0	7.4	6.65	0.67
E-21	10.07.28	2	13.0	7.9	13.66	1.64
E-22	10.09.01	3	18.4	9.9	12.77	1.87
E-23	11.02.27	10	45.0	27.4	19.59	1.64
E-24	11.03.20	9	7.2	6.0	1.93	1.20
E-25	11.04.22	11	33.0	12.0	36.56	2.75
E-26	11.04.26	4	42.8	20.5	43.41	2.09
E-27	11.05.09	8	87.0	40.9	125.11	2.13
E-28	11.05.21	9	10.0	8.0	-	1.26
E-29	11.05.26	4	16.0	11.9	40.63	1.34
E-30	11.06.22	7	8.4	10.7	5.77	0.79
E-31	11.06.25	2	54.8	30.1	87.09	1.82
E-32	11.07.08	4	160.8	36.6	167.79	4.39

2.3 분석방법

본 연구에서는 강우유출수의 유출특성에 대한 기초자료를 확보하고자 토마토 재배지역을 대상으로 오염물질

의 유량가중평균농도(EMC, Event Mean Concentration), 유출부하량, 원단위 및 오염물질간의 상관성 분석을 실시하였다. 토마토를 시설재배지역에서는 비닐, 식물 잔재물과 같은 폐기물들을 비롯하여 토사와 영양염류 등

다양한 종류의 오염물질들이 유출된다. 이러한 오염물질들은 아래의 식 (1)을 이용하여 EMC를 산정하였다 (Lee et al. 2009). 여기서 $C(t)$ 와 $Q_{TRu}(T)$ 는 강우 지속시간 t 에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} \quad (1)$$

$$= \frac{\int_0^T C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt}$$

한편, 비점오염원에서 발생부하원단위는 일정기간동안 단위유역면적에서 발생하는 오염물질부하량이라 할 수 있다. 본 연구에서 산출되는 원단위는 비점오염원 관련 연구 및 수질오염총량관리제에서 토지계 지목별 연평균 발생부하 원단위에 중요한 자료로 이용될 수 있다. 원단위 산출 공식에 대한 선행문헌의 고찰 결과 연구자에 따라 아래 식 (2), (3), (4) 와 같이 산정되고 있었다(Kim et al. 2008; Won et al. 2009; Kim et al. 2002; NIER, 2007). 본 연구에서는 식 (2), (3), (4)를 모두 적용하여 원단위를 산출하고 그 결과를 제시하였다.

$$UnitLoad(kg/km^2 \cdot yr) = \frac{\text{Total yearly rain fall}(mm/yr) \times EMC(mg/L)}{\text{Area}(km^2)} \quad (2)$$

$$UnitLoad(kg/km^2 \cdot yr) = (\sum C_i q_i \times f/A) \quad (3)$$

$$UnitLoad(kg/km^2 \cdot yr) = (\text{대표년강우량} \times EMC \times R_z) / 365 \quad (4)$$

여기서,

C_i : i 번째 강우사상에 대한 유량가중 평균농도(mg/L)

q_i : i 번째 강우사상의 총유출량(m^3/day) = $CIA \times 10$

(C : 토지이용별 유출계수, I : 강우량(mm), A : 면적)

f : 연 평균강우량(mm) / 실측기간 강우량(mm)

R_z = 토지피복분류 z 의 대표유출율

강우시 유출되는 오염물질에 대하여 강우사상과 오염물질간의 상관관계를 파악하기 위하여 SPSS(Ver. 17.0)을 이용하여 상관성 평가를 실시하였다. 상관성 평가는 상관성의 정도를 나타내는 상관계수와 p -value를 분석함으로써 수행되었다. 신뢰수준은 005로 한정하여 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 EMC 분석

본 연구의 대상지역에서 강우시 발생한 오염물질 EMC를 산정한 결과를 Table 4에 제시하였으며, 통계분석한 결과는 Table 5 및 Fig. 3에 나타내었다. 산정된 EMC 값의 평균은 BOD의 경우 9.6mg/L, COD_{Mn} 는 17.3 mg/L, TOC는 4.5mg/L, TSS는 319.4mg/L, T-N은 4.5mg/L, T-P는 2.6mg/L, NH_3-N 은 0.6mg/L, NO_2-N 은 0.04mg/L, NO_3-N 은 2.6mg/L, PO_4-P 는 0.8mg/L로 조사 되었다. 입자상 물질인 TSS의 EMC 유출 범위는 30.1~1629.9mg/L로 나타나 매우 넓은 농도분포 범위를 보였다. 또한, 유기물질인 BOD 및 COD_{Mn} 가 1.2~33.9mg/L, 5.7~37.8mg/L의 범위를 보였으며, TN과 TP는 0.3~12.1mg/L 및 0.4~8.2mg/L의 분포로 분석되었다. TN을 구성하는 요소, 즉 NH_3-N 과 NO_2-N 및 NO_3-N 중에서는 NO_3-N 의 비율이 가장 높았다. 이는 토양 속의 암모니아성 질소가 질화성 세균에 의해 NO_3-N 의 형태로 산화되어 토양에 축적되기 때문이며, 식물은 대체적으로 NO_3-N 을 흡수하여 성장하게 된다. 한편, TP중에서는 PO_4-P 가 낮은 비율을 차지하는 것으로 분석되어 대부분의 인은 유기성 인의 형태로 토양의 입자에 흡착되어 존재하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출된 오염물질의 EMC를 고구마 재배지, 묘포원 및 원예 재배지역의 오염물질 EMC와 비교하였다.(NIER, 2011) 그 결과, 비닐하우스를 이용하여 토마토를 재배하는 지역은 다른 작물을 재배하는 지역에 비해 오염물질이 낮은 농도로 유출되었다(Table 6). 오염물질의 유출 농도에 대해 자세히 살펴보면, 고구마, 묘포원, 원예를 하는 지역의 평균 TSS EMC는 1387~9313mg/L로 매우 높게 나타났으며, 비닐하우스 지역은 319.4mg/L로 현저한 차이가 나는 것으로 분석되었다. 이러한 차이는 비닐하우스 지역은 유역 면적 중 대부분이 비닐하우스에 의해 불투수층으로 구성되어 있기 때문에 토사의 유출이 적게 일어났기 때문으로 판단된다. COD_{Mn} 의 경우 다른 작물들은 20.7~104.9mg/L의 범위를 보이는 것에 비해 비닐하우스 시설재배지역은 17.2mg/L를 나타내었다. 한편, TN의 경우 토마토를 재배하는 지역은 고구마를 재배하는 지역과 원예지역보다는 낮은 EMC로 나타났지만 묘포원과는 비슷한 농도로 분석되었으며, TP는 원예를 재배하는 지역보다는 낮았고, 묘포원 지역보다는 높게 유출되었다. 묘포원과 토마토 재배지역을 비교하였을 때, 토마토 재배지역이 TSS와 COD_{Mn} 에서는 매우 낮은 농도를 나타내었으나 영양염류인 TN과 TP는 비슷한 농도를 나타내고 있었다. 이러한 결과가 나타난 이유는 식물의 재배방식, 모니터링 시기 및 강우사상과 같은 차이 때문으로 판단되어지나, 자세한 것은 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Table 4. EMC of Pollutants

Event No.	BOD (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	TOC (mg/L)	TSS (mg/L)	T-N (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
E-1	7.8	14.3	4.4	30.1	3.2	1.2	-	0.8	1.1	0.6
E-2	11.9	14.3	5.6	143.0	9.7	0.4	-	7.8	1.7	0.8
E-3	4.2	13.0	5.7	114.5	10.4	0.3	-	8.3	5.1	3.1
E-4	12.5	21.9	14.4	43.8	4.5	1.6	-	1.2	1.4	0.8
E-5	18.9	28.7	12.4	309.2	3.7	0.2	-	1.4	5.6	1.7
E-7	33.9	37.8	4.3	686.2	5.8	1.2	-	3.6	1.9	0.7
E-8	7.7	22.7	4.5	1002.2	5.6	0.2	-	4.2	1.2	0.6
E-10	14.4	28.6	5.6	1629.9	6.2	0.3	-	3.1	1.6	1.1
E-11	8.7	15.9	5.1	813.6	4.4	0.3	-	3.2	1.2	0.6
E-12	16.6	25.3	3.5	214.7	5.2	0.1	-	4.3	1.0	0.1
E-13	10.1	14.2	3.0	52.6	3.6	0.2	-	2.3	1.4	0.2
E-15	7.9	13.1	1.5	152.0	4.0	0.3	-	1.9	0.4	0.1
E-17	5.5	8.7	4.5	168.2	2.8	0.6	-	2.1	0.5	0.1
E-18	11.1	23.9	1.3	752.4	2.8	0.2	-	1.4	0.8	0.2
E-19	11.3	20.9	1.5	219.8	2.4	0.5	-	1.4	0.4	0.1
E-20	13.0	16.5	1.6	177.2	2.6	0.3	-	1.7	0.8	0.1
E-21	15.5	28.7	1.4	116.3	2.4	0.3	-	1.0	1.6	1.0
E-22	20.5	32.3	2.1	418.5	2.1	0.5	-	1.4	1.4	0.7
E-23	4.1	11.3	4.1	168.4	4.5	0.5	0.0	1.1	4.7	1.8
E-24	1.8	7.8	2.7	126.0	6.3	1.2	0.1	1.9	1.9	0.9
E-25	4.6	9.1	5.8	159.9	3.7	0.3	0.0	0.9	1.4	1.0
E-26	2.5	11.9	5.2	322.4	12.1	0.9	0.0	2.0	3.0	1.4
E-27	2.1	11.8	3.2	296.1	6.4	0.3	0.0	1.0	8.1	2.4
E-29	5.5	10.9	6.3	78.9	3.5	2.8	0.0	0.7	5.6	1.5
E-30	3.5	10.0	5.0	238.7	2.2	0.2	0.0	9.5	4.3	0.3
E-31	1.2	5.8	3.6	64.9	0.6	0.5	0.0	1.6	8.2	0.1
E-32	3.4	7.4	2.4	126.5	0.3	0.3	0.2	1.0	3.5	0.3

Table 5. Statistical analysis of pollutants EMC

Parameter	BOD (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	TOC (mg/L)	TSS (mg/L)	T-N (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)
Min.	1.2	5.8	1.3	30.1	0.3	0.1	0.0	0.7	0.4	0.1
Max.	33.9	37.8	14.4	1629.9	12.1	2.8	0.2	9.5	8.2	3.1
Mean.	9.6	17.3	4.5	319.5	4.5	0.6	0.0	2.6	2.6	0.8
95%CI Upper	12.4	20.5	5.6	456.9	5.5	0.8	0.1	3.5	3.4	1.1
95%CI Lower	6.9	14.0	3.3	182.1	3.4	0.4	0.0	1.7	1.7	0.5
St. Dev	7.3	8.6	3.0	364.2	2.8	0.6	0.1	2.4	2.3	0.8

Table 6. comparison of EMC data concerning stormwater runoff generated from other crop cultivation areas

Crops of cultivatoin	COD _{Mn} (mg/L)	TSS(mg/L)	TN(mg/L)	TP(mg/L)
Tomato	17.2	319.4	4.4	2.6
Sweet potato	20.7	1948.6	10.2	2.6
Seedbed garden	26.6	1387.0	4.2	2.2
Horticulture	104.9	9313.7	19.6	8.4

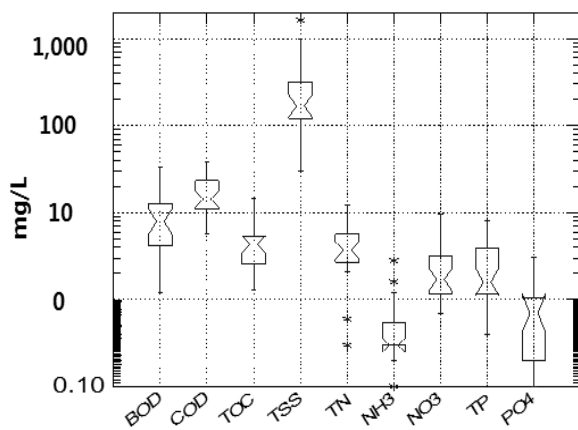


Fig. 3. Notched box plot for event mean concentrations

작물 재배지와 같은 농지의 경우 재배 작물의 종류에 따라 강우시 오염물질의 유출 농도에 차이가 발생하지만 같은 작물이라도 계절에 따라서 차이가 있을 것으로 판단된다. 모니터링 기간 동안 발생한 강우사상을 3 ~ 5월(Spring), 6 ~ 8월(Summer), 9 ~ 11월(Autumn), 12월 ~ 2월(Winter)과 같이 시기별로 나누어 각각의 EMC 평균

값을 제시하였다(Table 7과 Fig. 4). 그 결과, SS는 장마와 태풍으로 인해 많은 강우량이 발생하는 여름과 가을에 가장 높은 농도가 유출되는 것으로 분석되었다. 또한, BOD와 COD_{Mn}는 20.5mg/L, 32.3mg/L로 가을에 높은 농도가 유출되는 것으로 나타났다. 이는 6월초 작물의 수확 이후 대상유역에 버려진 폐작물의 부패로 인해 발생한 것으로 판단된다. 또한, TN은 겨울철 5.0mg/L, 봄철 5.5mg/L로 높은 농도로 유출되는 것으로 분석되었는데, 이는 겨울과 봄철 지력을 높이기 위해 질소 비료를 시비한 결과 때문으로 판단된다. 한편, TP는 여름철이 높은 3.1mg/L로 분석되었다. TP는 옷거름을 주는 시기인 3월에서 5월에 토양에 공급되어지는데 여름철이 높은 농도로 나타난 이유는 인은 공급 후 입자성 인으로 토양에 흡착되어 있다가 여름철 많은 강우량에 의해 토양과 함께 유출되어지기 때문으로 판단된다.

본 연구의 결과로 미루어 볼 때 수질오염총량관리제의 성공적인 이행과 비점오염원의 적절한 관리를 위해서 농지와 같은 작물의 재배지는 계절적 요인을 고려하여 모니터링을 진행하여야 정확한 오염물질의 유출 경향 및 원단위의 산정이 가능할 것으로 판단된다.

Table 7. EMC difference for each season

Period	Aver. rainfall (mm)	BOD	COD _{Mn}	TOC	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
Spring (mg/L)	25	9.3	16.6	4.2	319.3	5.5	0.7	2.8	2.4	1.0
Summer (mg/L)	39.7	9.9	17.5	6.1	388.2	3.4	0.4	3.1	3.1	0.6
Autumn (mg/L)	18.4	20.5	32.3	2.1	418.5	2.1	0.5	1.4	1.4	0.7
Winter (mg/L)	14.6	4.6	10.7	2.7	148.8	5.0	0.7	1.6	2.3	0.9

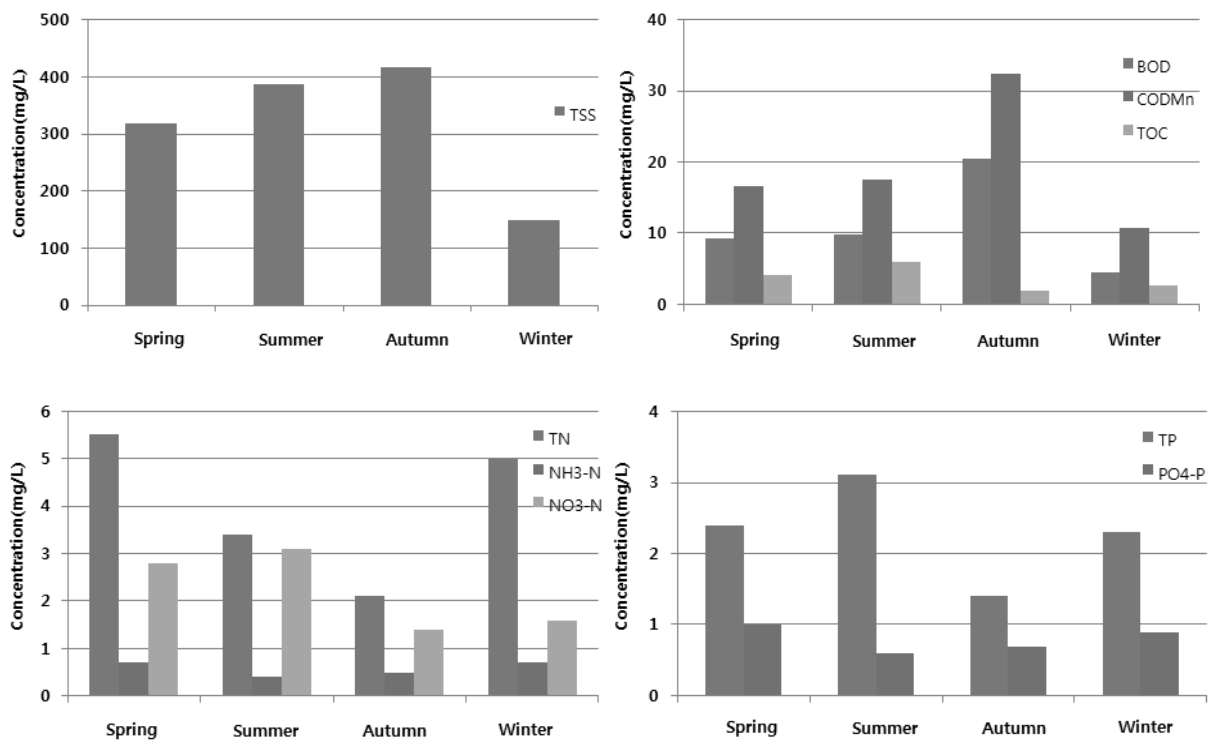


Fig. 4. EMC by each season

3.2 오염물질의 유출 부하량 산정

토마토 시설재배지역의 강우유출수가 인근수계에 미치는 환경적인 영향을 분석하기 위해서는 부하량 산정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 모니터링을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 오염물질의 부하량을 면적당 오염물질 부하량과 단위면적에 대한 강우지속시간당 오염물질 부하량으로 구분하여 산정하였다.

Table 8은 유역면적에 대한 비점오염물질 유출부하량 산정 결과를 나타낸 것이다. BOD의 95% 신뢰구간 범

위는 54~154mg/m², COD_{Mn}는 114~322mg/m², 그리고 TSS는 979~6510mg/m²로 분석되었다. 또한 영양염류인 TN의 95% 신뢰구간은 28.7~83.2mg/m², TP는 16.5~56.6mg/m²hr의 범위로 산정되었다. 한편, Table 9에는 연구 대상지의 단위 면적에 대해 강우지속시간당 오염물질의 유출부하량을 산정한 결과를 제시하였다. BOD의 신뢰구간 범위는 4.9~15.6mg/m²hr, COD_{Mn} 9.3~30.2mg/m²hr, TSS 54.8~606.4mg/m²hr로 분석되었다. 그리고 TN과 TP는 2.8~10mg/m²hr와 1.6~4.2mg/m²hr의 범위로 각각 나타났다.

Table 8. Statistical analysis of pollutants loads per unit area

Parameter	BOD (mg/m ²)	COD _{Mn} (mg/m ²)	TOC (mg/m ²)	TSS (mg/m ²)	T-N (mg/m ²)	NH ₃ -N (mg/m ²)	NO ₂ -N (mg/m ²)	NO ₃ -N (mg/m ²)	T-P (mg/m ²)	PO ₄ -P (mg/m ²)
Min.	0.9	3.7	1.3	58.4	2.9	0.3	0.0	0.9	0.7	0.1
Max.	450.2	936.5	222.0	50960.2	229.0	28.3	7.4	173.3	252.5	73.6
Mean.	100.9	208.7	53.1	5530.8	54.5	4.9	0.9	30.6	40.0	10.8
95%CI Upper	154.9	322.7	83.5	6510.5	83.2	7.6	0.8	45.3	56.6	15.2
95%CI Lower	54.0	114.0	30.3	979.7	28.7	2.7	-0.1	14.7	16.5	4.4
St. Dev	124.2	251.1	60.5	12065.7	68.2	6.0	2.5	42.2	62.3	17.1

Table 9. Statistical analysis of pollutants loads depending on rainfall duration time per unit area

Parameter	BOD (mg/m ² hr)	COD _{Mn} (mg/m ² hr)	TOC (mg/m ² hr)	TSS (mg/m ² hr)	T-N (mg/m ² hr)	NH ₃ -N (mg/m ² hr)	NO ₂ -N (mg/m ² hr)	NO ₃ -N (mg/m ² hr)	T-P (mg/m ² hr)	PO ₄ -P (mg/m ² hr)
Min.	0.2	0.8	0.2	10.0	0.4	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
Max.	75.8	150.6	29.5	8583.0	55.7	3.2	0.3	16.3	8.5	5.5
Mean.	10.7	20.9	4.9	629.3	7.3	0.5	0.0	3.0	2.6	0.9
95%CI Upper	15.6	30.2	7.5	606.4	10.0	0.8	0.0	4.4	4.2	1.3
95%CI Lower	4.9	9.3	2.6	54.8	2.8	0.3	0.0	1.4	1.6	0.4
St. Dev	15.5	30.9	6.3	1729.1	12.0	0.7	0.1	4.3	2.8	1.3

3.3 원단위 산정

본 연구에서는 연구방법에서 있는 (2), (3), (4)번 식을 모두 사용하여 원단위를 산출하였으며, 그 결과를 표 10에 나타내었다. 원단위는 적용 공식에 따라 결과값의 차이가 있는 것으로 나타났는데, 본 연구에서는 식 (2)번이 가장 낮은 값으로 나타났고, 식 (3)번이 가장 높은 값으로 산정되었다. 식 (2)를 적용한 BOD는 21.8g/m²/yr으로 분석되었으며, COD는 38.9g/m²/yr, TSS

는 719.5g/m²/yr로 나타났다. 또한 TN과 TP는 10.7g/m²/yr 및 5.8로 분석되어졌다. 또한 식(3)번을 적용한 오염물질의 원단위는 BOD가 56.8g/m²/yr, COD가 101.7g/m²/yr, TSS가 1878.8g/m²/yr으로 산출되었다. 그리고 TN과 TP는 26.3g/m²/yr, 15.2로 분석되었다. 한편, 식 (4)에서는 BOD가 52.7g/m²/yr, COD가 94.2로 분석되었으며, TSS는 1741.6g/m²/yr, TN은 24.3g/m²/yr, TP는 14.1g/m²/yr으로 나타났다.

Table 10. Unit loads of pollutant

Equation	BOD	COD _{Mn}	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
Equation-2 (g/m ² /yr)	21.8	38.9	719.5	10.7	1.3	0.04	5.9	5.8	1.8
Equation-3 (g/m ² /yr)	56.8	101.7	1878.8	26.3	3.4	0.1	15.4	15.2	4.8
Equation-4 (g/m ² /yr)	52.7	94.2	1741.6	24.3	3.1	0.09	14.2	14.1	4.5

3.4 강우사상과 오염물질의 상관성 분석

강우사상과 오염물질간의 상관성 분석은 비점오염저감시설의 설계 및 저감대책에 큰 의미를 갖는 분석이다. 상관성 분석에서 상관성 계수가 높게 나타나더라도 p-value 값이 0.05보다 높은 값을 보일 경우에는 확률적으로 둘 사이의 관계에 상관성이 없음을 의미한다. 강우사상과 오염물질간의 상관성 분석 결과, ADD는 BOD, COD_{Mn}, TSS 및 TP와 상관성이 있는 것으로 나타났다(Table 11). 그 중, TP가 0.721로 높은 상관관계를 가지고 있었으며, BOD, COD_{Mn}, TSS는 0.561~0.681의 상관관계를 가지고 있었다. 또한 강우량은 TSS 및 TN과 TP에서 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 강우가 발생하면 표면에 있는 토양이 초기강우에 의해 씻겨지

고, 그 후 강우량이 많아질수록 표면토양 아래 위치하고 있던 비옥한 토양에서 TN 및 TP와 같은 영양염류들이 유출되기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과는 강우강도와 오염물질의 상관관계에서 다시 확인할 수 있는데, 강우강도는 TSS, TN, TP와 0.729, 0.642, 0.780 으로 높은 상관관계를 가지고 있었다(Table 12). 강한 강우강도는 표면 토양의 침식을 유발한다. 따라서 강한 강우강도에 의해 표면 토양의 침식이 활발히 이루어지면 표면 토양 아래층에 위치한 비옥한 토양의 영양염류가 비점오염물질로 유출될 가능성이 커지게 되며, 본 연구에서 실시된 강우강도와 오염물질과의 상관관계 분석은 이러한 경향을 잘 보여준 것으로 판단된다. 강우지속기간은 TP의 유출농도와 0.656 만큼의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 한

편, 오염물질간 상관성 분석에서 BOD는 COD_{Mn}와 0.912의 매우 높은 상관성을 보였다. 그리고 COD_{Mn}는 TSS와 0.505의 상관관계를 가지고 있었으며, TSS는 TP와 0.592의 상관성을 보였다. 영양염류인 TN와 NO₃-N

와 0.422의 상관성을 가졌으며, NH₃-N과는 상관상이 없는 것으로 분석되었다. TP의 경우에는 PO₄-P는 0.575의 상관관계를 가지고 있었다.

Table 11. Relation analysis between rainfall event and pollutants

Parameter	BOD	COD _{Mn}	TSS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	PO ₄ -P	
ADD	Pearson correlation coefficient	.561	.681	0.569	.004	-.065	-.177	.721	.167
	p-value	.046	.042	.047	.983	.748	.378	.036	.405
	Pearson correlation coefficient	-.327	-.247	.520	.622	.312	-.142	.383	.137
Rain fall	p-value	.095	.214	.045	.046	.050	.479	.049	.494
	Pearson correlation coefficient	-.757	-.392	-.152	-.153	-.172	-.296	.656	.224
Rain fall duration	p-value	.057	.063	.449	.447	.391	.134	.000	.261
	Pearson correlation coefficient	.001	.124	.729	.642	-.079	.111	.780	.124
Rain fall intensity	p-value	.995	.537	.025	.034	.696	.581	.026	.538

Table 12. Correlation analysis among pollutants

Parameter	BOD	COD _{Mn}	TOC	TSS	TN	NH ₃ -N	NO ₃ -N	TP	PO ₄ -P		
BOD	Pearson correlation coefficient	1	.912	.096	.316	-.053	-.033	.004	-.367	-.166	
	p-value		.000	.633	.109	.794	.869	.986	.060	.407	
COD _{Mn}	Pearson correlation coefficient			.106	.505	.002	-.115	-.028	-.336	-.037	
	p-value			.597	.007	.993	.570	.889	.087	.856	
TOC	Pearson correlation coefficient				1	-.013	.219	.325	.080	.207	.338
	p-value					.948	.272	.098	.690	.299	.084
TSS	Pearson correlation coefficient					1	.157	-.244	.108	.592	-.018
	p-value						.433	.220	.591	.026	.929
TN	Pearson correlation coefficient						1	.062	.422	.040	.565
	p-value							.757	.028	.842	.002
NH ₃	Pearson correlation coefficient							1	-.273	.143	.167
	p-value								.168	.478	.405
NO ₃	Pearson correlation coefficient								1	.034	.124
	p-value									.865	.538
TP	Pearson correlation coefficient									1	.575
	p-value										.002
PO ₄	Pearson correlation coefficient										1
	p-value										

4. 결론

본 연구는 수질오염총량관리의 성공적인 이행을 위한 기초데이터를 제공하고자 토마토 시설재배지역을 대상으로 강우시 오염물질의 유출 EMC, 부하량 및 원단위 등을 산정하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 산정된 EMC 값의 평균은 BOD 9.6mg/L, COD_{Mn} 17.2mg/L, TOC 5.5mg/L, SS 319.4mg/L, T-N 4.4mg/L, T-P 2.6mg/L, NH₃-N 0.5mg/L, NO₂-N 0.04mg/L, NO₃-N 2.6mg/L, PO₄-P 0.8mg/L로 조사되었다. 이 중 영양염류인 TN은 대부분 NO₃-N의 형태, TP는 입자성 인의 형태로 유출되는 것으로 파악되었다.
- 2) 계절별 유출 EMC에 대해 조사한 결과 BOD와 COD_{Mn}는 가을에 높은 농도가 유출되었으며, TSS는 여름과 가을에 높은 농도로 유출되었다. 한편, TN의 경우에는 겨울과 봄에 높은 농도로 유출되는 것으로 나타나 계절에 따라 오염물질의 유출 농도에 차이가 있는 것으로 조사되었다.
- 3) 단위 면적당 오염물질 부하량 분석에서 BOD의 신뢰구간 범위는 54~154mg/m², COD_{Mn}는 114~322mg/m², 그리고 TSS는 979~6510mg/m²로 분석되었다. 또한 영양염류인 TN의 신뢰구간은 28.7~83.2mg/m², TP는 16.5~56.6mg/m²hr의 범위로 산정되었다.
- 4) 오염물질의 원단위는 계산 공식에 따라 그 값이 차이가 존재하였는데 3개의 공식에 적용한 본 결과, BOD는 21.8~56.8g/m²/yr의 범위로 나타났으며, COD_{Mn}은 38.9~101.7g/m²/yr로 나타났다. 또한, TSS의 경우에는 179.5~1878g/m²/yr의 범위로 분석되었고, TN과 TP는 10.7~26.3g/m²/yr 및 5.8~15.2g/m²/yr로 각각 분석되었다. 한편, NH₃-N, NO₃-N 및 PO₄-P는 1.3~3.4g/m²/yr, 5.9~15.4g/m²/yr 및 1.8~4.8g/m²/yr의 범위로 각각 분석되어졌다.
- 5) 강우사상과 오염물질의 상관성 분석에서는 선행 건기일수는 BOD, COD_{Mn}, TSS 및 TP와 상관관계가 있었으며, 강우량과 강우강도는 TSS, TN 및 TP와 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

References

- Choi, JY, Song, YS and Kim, LH (2012). Characteristics of stormwater runoff from urbanized areas, *J. of Wetlands Research*, 14(2), pp. 159-168.
- Integration of Relevant Ministry (2012). *The second comprehensive countermeasures for management of nonpoint pollutants source on major 4 rivers*.
- Jung, YJ, Nam, KH and Min, KS (2004). Generation and discharge characteristics of non-point pollutants from farmlands of small watershed for Nak-dong river, *J. of Korean Society on Water Quality*, 20(4), pp. 333-338.
- Kim, CM, Lee, EJ, Lee, SY, Kim, YC and Kim, LH (2008). Sediment unit loads from developing areas during storms, *J. of Wetlands Research*, 10(1), pp. 59-68.
- Kim, CM, Lee, SY, Lee, EJ and Kim, LH (2008). Determination of heavy metal unit load from transportation landuses during a storm, *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 8(6), pp. 155-160.
- Kim, KS, Park, JS, Hong, HS and Lee, KH (2012). Characteristics of non-point source runoff in housing and industrial area during rainfall, *J. of Wetlands Research*, 14(4), pp. 581-589.
- Kim, SS, Kim, JS, Bang, KY, Kwon, EM and Jung, UJ (2002). Investigation of runoff characteristics and unit loads of nonpoint pollution source by rainfall characteristics of Kyung-an river, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 24(11), pp. 2079-2027.
- Kim, SS, Kim, JS, Bang, KY, Kwon, LM and Jung, WJ (2002). The estimation of the unit load and characteristics of nonpoint source discharge according to rainfall in Kyongan watershed, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 24(11), pp. 2019-2027.
- Korea Environment Institute (KEI) (2002). *Management plan of stormwater runoff for removal of nonpoint pollutants source*.
- Lee, SY, Maniquiz, MC, Choi, JY and Kim, LH (2009). Determination of EMCs for rainfall ranges from transportation landuses, *J. of Wetlands Research*, 11(2), pp. 67-76.
- Ministry of Environment (MOE) (1995). *Report on survey research enterprise of nonpoint pollutant source*.
- Ministry of Environment (MOE) (2001). *Tips for management of nonpoint pollutant source*.
- Ministry of Environment (MOE) (2006). *Business guide of nonpoint pollutant source*.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017). *Study on evaluation method of nonpoint pollution loads*.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2011). *Long-term monitoring of major nonpoint pollutants source runoff*.
- Won, CH, Choi, YH, Seo, JY, Kim, KC, Sin, MH and Choi, JD (2009). Determination of EMC and unit

- loading of rainfall runoff from forestry-crops field. *J. of Korean Society Water Quality*, 25(4), pp. 615-623. 418-434.
- Yang, HK (2006). Runoff characteristics of nonpoint source pollutants in storm event-Case study on the upstream and downstream of Kokseong river, Korea, *J. of the Korean Geographical Society*, 41(4), pp.

- 논문접수일 : 2013년 10월 29일
- 심사의뢰일 : 2013년 10월 30일
- 심사완료일 : 2013년 11월 01일