

농촌의 비닐하우스 재배지역에서 배출되는 강우유출수의 특성

전제찬 · 이상협 · 권구호 · 이재운* · 권현각* · 민경석⁺

경북대학교 환경공학과

* 국립환경과학원 낙동강 물환경연구소

Characteristics of Stormwater Runoff discharged from vinyl greenhouse growing area in farming area

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

· Heun Gag Kwon* · Kyung Sok Min +

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

** Nakdongriver Environment Research Center*

요 약

국내의 수질정책은 하천으로 방류되는 방류수의 농도를 규제하는 방식에서 총량을 규제하는 방식으로 바뀌었다. 또한 수질오염총량관리제가 실시되어 각 수계의 구역별로 목표 수질이 정해지게 되었다. 수질오염총량관리제가 성공적으로 이행되기 위해서는 점오염원 및 비점오염원으로부터 배출되는 오염물질의 부하량을 정확하게 파악해야 한다. 이에 본 연구는 농촌의 밭지역을 대상으로 27회의 강우유출수 모니터링을 실시하였으며, 모니터링 결과를 활용하여 밭지역으로부터 배출되는 오염물질의 부하량 및 원단위 등을 산정하였다. 그 결과, 유기물질인 BOD 및 COD_{Mn}의 경우 오염물질의 평균 유출 농도는 10.5mg/L와 19.6mg/L로 나타났으며, 영양염류인 TN과 TP는 4.5mg/L 및 2.4mg/L로 분석되었다. 한편, 국립환경과학원에서 제시한 원단위 산정 공식에 의해 산정된 원단위는 BOD 31.8kg/km²/yr, COD_{Mn} 56.7kg/km²/yr, TOC 8.5kg/km²/yr, TSS 560.9kg/km²/yr, TN과 TP는 각각 8.3kg/km²/yr 및 5.1kg/km²/yr로 산정되었다. 이러한 모니터링 결과는 연구자마다 그 결과 값에 차이가 있는 것으로 밝혀졌으며, 이에 정확한 원단위 산정을 위해서는 장기적인 모니터링이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우유출수, 농촌지역, 비점오염원, 오염물질 부하량, 원단위

Abstract

In national water quality policy, it changed previous regulation method that focuses on concentration of pollutants in effluent water to the way that regulates total amount of pollutants. The target of water quality in watershed of each river was set up, as the government instituted Total Maximum Daily Loads(TMDL). In order to accomplish successfully TMDL, it requires that the amount of pollutant loads discharged from point and nonpoint pollutant source should be investigated. This study, therefore, conducted the monitoring of the stormwater runoff at field region in farming area. And pollutants loads and unit loads discharged from field region results is calculated. As a result, the concentration of pollutants were calculated as follows: 10.5 BOD mg/L, 19.6 COD_{Mn} mg/L, 4.5 TN mg/L and 2.4 TP mg/L. The unit load of BOD, COD_{Mn}, TOC, TSS, TN and TP discharged from field region, also, were determined to 31.8kg/km²/yr, 56.7kg/km²/yr, 8.5kg/km²/yr, 560.9kg/km²/yr, 8.3kg/km²/yr and 5.1kg/km²/yr, respectively. It was identified that there were some differences of unit loads between the results obtained from this study and previous one. To calculate exact unit loads, therefore, long term monitoring should be conducted.

Keywords : Nonpoint pollutant source, Pollutants loads, SRural area, tormwater runoff, Unit loads

⁺ To whom correspondence should be addressed. ksmin@knu.ac.kr

1. 서론

2000년대 까지 국내 수질관련 정책은 생활하수, 산업폐수, 가축분뇨 등의 점오염원 위주로 규제를 진행하였으며, 기술개발의 개발에 따라 높은 수준의 처리 효율을 이루었다. 그러나 높은 수준의 점오염원 처리에도 불구하고, 도시화에 따른 불투수면의 증가로 인해 비점오염물질이 증가하면서 하천의 수질은 정체하거나 오히려 악화되었다(Jung *et al.* 2004). 환경부(2004)에서는 비점오염원이 과거 2004년에 우리나라 4대강에 약 22~37% 정도 수질의 악화에 기여했으며, 2015년에는 65~70%까지 그 수준이 향상될 것으로 예측하고 있다(MOE, 2004). 이에 하천의 수질을 개선하고 건강한 수생태계를 구성하기 위해서는 비점오염원의 관리가 반드시 필요한 실정이다.

비점오염원은 강우량, 강우강도 및 선행건기일수와 같은 강우의 특징과 경사도, 불투수율, 토지이용형태 등 유역의 특성에 따라 오염물질의 종류와 농도가 다르게 배출되는 불확실성이 매우 큰 오염원이다(Sansalone and Bushberger, 1997a). 이러한 불확실성을 줄이기 위해서는 강우유출량 측정 및 시료의 분석을 보다 정확하게 해야 할 뿐만 아니라 다양한 토지 형태에서 장기간 모니터링의 수행으로 기초자료를 충분히 확보하여야 한다. 이러한 자료들은 비점오염에서 오염물질의 유량가중평균농도(EMC: Event Mean Concentration) 및 부하량 산정시 매우 유용하게 이용되고, 수질 관련 정책에 반영 되고 있다. 그러나 기초

자료 확보를 위한 모니터링을 위해서는 시간, 예산 및 인력 등이 많이 소요되는 어려움이 있어 단일 지목에 대한 강우 특성별 종합적인 실측자료는 충분하지 못한 실정이다(Yoon *et al.* 2010). 이에 본 연구는 비점오염저감대책 마련을 위한 기초자료 축적의 일환으로 참외를 재배하는 밭 지역을 대상으로 강우시 모니터링을 수행하였으며, 모니터링 결과를 이용하여 오염물질의 EMC, 원단위 및 유출부하량 등을 산정하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 연구지점의 특성

연구대상 지역은 성주군에 위치한 참외를 재배하는 구역으로 토지피복 분류체계(RS/GIS) 중분류(23단계) 중 시설재배지역에 속한다. 본 연구의 대상지는 2,929m²의 면적을 지니고 있으며, 주변은 논으로 구성되어 있다. 연구대상지에서는 참외를 재배하기 위한 비닐하우스(폭 6.5m, 길이 97m) 4동이 설치되어 있으며, 비닐하우스 설치에 따른 총 면적의 86.1%인 2,522m²가 불투수면적으로 구성되어 있다. Fig. 1과 같이 강우가 발생하면 유출수는 비닐하우스 사이의 배수로를 따라 흐르게 되고, 배수구역 내의 모든 강우유출수는 한 지점으로 차집되어 인근 농수로로 배출된다. 또한, 배수구역 면적을 제외한 외부로부터 강우유출수가 유입되지 않아 단일지목에서 발생하는 비점오염물질의 양을 정확히 산정할 수 있다.

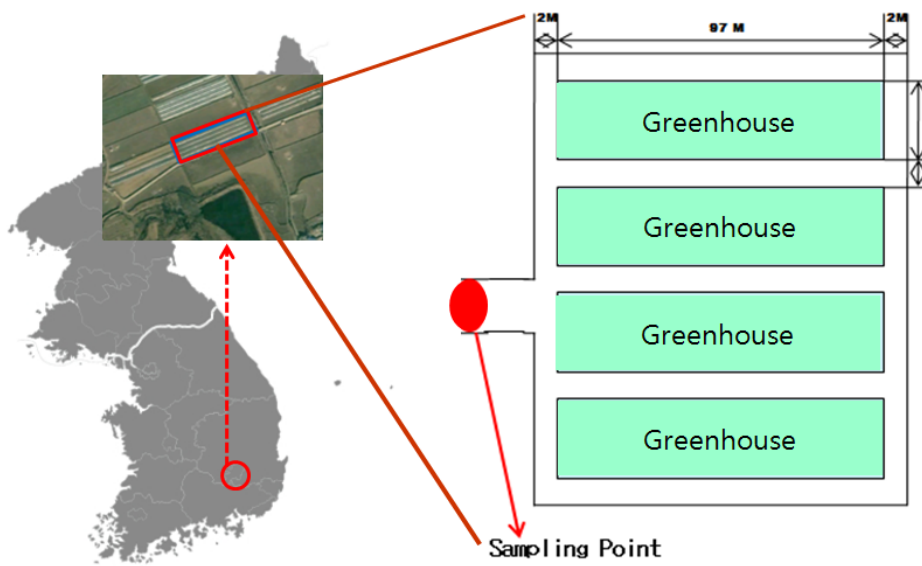


Fig. 1 Location and sampling point of catchment area

2.2. 조사항목 및 분석

2.2.1 강우유출수 모니터링

강우유출수 모니터링은 2008년부터 2011년까지 4년 동안 33회에 걸쳐 실시되었다. 강우량의 경우 현장에 1분 단위로 측정가능한 강우강도계(Raingage-20, Environdata Environmental Monitoring & Management사)를 설치하여 직접 측정하였으며, 강우유출수 또한 전자식 유량계(Flo-TOTE3, Marsh McBIRNEY사)를 설치하여 측정하였다. 시료의 측정은 강우 초반에는 초기세척현상 등의 특성을 파악하기 위해 짧은 시간 간격인 유출시작, 5분, 10분, 15분, 30분을 각 2회씩 채수하였으며, 그 이후로는 1시간에서 2시간 간격으로 시간간격을 늘려 채수하였으며, 강우강도가 변화하는 시간에는 다시 짧은 시간간격으로 채수하였다. 채취된 시료는 냉장보관 후 실험실로 옮겨 곧바로 분석을 실시하였다. 분석은 TSS(Total Suspended Solids), BOD(Biochemical Oxygen Demand), COD_{Mn}(Chemical Oxygen Demand), TOC(Total Organic Carbon), TN(Total Nitrogen), NH₃-N(Ammonia Nitrogen), NO₃-N(Nitric Nitrogen), TP(Total Phosphorus) 및 PO₄-P(Phosphate Phosphorus)가 실시되었다. 시료의 전처리 및 분석은 수질오염공정시험법(MOE, 1996)에 따라 실시하였다.

2.2.2 자료의 분석

본 연구에서는 오염물질의 유출농도를 파악하기 위해 EMC를 산정하였다. EMC는 강우사상에 따른 평균 농도를 의미한다. 비점오염물질의 농도는 강우

시 발생하는 유량의 변화에 의해 매우 큰 폭으로 변화하므로, 유역에서 발생하는 비점오염물질의 평균 농도를 정확하게 산정하기 위해서는 유량의 이산을 고려한 유량 가중평균 농도를 사용하여야 한다(Sansalone and Bushberger, 1997b). 강우시 발생하는 강우유출수 시료를 산술적 농도 평균으로 산정하는 등 명확치 않은 유출부하량의 산정은 그 결과 값에 큰 차이를 내고 이러한 부정확한 결과를 이용하여 수립된 정책은 막대한 비용을 낭비한 후 실패로 끝날 가능성을 내재한다(Uhevic *et al.*, 2000). EMC의 계산은 전체 강우지속시간 T시간 동안 유출된 전체 누적 오염물질의 양을 전체 누적 유출량으로 나누어 계산한다(식-1). 식-1에서 C(t)와 Q_{TRu}(t)는 강우지속시간 t에 대한 오염물질의 농도와 유출유량을 의미한다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} = \frac{\int_0^T C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int_0^T Q_{TRu}(t) dt} \quad (\text{식-1})$$

식-2는 유역면적에 따른 오염물질의 부하량을 산정하는 공식을 나타내고 있다. 식-1에서 산출된 EMC에 지점별 전체 유출량을 곱하고 유역면적으로 다시 나누면 구할 수 있다. 이러한 부하량은 본 연구에서 대상지로 선정된 발지역이 장기적으로 수계에 미치는 영향을 미치는 것을 판단하는데 중요한 자료로 이용할 수 있다.

$$Pollutant\ Loading\ Per\ Watershed\ Area(mg/m^2) = \frac{EMC(mg/L) \times Q(m^3)}{Area(m^2)} \quad (\text{식-2})$$

그리고 본 연구에서는 오염물질의 원단위를 산정하였는데, 원단위의 경우 수질오염총량관리를 시행할 때 기초가 되는 자료로서 중요하게 이용되어지고 있다. 본 연구에서는 다양한 원단위 산정 방식 중 NIER(2007)에서 제시하는 원단위 공식을 이용하여 산정하였다(식-3). 여기서, Rz는 토지피복분류 z의 대표 유출율을 의미한다.

$$Unit\ Load(kg/km^2 \cdot yr) = (\text{대표년강우량} \times EMC \times R_z) / 365 \quad (\text{식-3})$$

한편, 강우시 유출되는 선행무강우일수(Antecedent Dry Days, ADD), 강우량, 강우강도 등의 강우사상의 특징이 오염물질의 유출 농도에 미치는 영향을 알아보고, 또한 오염물질항목간에 어떤 상관관계를 가지는지 알아보기 위해 SPSS(ver. 19)를 이용하여 상관성 분석을 실시하였다. 상관성 분석은 각 인자끼리의 값을 분석하여 어느 정도 상관성이 있는지 수치로 나타내는 것으로 상관계수와 p-value의 값으로 그 상관성 정도를 판단한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우사상 분석

본 연구를 위한 모니터링은 2008년부터 2011년까지 4년에 걸쳐 33회가 수행되어졌으나, 6회의 강우에서 유출이 발생하지 않았기에 27회의 데이터를 이용하여 분석을 실시하였다. 모니터링이 실시된 강우사상의 통계분석 결과를 Table 1에 정리하였다. 모니터링은 계절별로는 겨울을 제외한 봄, 여름, 가을에 모니터링이 수행되어졌으며, 선행 무강우일수는 2일에서 19일까지 폭 넓은 범위로 분포하고 있다. 강우량의 경우 전체적으로 1~187.2mm까지 매우 넓은 범위로 분포하고 있는데, 강우량에 따른 모니터링 횟수는

1~5mm의 강우가 발생했을 때 5회, 5~10mm의 강우량에서 8회, 10~20mm 강우량에서 4회, 20~30mm 강우량에서는 5회, 30~50mm의 강우사상에서 6회, 50mm 이상의 강우에서는 5회 모니터링이 실시되었다. 강우 발생시간은 0.1~34.9hr로 분포하고 있었으며, 강우강도는 0.3~6.1mm/hr까지 분포하고 있었다. 본 연구의 배수구역이 밭 지역임에도 불구하고 낮은 강우량에서 강우유출수가 발생한 것은 비닐하우스의 설치로 인해 배수구역의 86%가 불투수층으로 구성되어 있기 때문으로 판단된다. 또한, 짧은 ADD로 인해 토양층의 공극이 수분으로 채워져 있으며, 지하수위 또한 상승하여 토양으로 침투되는 유량이 줄어들었기 때문으로 판단된다.

Table 1. Summary of rainfall event

Event No.	ADD (day)	Rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Runoff flow (m ³)	Rainfall intensity (mm/hr)
Min.	2.0	1.0	0.1	0.8	0.3
Max.	19.0	187.2	34.9	354.7	6.1
Average	6.1	30.1	12.0	67.1	2.1
95% CI Upper	8.2	40.3	16.1	89.9	2.9
95% CI Lower	4.0	19.8	7.9	44.2	1.4
St. Dev.	4.1	35.7	7.4	74.5	1.6

3.2 EMC 분석

본 연구의 대상지역에서 강우시 발생한 오염물질 EMC 통계분석 결과를 Table 2에 정리하였으며, Fig. 2에는 오염물질의 EMC 농도를 box plot으로 나타내었다. BOD의 경우 총 27회의 강우사상에서 1.5~53.5mg/L의 범위를 나타내었으며, 평균은 10.5mg/L로 분석되었다. COD_{Mn}의 경우는 BOD보다 더 높은 값을 나타내었는데, 평균과 농도범위가 19.6mg/L, 6.7~72.1mg/L로 조사되었다. 한편, TSS의 경우 27.2~874.2mg/L로 매우 넓은 범위를 가지는 것으로 분석되었다. TSS의 평균은 227.5mg/L이었다. 영양염류인 TN과 TP 중, TN은 1.9~10mg/L의 범위, 평균 4.5mg/L의 농도를 가지는 것으로 분석되었는데, 대부분이 NH₃-N으로 구성되어 있었으며, NO₃-N은 낮은 농도로 조사되었다. 또한, TP의 경우는 0.1~7.8mg/L의 범위로 나타났으며 평균은 2.4mg/L로 분석되었다. TP를 구성하는 성분 중 PO₄-P에 대한 분석에서는 0~4.8mg/L의 범위 평균 0.9mg/L로 분석되어 참의 재배지역에서는 PO₄-P와 같은 Ortho-P의 형태 보다는 인을 구성하는 다른 형태인 Poly-P 또는 Organic-P와 같은 형태로 배출되는 것으로 판단된다. 한편, 강우 계급에 따른 오염물질의 유출 EMC를 조사한 결과는 Table 3에 제시되어 있다. 강우 계급은 0~5mm, 5~10mm, 10~20mm, 20~30mm, 30~40mm, 40~50mm 및 50mm이상으로 나누어 조사되어졌다. 그 결과, BOD, COD_{Mn}, TOC는 5~20mm의 적은 강우에서 높은 농도로 유출되는 것으로 조사되었으며, TSS 및 영양염류는 강우량이 많아질수록 높은 농도로 유출되는 것으로 분석되었다. TSS의 경우 연구대상지역이 토양으로 구성되어 있기에 강우량이 많아질수록 입자상물질의 유출량이 증가하기 때문이며, BOD와 COD_{Mn}과 같은 유기물은 낙엽이나 동식물의 사체 등이 주로 깊이 얇은 토양의 표면층에서 썩어 발생하므로 적은 강우량이 내렸을 때나 강우 초반에 주로 유출되는 것으로 판단된다. 한편, 영양염류의 경우 강우량이 많을수록 더 높은 농도로 유출되는 것으로 나타났다.

Table 2. Statistical analysis of EMC

(unit : mg/L)

	BOD	CODMn	TOC	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
Min.	1.5	6.7	1.8	27.2	1.9	0.2	0.1	0.1	0.0
Max.	53.5	72.1	7.4	874.2	10.0	14.9	2.4	7.8	4.8
Average	10.5	19.6	4.3	227.5	4.5	2.5	0.7	2.4	0.9
95% CI Upper	14.1	26.3	5.8	305.1	6.1	0.9	3.4	3.2	1.3
95% CI Lower	6.9	12.9	2.8	149.9	3.0	0.4	1.7	1.6	0.6
St. Dev.	10.6	13.0	1.4	197.0	2.2	0.6	3.0	2.1	1.1

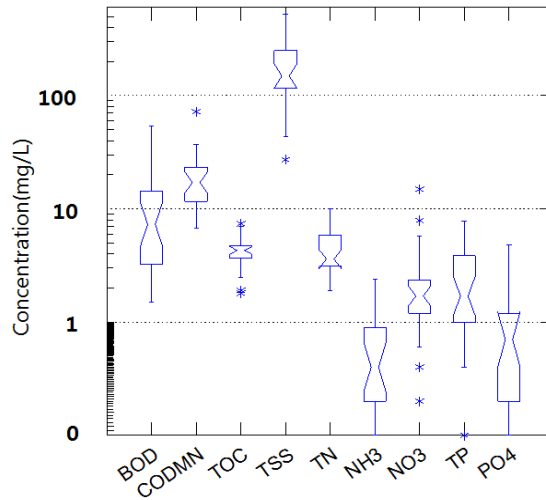


Fig. 2. Notched box plot for event mean concentrations

Table 3. EMC by rainfall range

(unit : mg/L)

Rainfall gage(mm)	Event No.	BOD	CODMn	TOC	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
0~5mm	5	10.8	25.2	3.7	145.5	3.5	1.5	0.4	0.6	0.1
5~10mm	8	17.2	26.1	4.5	143.7	3.7	1.2	0.3	1.4	0.5
10~20mm	4	12.2	20.4	5	168.7	3.8	1.3	0.3	2.1	0.5
20~30mm	5	3.4	15.4	4.5	175.8	5.1	2.6	0.6	2.4	1.4
30~40mm	2	6.9	16.2	4	283	5.3	2.5	0.8	2.1	1.3
40~50mm	3	9.8	14.9	4.6	336	5	4.5	1.1	3.2	1.7
50mm<	6	13.2	18.9	4.1	340	5.3	3.8	1.1	5.3	1

3.3 오염물질의 유출부하량 분석

연구기간 동안 모니터링을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 오염물질의 부하량을 결과를 Table 4에 나타내었으며, 통계분석한 결과는 Table 5에 제시하였다. 전체적으로 매우 넓은 범위의 부하량이 산정되었다. BOD의 경우 4.8~1137.9kg/km²의 범위로 평균은 210.4kg/km²으로 분석되었다. 이 때 95% 신뢰구간은 138.6~282.1kg/km² 으로 분석되었다. 또한 COD_{Mn}과 TOC는 각각 8.8~1806.6kg/km² 및 1.2~337kg/km²의 범위, 평균 480.4kg/km²와 98.6kg/km²으로 나타났다. 95% 신뢰구간은 316.5~644.3kg/km², 64.9~132.2kg/km²

의 범위로 분석되었다. 한편, 입자상 물질인 TSS는 74.9~41,653.4kg/km²의 범위, 평균 6895.4kg/km²로 분석되었다. TN의 경우, 부하량 범위와 평균은 0.7~497.2kg/km²와 103.7kg/km²로 조사되었으며, 95% 신뢰구간은 68.4~139.1kg/km²이었다. NH₃-N과 NO₃-N은 부하량 평균이 각각 52.5kg/km²와 13.2kg/km²로 분석되었다. 또한 TP의 경우 농도 범위와 평균은 0.2~732.2kg/km²와 77.3kg/km²으로 분석되었으며, 95% 신뢰구간은 50.9~103.7kg/km²으로 나타났다. 그리고 PO₄-P의 부하량 평균은 24.9kg/km²로 조사되었다.

Table 4. Pollutants load of unit area

(unit : kg/km²)

Event No.	BOD	CODMn	TOC	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
E-1	102.0	252.0	78.3	2307.3	200.8	156.9	0.0	156.9	96.6
E-2	86.3	192.8	127.8	1385.8	74.1	30.6	0.0	36.1	22.6
E-3	7.5	12.3	3.3	259.6	5.1	2.1	0.0	2.5	1.4
E-4	226.7	490.2	158.3	4489.9	188.7	85.6	0.9	153.9	100.2
E-5	807.5	1280.1	336.5	6786.8	155.4	58.7	0.0	235.2	103.3
E-6	10.1	15.0	6.2	74.9	11.7	9.8	0.6	0.2	0.0
E-7	48.8	113.3	41.5	978.9	50.1	33.7	2.3	0.5	0.4
E-8	1137.9	1533.1	93.9	2511.6	67.3	39.9	18.9	27.7	12.2
E-9	104.5	154.0	13.3	967.1	26.2	13.4	0.4	11.5	1.7
E-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-11	396.4	1311.9	234.7	28234.5	195.5	124.4	13.7	53.1	29.9
E-12	72.8	119.6	26.1	162.1	18.4	5.2	10.2	8.5	7.2
E-13	351.1	589.0	118.2	27722.3	99.7	38.2	51.8	36.3	20.4
E-14	225.8	299.5	75.6	2811.2	38.4	11.9	2.8	13.4	3.6
E-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-18	165.4	196.9	35.1	2457.4	22.4	17.3	4.2	9.2	0.4
E-19	218.9	294.6	61.6	9564.1	38.1	23.4	1.9	14.8	1.4
E-20	193.7	399.2	69.4	6433.5	40.1	19.0	4.6	6.5	1.2
E-21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-23	5.6	8.8	1.2	85.2	0.7	0.4	0.2	0.3	0.0
E-24	111.7	199.1	18.6	1141.6	21.8	16.7	5.0	11.2	0.8
E-25	851.7	1617.7	111.8	12058.5	197.6	85.5	102.6	105.6	60.7
E-26	37.1	135.7	49.3	518.2	69.3	24.6	24.5	31.5	18.3
E-27	4.8	29.6	17.1	283.1	22.5	5.0	0.2	4.4	1.9
E-28	39.6	207.3	101.8	3106.3	138.0	16.0	5.0	72.6	43.1
E-29	51.0	239.8	113.5	5363.1	127.9	36.7	13.1	80.2	29.4
E-30	117.7	1129.9	260.4	20343.4	365.7	60.6	56.7	35.9	11.0
E-31	33.9	77.8	37.5	732.4	41.1	2.1	3.0	51.8	10.8
E-32	70.1	264.9	133.4	3743.7	87.4	442.2	5.5	196.0	7.7
E-33	201.0	1806.6	337.0	41653.4	497.2	56.3	27.3	732.2	86.9

Table 5. Statistical analysis of pollutants loads per unit area (unit : kg/km²)

Rainfall gage(mm)	BOD	CODMn	TOC	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
Min.	4.8	8.8	1.2	74.9	0.7	0.4	0.0	0.2	0.0
Max.	1137.9	1806.6	337.0	41653.4	497.2	442.2	102.6	732.2	103.3
Average	210.4	480.4	98.6	6895.4	103.7	52.5	13.2	77.3	24.9
95% CI Upper	282.1	644.3	132.2	9248.0	139.1	70.3	17.7	103.7	33.4
95% CI Lower	138.6	316.5	64.9	4542.8	68.4	34.6	8.7	50.9	16.4
St. Dev.	283.4	554.2	94.8	10487.0	115.5	86.7	23.3	145.7	33.9

3.4 원단위 산정

강우시 토지이용별로 정확한 원단위를 산정하기 위해서는 해당유역에서 동일한 토지이용 형태를 지닌 여러 지점에서 원단위 조사가 이루어져야 하고, 오랜 기간 모니터링을 통한 많은 자료의 축적이 필요하다 (Roh *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2001). 본 연구에서는 국립환경과학원에서 제시하는 원단위 산정 공식을 이용하여 원단위를 산출하였고, 다른 연구자에 의해 산정된 원단위 값과 비교하였다. 원단위 산정 결과 (Table 6), BOD는 31.8kg/km²/yr로 나타났으며, COD_{Mn}은 56.7kg/km²/yr, TOC는 8.5kg/km²/yr, TSS는 560.9kg/km²/yr로 나타났다. 또한 TN과 TP는 8.3kg/km²/yr과 5.1kg/km²/yr로 각각 산정되었다. 본 연구에서 산정된 원단위 결과를 같은 농촌 지역인 밭, 논, 삼림 지역을 대상으로 원단위를 산출한 다른 선행 연구 결과와 비교하였다. Choi(2011)의 연구에서 조사한 밭지역은 BOD 및 COD_{Mn}이 4.7kg/km²/yr과 7.8kg/km²/yr으로 나타났으며, 토마토 재배지를 대상으로 원단위를 조사한 Jeon(2013)의 연구에서는 BOD와

COD_{Mn}이 52.7, 94.2kg/km²/yr로 같은 밭 지역이라도 차이가 있는 것으로 분석되었다. 입자상 물질인 TSS는 Choi의 조사에서 111.9kg/km²/yr으로 나타났으며, Jeon의 연구에서는 1741kg/km²/yr로 나타났다. 또한 본 연구에서는 560.9kg/km²/yr로 나타나 각 연구마다 큰 차이가 있었다. 영양염류인 TN과 TP에서도 각각 다른 결과를 나타내었다. 삼림지역의 원단위는 밭지역의 원단위보다 대체적으로 낮은 값으로 나타났다. 또한, 논 지역에서 BOD, COD_{Mn}, TSS 및 TP는 밭보다 낮은 값을 나타내었지만, TN은 높게 유출되는 것으로 조사되었다. 이는 벼의 성장을 촉진시키기 위한 비료의 시비 때문으로 판단된다. 전체적으로 본 연구의 결과는 기존 연구자의 연구 결과와 어느 정도 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 배수구역 형태의 차이, 경작 활동의 차이, 강우사상의 차이 및 원단위 산정 방식의 차이 등 여러 인자에 의한 영향으로 사료된다. 이에 보다 정확한 원단위 산정을 위해서는 장기적인 모니터링과 함께 원단위 산정을 위한 통일된 공식이 필요할 것으로 판단된다.

Table 6. Unit loads of pollutant (kg/km²/yr)

Land use	BOD	CODMn	TOC	TSS	T-N	T-P	Reference
This study	31.8	56.7	8.5	560.9	8.3	5.1	-
Paddy	4.7	7.8	-	111.9	1.4	0.2	Choi (2011)
	52.7	94.2	-	1741.6	24.3	14.1	Jeon <i>et al.</i> (2013)
Forest	2.9	7.4	-	21.8	2.2	0.09	KEC (2004)
Paddy field	2.6-17.7	7.2-45.5	-	17.9-167.9	12.6-40.6	1.5-2.99	MOE (1994)

3.5 상관성 분석

선행건기일수, 강우량 및 강우강도 등의 강우특성이 오염물질의 유출 농도에 어느정도 영향을 미치는지와 오염물질 항목들 간에 서로 상관관계가 있는지 판단하기 위해 SPSS(ver. 19)를 이용하여 상관성 분석을 실시하였다(Table 7). ADD는 COD_{Mn}, TN, NH₃-N, 및 TP의 항목에 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었는데, ADD가 길어질수록 오염물질의 유출농도는 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 Pearson 상관계수가 0.189~0.383의 범위로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 강우량은 TSS 및 TP에 영향을 미치고 있었다. 강우지속시간은 오염물질의 유출 농도

에 아무런 영향이 없었다. 한편, 강우강도는 BOD, COD_{Mn}, TSS, NH₃-N 및 TP에 영향을 미치고 있었는데, TSS에 Pearson 계수 0.526으로 비교적 큰 상관성을 갖는 것으로 나타났으며, 그 외의 항목에서는 낮은 상관관계를 나타내었다. 강우강도와 BOD, COD_{Mn}, NH₃-N 및 TP와 상관성이 있는 것으로 분석된 것은 강우의 강도가 강해질수록 표면층의 토양이 많이 유출되고, 이에 따라 유출되는 흙 입자에 흡착되어 있는 유기물 및 영양염류도 함께 유출되기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다. 아래 오염물질 항목간의 분석에서 TSS 항목이 NH₃-N 및 TP와 상관성이 있다고 나타난 것이 이를 뒷받침한다.

Table 7. Correlation analysis between rainfall event and pollutants

		BOD	COD _{Mn}	TOC	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
ADD	Pearson correlation Coefficient	.320	.210	.392	-.118	.206	.383	.179	.189	.092
	p-value	.531	.048	.224	.513	.021	.013	.319	.037	.611
Rainfall	Pearson correlation Coefficient	-.060	.137	.172	.321	.166	.075	-.026	.340	.213
	p-value	.739	.449	.338	.031	.357	.741	.886	.010	.234
Rainfall duration	Pearson correlation Coefficient	-.071	.099	.314	.196	.211	-.057	.127	.426	.183
	p-value	.694	.583	.075	.275	.240	.802	.482	.783	.308
Rainfall intensity	Pearson correlation Coefficient	.281	.135	.110	.526	.135	.257	-.065	.226	.255
	p-value	.024	.031	.541	.035	.453	.032	.721	.013	.152

한편, 오염물질 항목 사이에서의 상관성 분석 결과는 Table 8에 나타내었는데, 유기물을 나타내는 지표인 BOD와 COD_{Mn} 및 TOC는 서로 간의 상관관계가 존재하는 것으로 분석되었다. 또한, TSS는 BOD, COD_{Mn}, NH₃-N 및 TP와 상관성이 있는 것으로 분석되었는데, 그 이유로는 이들 항목이 토양 입자에 흡착되어 있다가 강우유출수와 함께 유출되어졌기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 사료되며, 발지역에서 발생하는 강우 유출수의 NH₃-N과 TP는 입자성물

질로 이루어져 있을 확률이 높은 것을 의미한다. 한편, TN은 NH₃-N과 큰 상관성이 있었으나 NO₃-N과는 상관성이 없는 것으로 나타나 발 지역 강우 유출수의 대부분은 NH₃-N의 형태로 유출된다는 것을 알 수 있다. 또한 TP 역시 PO₄-P와 매우 약한 상관관계를 나타내는 것으로 분석되어져 발 지역의 강우유출수의 대부분은 PO₄-P보다는 TP의 형태로 유출되어지는 것으로 나타났다.

Table 8. Correlation analysis between each pollutant

		BOD	COD _{Mn}	TOC	TSS	T-N	NH ₃ -N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P
BOD	Pearson correlation	1	.648	.341	.226	-.013	.125	.004	-.062	-.049
	Coefficient									
	p-value		.000	.028	.036	.941	.578	.982	.732	.788
COD _{Mn}	Pearson correlation		1	.424	.019	.162	.170	.055	.043	.033
	Coefficient									
	p-value			.014	.047	.368	.449	.762	.812	.853
TOC	Pearson correlation			1	.285	.168	-.130	.320	.400	.477
	Coefficient									
	p-value				.108	.788	.563	.069	.081	.061
TSS	Pearson correlation				1	.082	.323	-.016	.426	-.077
	Coefficient									
	p-value					.650	.031	.931	.042	.670
T-N	Pearson correlation					1	.566	.408	.492	.110
	Coefficient									
	p-value						.020	.728	.004	.369
NH ₃ -N	Pearson correlation						1	-.160	.494	.405
	Coefficient									
	p-value							.477	.046	.062
NO ₃ -N	Pearson correlation							1	.509	.221
	Coefficient									
	p-value								.052	.216
T-P	Pearson correlation								1	.228
	Coefficient									
	p-value									.040

4. 결론

본 연구는 토지피복 분류체계의 중분류(23단계) 중 과수원 재배지에 속하는 발지역에 대해 강우시 33회 모니터링을 실시하였으며, 유출이 발생하지 않은 27회의 모니터링 데이터를 활용하여 오염물질의 유출농도, 유출부하량 및 원단위 등을 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 연구의 결과는 향후 수질오염 총량관리제의 성공적인 이행을 위한 기초자료로서 활용 가능할 것으로 판단된다.

- 1) 유기물질인 BOD 및 COD_{Mn}의 경우 오염물질의 유출 평균은 10.5mg/L와 19.6mg/L로 나타났으며, 영양염류인 TN과 TP는 4.5mg/L 및 2.4mg/L로 분석되었다. 이 중 NH₃-N이 TN의 대부분을 차지하고 있었으며, NO₃-N의 농도는 낮은 것

로 조사되었다. 또한, TP를 구성하는 PO₄-P의 농도는 낮은 것으로 분석되었다.

- 2) 강우발생량에 따른 오염물질의 유출 농도 분석에서 BOD, COD_{Mn}, TOC는 5~20mm의 적은 강우에서 높은 농도로 유출되는 것으로 조사되었으며, TSS와 TN 및 TP의 영양염류는 강우량이 많아질수록 높은 농도로 유출되었다.
- 3) 오염물질의 유출부하량 분석에서 BOD는 평균 210.4kg/km²의 양이 수계로 배출되고 있었으며, COD_{Mn}과 TOC는 각각 480.4kg/km²와 98.6kg/km²의 양이 배출되었다. 또한 입자상 물질인 TSS는 6895.4kg/km²이 유출되었으며, 영양염류인 TN과 TP는 각각 103.7kg/km², 77.3kg/km²이 수계로 유출되었다.
- 4) 참외를 재배하는 발지역의 원단위 조사 결과 BOD는 31.8kg/km²/yr, COD_{Mn}은 56.7kg/km²/yr,

그리고 TOC는 8.5kg/km²/yr로 나타났다. 또한 TSS는 560.9kg/km²/yr, TN과 TP는 각각 8.3kg/km²/yr과 5.1kg/km²/yr로 산정되었다. 이러한 결과는 다른 연구자들에 의해 연구된 결과와 차이가 있는 것으로 나타났으며, 이는 배수구역 형태와 경작활동 및 강우사상의 특징 등에 의한 차이로 판단된다.

- 5) 강우사상의 특징과 오염물질 항목사이의 상관성 평가에서 선행건기일수는 COD_{Mn}, TN, NH₃-N 및 TP에 낮은 상관성이 있었으며, 강우량은 TSS 및 TP에 영향을 미치고 있었다. 또한, 강우강도는 BOD, COD_{Mn}, TSS, NH₃-N 및 TP에 영향을 미치고 있었는데 특히, TSS와 가장 큰 상관성을 가지는 것으로 분석되었다. 한편, 오염물질간의 상관관계 평가에서 TSS는 BOD, COD_{Mn}, NH₃-N 및 TP에 일부 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

Reference

- Choi SH (2011). *Runoff Characteristic of nonpoint pollutant source of vinyl green house during rainfall*, Master's Thesis, Kyungpook National University, Daegu, Public Korea. [Korean literature]
- Jeon, JC, Kwon, KH, Lee, SH, Lee, JW, Gwon, HG and Min, KS (2013). EMC and unit loads of pollutants generated from tomato cultivation during rainfall, *J. of Wetlands Reseach*, 15(4), pp. 555-566. [Korean Literature]
- Jung, YJ, Nam, KH and Min, KS (2004). Generation and discharge characteristics of non-point polutants from farmlands of small watershed for Nak-dong river, *J. of Korean Society on Water Quality*, 20(4), pp. 333-338. [Korean Literature]
- Korea Environment Corporation(KEC) (2004). *The final report of investigating research to prepare nonpoint pollutant source management measure of Geum river watershed*. [Korean Literature]
- Lee, HD, Ahm, JH, Bae, CH and Kim, WJ (2001). Estimation of the Unit Loading and Total Loading of Nonpoint Source in Paldang Watershed by Runoff Loading during the Rainfall, *J. of Korea Society on Water Quality*, 17(3), pp. 313-326. [Korean Literature]
- Ministry of Environment(MOE) (1994), *Report on survey research enterprise of Nonpoint pollutants source*. [Korean Literature]
- Ministry of Environment(MOE) (1996), *Korean standard method*. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE) (2004). *Handbook of non-point pollutant source management*. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007). Study on evaluation method of nonpoint pollution loads. [Korean Literature]
- Roh, SD, Kim, JH, Lee, DK, Kim, SJ, Sohn, BY and Chun, YK (2006). Characteristics of pollutants discharge from hoengseong watershed during the dry and rainy seasons, *J. Korean Society on Water Quality*, 22(4), pp. 695-705. [Korean Literature]
- Sansalone, JJ and Buchberger, SG (1997a). Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater, *J. of Water Science and Technology*, 36(8-9), pp. 155-160.
- Sansalone, JJ and Buchberger, SG (1997b). Partitioning and first flush of metals in urban roadway strom water, *J. of Environmental Engineering*, 123(2), pp. 134-143.
- Ujevic, I, Odzak, N and Baric, A (2000). Trace metal accumulation in different grain size fractions of the sediments from a semi-enclosed bay heavily contaminated by urban and industrial wastewaters, *J. of Water Ressearch*, 34(11), pp. 3055-3061.
- Yoon, YS, Kwon, HG, YI, YJ, Yu, JJ and Lee, JK (2010). Development of nonpoint sources runoff load estimation medel equations for the vineyard area, *J. of the Environmental Sciences*, 19(7), pp. 907-915. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2014년 07월 31일
- 심사의뢰일 : 2014년 08월 04일
- 심사완료일 : 2014년 09월 22일