

강우시 비점오염원의 오염부하 특성 - 고구마 재배지를 대상으로 -

강미아^{1*} · 조수현¹ · 최병우¹ · 윤영삼² · 이재관²

¹안동대학교 환경공학과, ²국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Loading Characteristics of Non-Point Source Pollutants by Rainfall - Case Study with Sweet Potato Plot -

Meea Kang^{1*}, SooHyun Jo¹, ByoungWoo Choi¹, YoungSam Yoon²,
and JaeKwan Lee²

¹Department of Environmental Engineering, Andong National University

²National Institute of Environmental Research, Nakdong River Environment Research Center

본 연구에서는 비점오염원의 효율적인 관리방안을 확립하기 위하여 단위재배지로부터의 오염물질 배출특성을 조사하였다. 무강우일수가 상대적으로 길었던 약 20%의 강우사상을 제외한 나머지 강우사상에 대해서는 강우량과 강우에 의한 유출 수량의 상관성은 상관계수 0.92로 매우 높았으며, 유출수량이 유출계수에 미치는 영향인자로는 유출직전의 강우강도가 주요인자임을 알 수 있었다. 한편, 유출수로부터 발생하는 오염물질의 EMCs(유량기중평균농도)가 높은 강우사상의 결과로 무강우일수가 길었던 강우사상에서 무강우에 의해 건조된 토양의 영향에 기인한 것임을 알 수 있다. 유출수로부터 발생 되는 TSS, BOD, COD, TN 및 TP 등의 부하량은 동일한 강우사상에서 유사한 경향을 나타내므로 부유물질을 제어함으로써 다른 오염물질의 제거도 가능할 것으로 추정된다. 따라서 강우량계급별 유출계수만을 이용한 오염물질부하량은 많은 오차를 나타낼 것이며, 오염부하 예측시스템을 개발할 때에는 강우량, 무강우일수, 선행강우량 등을 인자로 고려한 재배 지토양조건을 충분히 고려하여야 할 것이다.

주요어 : 비점오염원, 강우량, 유출수, 무강우일수, 오염부하량

This paper address the characteristics of loading pollutants caused by the unit agricultural area to establish an efficient management method in NPS (non-point source). The relationship between rainfall and runoff shows good coefficient with 0.92, when the event which shows relatively long antecedent dry days is excepted. The impact of runoff volume on the runoff coefficient can be described by the rainfall intensity strongly. The pollutant EMCs (event mean concentrations) in runoff increased by the increase of antecedent dry days due to dry soil conditions. As the similar pattern of pollutant's loads such as TSS, BOD, COD, TN and TP, it is cleared that other pollutants can be removed when TSS is removed. Therefore the system using only runoff coefficients is not sufficient for the prediction of pollutant loads. It is necessary to consider soil conditions such as rainfall, antecedent dry day, antecedent rainfall etc. for the prediction system.

Key words : NPS(Non-point source), rainfall, runoff, antecedent dry day, pollutant load

서 론

우리나라는 1998년부터 팔당호 등 한강수계 상수원수 질관리 특별종합대책수립을 시작으로 낙동강, 영산강 및

금강 수계의 질적 향상과 물환경개선을 위해 노력해왔다. 점오염원에 의한 오염수준 저감을 달성하면서 비점오염 원에 기인하는 오염물질 제어 및 관리에 대한 필요성이 대 두되기 시작하였다. 점오염원과는 달리 비점오염원은 강

*Corresponding author: wdream@andong.ac.kr

우에 의해 발생하는 유출수의 수질에 지배를 받게 되며, 계절적, 지역적 편차가 매우 크고, 오염물질의 부하량을 산정하여 수계를 관리하는 것이 매우 어렵다. 농촌 경작지에서 발생하는 오염물질은 인근 하천을 오염시키는 주요원인으로 작용한다. 기존 연구결과에 따르면(국립환경과학원, 1997), 비점오염원은 강우량에 비례하여 유출되므로, 강우량의 계절변동이 큰 몬순기후의 특성을 지니고 있는 우리나라에서는 비점오염원의 유출이 계절적으로 크게 변동할 수밖에 없다고 보고하고 있다. 게다가 농촌지역에서의 비점오염물질의 발생은 시비량, 시비방법, 지형, 지질, 기후 등에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(김진호, 2008).

최근 비점오염원 관리방안을 위해 수행중인 연구에는 토지이용에 따른 원단위 산정을 통해 비점오염부하량을 추정하는 내용도 포함되어 있다. 원단위 산정은 지역개발과 환경보전 등에 매우 중요한 인자로 활용될 기초자료이므로 이에 대한 자료의 축적이 매우 시급하고 중요하다. 비점오염원에 의한 오염물질 유출평가는 강우시의 집중적인 조사를 통해 단위면적당유출부하량으로 계산하는데, 국내에서는 단위 재배지로부터의 유출특성을 2007년부터 모니터링하는 연구를 한강, 금강, 낙동강 및 영산강 유역에서 수행하고 있다.

세계적으로 농업활동에 의해 발생하는 수질오염은 매우 중요한 관심대상이며 이를 해결하기 위한 여러 연구가 활발히 진행되고 있다(Sharpley, A.N. et. al., 2001; Qadir, M. et. al., 2003; J.M. Dabrowski et. al., 2009; Mahdi Gheysari et. al, 2009). 그러나 유역중심이 아닌 재배지 단위의 오염부하특성에 대한 연구는 아직 초기 단계이어서 수치화할 수 있는 수준이 아니 것 또한 현실이다. 따라서 단위 재배지에서 발생하는 오염부하량을 정량적으로 산정하기 위해서는 강우량, 강우강도, 무강우일수 등의 기상조건을 충분히 고려하여 이들에 의한 영향을 수치화 할 수 있어야 하는데, 이에 대한 자료의 구축이 매우 빈약하며 이에 대한 연구가 요긴한 것이 현실이다.

본 연구에서는 고구마재배지를 대상으로 2008년 1월부터 12월까지 발생한 총 86회의 강우 중에서 유출수가 발생한 모든 강우사상을 대상으로 하였으며, 모든 대상 강우사상은 6월, 7월 및 8월의 3개월 동안 발생하였다. 총 9회의 강우사상에서 발생한 유출수의 물리적, 화학적 특성을 수질 특성으로 해석하여 비점오염원 오염부하산정을 합리적으로 할 수 있는 자료를 제시하고자 하였다.

연구방법

조사대상 단위 비점오염원에 해당하는 고구마재배지는 경북 안동시 송천동에 위치하며, 면적 631.3 m², 경사도 8.5%의 특성을 나타내며, 본 연구를 위해 2007년부터 예비조사를 수행하였다. 본 연구에서는 2008년 1월부터 12월까지 1년 동안 강우시에 발생하는 비점오염물질에 거동에 대한 모니터링을 하였다. 강우가 발생하는 시각부터 분당강우량이 측정가능한 Environdata weather station, Raingauge, RG 20 (Australia)을 이용하여 강우량을 측정하였고, 유출이 발생하는 시각부터 Flo-Tote 3 (USA)를 이용하여 분당유속을 측정하였다. 단, Flo-Tote 3을 이용할 수 없는 극소량의 유출이 발생하는 때에는 비이커에 유출수를 받아 해당시간으로 나누어 계산하였다.

유출수 시료는 채취 후 수질오염공정시험방법에 따라 총부유물질(Total Suspended Solids : TSS), 생물학적산소요구량(Biological Oxygen Demand : BOD), 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand : COD), 총질소(Total Nitrogen : TN), 및 총인(Total Phosphorous : TP)등의 항목에 대하여 분석하였다.

결과 및 고찰

강우사상 특성

조사대상 기간동안 고구마 재배지에 내린 강우는 총 86회로, 강우계급별로 구분하면 10 mm 미만인 63회, 10 mm 이상 30 mm 미만인 15회, 30 mm 이상 50 mm 미만인 6회, 50 mm 이상이 2회로 조사되었다. 10 mm 미만의 강우발생이 전체의 73%를 차지하지만 유출수는 발생되지 않았으므로 유출수에 의해 인근하천에 직접적으로 부하되는 오염물질은 없는 것으로 해석할 수 있다. 조사대상 기간동안 강우에 의해 발생하는 유출수는 총 10회이었으며, 이중 50 mm 이상의 유출발생 강우사상에서 1회의 시료채취가 불가능하여 시료채수는 9회의 강우사상에 걸쳐 수행되었으므로, 실제적으로 발생하는 오염부하량을 파악하는데 자료가 될 수 있을 것이다.

고구마 재배지에서 유출수가 발생한 강우사상의 특성을 선행무강우일수, 강우량, 강우지속시간, 평균강우강도, 총강우량, 총유출량 및 유출계수 등으로 구분하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 자료를 이용하여 강우량과 유출량과의 상관성을 구한 결과, 상관계수 $r=0.74$ 로 나타났다. 그러나 선행무강우일수가 9일인 Event 1과 선행무강우일수가 6일인 Event 2를 제외한 경우의 강우량과

Table 1. Hydrologic description of rain events sampled in 2008.

Event (date)	Rainfall depth (mm)	Duration (hr)	Mean rainfall intensity (mm/hr)	Total rainfall volume (m ³)	Total runoff volume (m ³)	R.Coe.	ADD
Event 1 (18, Jun.)	46.0	21	2.2	29.0	0.16	0.01	9
Event 2 (28, Jun.)	38.4	17	2.3	24.3	0.31	0.01	6
Event 3 (19, Jul.)	24.0	4.4	5.5	15.2	0.47	0.03	1
Event 4 (19, Jul.)	31.8	1.8	18	20.1	2.30	0.11	0
Event 5 (25, Jul.)	77.4	20	3.9	48.9	19.0	0.39	0
Event 6 (12, Aug.)	32.8	5.7	5.7	20.7	5.92	0.29	2
Event 7 (15, Aug.)	32.8	8.1	4.0	20.7	3.97	0.19	1
Event 8 (18, Aug.)	13.8	3.2	4.3	8.71	4.27	0.49	0
Event 9 (22, Aug.)	10.6	5.5	1.9	6.69	0.66	0.10	1

Where R.Coe. : runoff coefficient (-)
 ADD : antecedent dry day (day)

유출량과의 상관성은 상관계수 $r=0.92$ 로 나타났다. 따라서 유출량에 미치는 영향은 선행무강우일수가 지배적임을 알 수 있다.

다음으로 유출량과 유출계수의 특성을 검토하기 위해 상관성을 조사한 결과, 총 9회의 Event를 대상으로 하였을 경우에는 상관계수 $r=0.74$ 로 나타났으나, Event 8을 제외한 경우에는 상관계수 $r=0.90$ 으로 매우 양호한 관계로 나타났다. 이것은 Fig. 1에 나타난 Event 8에 대한 강우발생과 유출특성에 의한 결과로 해석 할 수 있다. Event 8과 유사한 강우량을 보이는 Event 9와 비교하여 유출수 발생 특성을 살펴보면, Event 9와는 달리 Event 8의 경우에는 강우에 의한 유출수가 발생하기 직전의 강

우강도가 0.4 mm/min 이상에 해당하는 시간이 13분 이상 지속되었기 때문에 강우량 대비 유출량이 상대적으로 많았던 것으로 해석된다.

유출수와 오염물질 발생 거동

총 9회의 강우사상에서 얻은 시료를 분석하여 유출시간 경과에 따른 유출수의 발생량과 TSS, BOD, COD, TN 및 TP 등과 같은 오염물질의 발생량에 대한 거동을 고찰하였다. 9개의 강우사상에서 유사한 경향이 나타났고, 이 중에서 Event 2(강우량 38.4 mm, 총유출량 0.31 m³)와 Event 5(강우량 77.4 mm, 총유출량 19.02 m³)의 분석결과를 Fig. 2에 나타냈다. 유출수의 발생량과 오염물질의

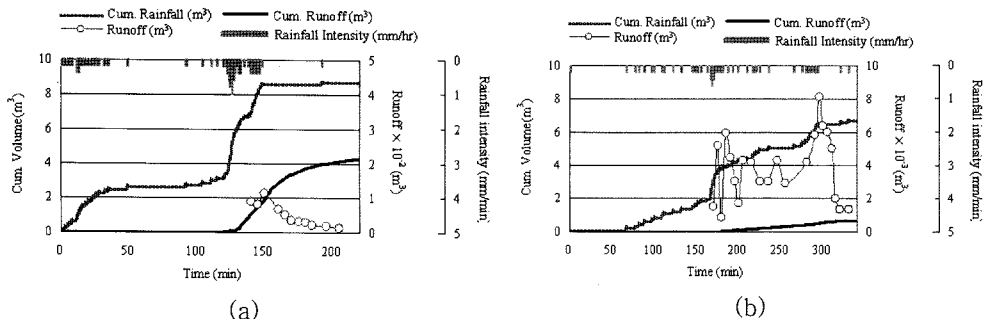


Fig. 1. Rainfall and runoff in the case of event 8(a) and event 9(b).

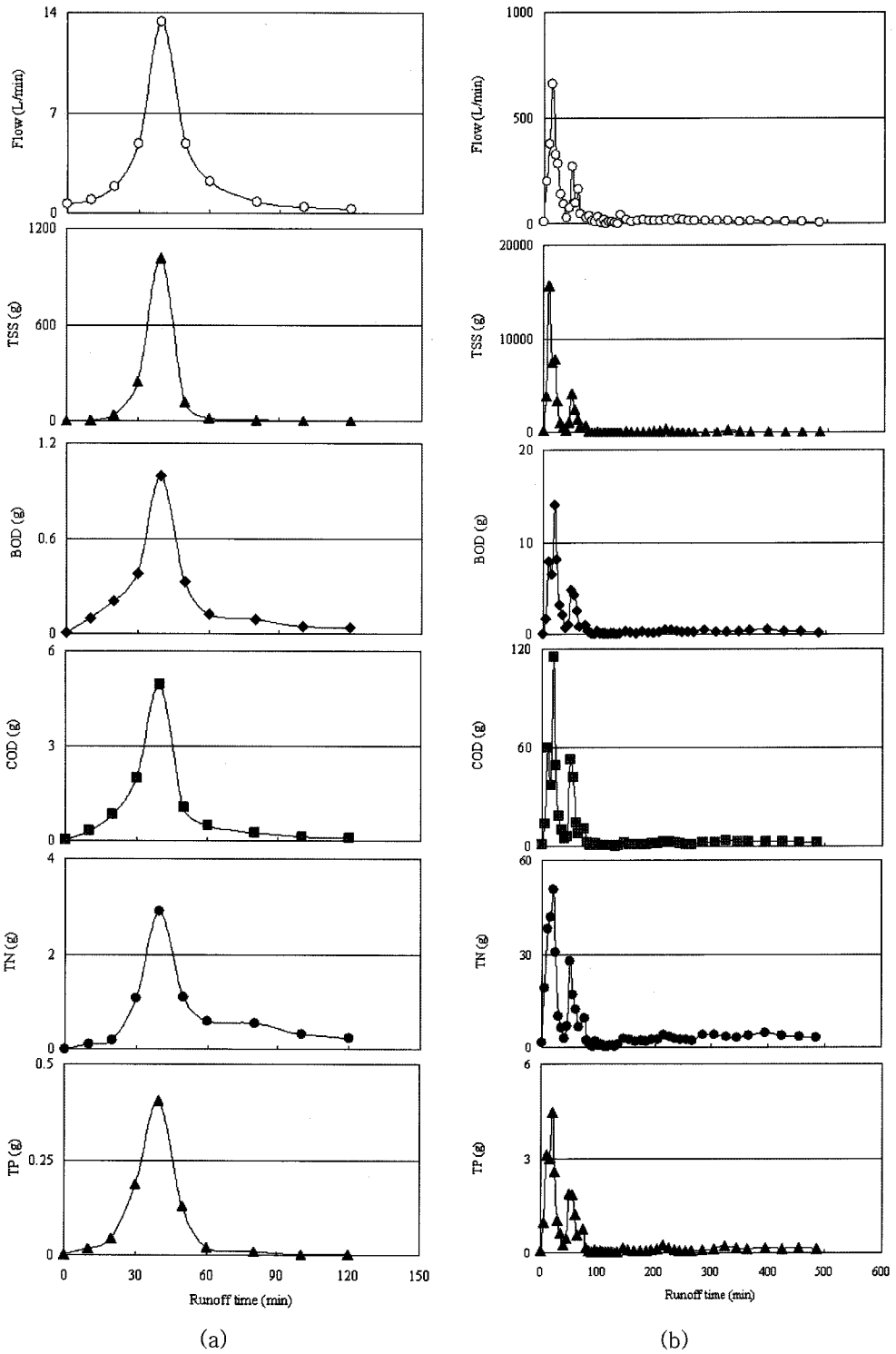


Fig. 2. Loading patterns of runoff volume and pollutants such as TSS, BOD, COD, TN and TP with runoff time. (a) event 2, (b) event 5.

발생량은 유출량의 증가와 저감에 따라 매우 유사한 경향을 보였으며, 이는 유출수발생량에 대한 정확한 자료 구축이 오염물질 발생량을 추정하는데 가장 중요한 요소임을 알 수 있게 한다.

오염물질부하특성

각 강우사상에서 발생한 오염물질의 유량가중평균농도(EMCs)와 총부하질량(TPM)을 Table 2에 나타내었다. 9일과 6일로 선행무강우일수가 비교적 길었던 Event 1과 Event 2에서 거의 모든 오염물질의 EMCs가 높은 값으로 검출되었다. 특히 TSS, TN과 TP의 경우에는 매우 많은 강우량(77.4 mm)과 높은 유출계수(0.39)의 특성을 지닌 Event 5의 경우보다 TSS는 150%, BOD는 206%, COD

는 123%, TN은 122%, TP는 194% 이상 높은 값으로 조사되었다. 이것은 무강우일수의 영향으로 초기강우에 의해 건조된 재배지의 토양에서 유출되었기 때문이다.

또한 Fig. 3에는 유출량과 각 오염물질의 총부하질량과의 관계를 나타내었는데, BOD, COD, TN, TP 등의 오염물질부하에 미치는 유출량의 상관은 상관계수 0.96 이상으로 매우 높게 나타났다. Fig. 3에는 나타내지 않았으나 유출량과 TSS 총부하질량과의 상관계수 역시 0.95로 매우 양호한 관계를 나타내었다.

질소화합물 거동

질산성질소를 비롯한 질소화합물은 농촌지역에서 발생하는 오염물질 중에서 매우 중요한 물질이다. 아질산성

Table 2. Characteristics of EMCs and TPM of pollutants.

Event (date)	EMCs (mg/L)					TPM (g)				
	TSS	BOD	COD	TN	TP	TSS	BOD	COD	TN	TP
Event 1 (18, Jun.)	781.91	1.00	3.70	3.80	0.30	4751.2	6.10	22.5	23.1	1.85
Event 2 (28, Jun.)	1451.3	2.29	10.0	7.09	0.82	4703.7	7.42	32.6	23.0	2.66
Event 3 (19, Jul.)	521.20	1.44	6.34	2.79	0.38	1108.9	3.06	13.5	5.93	0.80
Event 4 (19, Jul.)	6672.8	7.81	49.9	22.4	3.06	2901.2	3.40	21.7	9.75	1.33
Event 5 (25, Jul.)	51756	68.0	504	359	26.1	2721.1	3.57	26.5	18.9	1.37
Event 6 (12, Aug.)	5843.0	26.0	233	44.0	7.83	987.52	4.39	39.3	7.43	1.32
Event 7 (15, Aug.)	720.44	15.7	61.2	10.5	2.17	181.47	3.70	15.4	2.65	0.55
Event 8 (18, Aug.)	1690.8	19.9	12.0	12.9	3.12	395.96	4.66	2.81	3.01	0.73
Event 9 (22, Aug.)	84.303	3.16	13.4	2.18	0.49	127.73	4.78	20.3	3.30	0.75

Where, EMCs (Event mean concentrations)

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t Q_t C_t dt}{\int_0^t Q_t dt} = \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t}$$

- M: the total mass of pollutants over the entire event duration (g)
- V: the total volume of flow over the entire event duration (m³)
- t: time (min)
- C_t: the concentration of pollutant (mg/L)
- Q_t: the variable flow (m³/min)
- Δ_t: a discrete time interval (min)

TPM (Total pollutant mass) = EMCs × V

EMCs: Event mean concentrations (mg/L)

V: the total volume of flow over the entire event duration (m³)

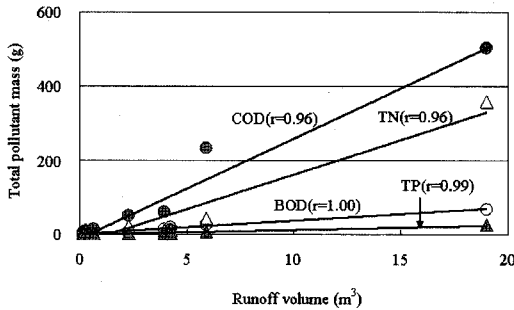


Fig. 3. Relationship between runoff volume and total pollutant mass.

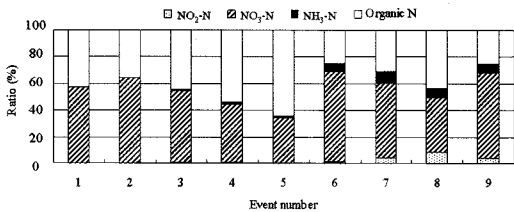


Fig. 4. Ratio of Nitrogen compounds.

질소, 질산성질소, 암모니아성질소 및 유기성질소로 유출수의 질소화합물에 대한 분석결과를 각 강우사상으로 구분하여 Fig. 4에 나타내었다. 농경지 유출에 의한 질소성분 중에서 질산성질소가 이동성이 큰 것으로 보고된 연구결과(이치타오 등, 2008; Meea Kang et al., 2009)와 유사한 결과를 얻을 수 있었는데, 이동성이 비교적 큰 질산성질소는 적게는 30%에서 많게는 70%에 이르는 비율로 유출되었다. 특히 선행무강우일수가 9일과 6일로 비교적 길었던 Event 1과 Event 2에서 질산성질소 비율이 60%에 해당하였고, 선행무강우일수가 2일인 Event 6에서도 질산성질소 비율이 전체의 약 70%를 차지하였다. 이것은 선행무강우 기간동안 토양표면에 흡착되어 있던 질소화합물들이 질산성질소 형태로 전환되어 있게 되고, 유출이 발생되면서 일시에 이동하게 되었기 때문일 것으로 판단된다.

결론

수질을 개선하거나 좋은 수질을 보전하기 위한 여러 방법 중에서 점오염원에 의한 제어기술은 충분히 검토되고 실행되고 있다. 따라서 향후의 수질에 관한 문제는 비점오염원의 관리의 적정성과 효율성에 의존한다는 사실에는 이견이 없다. 본 연구에서 수행한 단위 재배지는 고구마 재배지를 대상으로 하였으나, 한국의 밭 이용 특성을 보면

현재 다른 작물을 재배하는 경우와 하더라도 수년 내에 고구마와 같은 작물을 재배할 가능성을 배제할 수 없으므로 본 연구에서 얻은 자료는 비점오염원 중에서 밭경작과 기타재배경작으로 분류되는 비점오염원 관리를 위한 자료로 유효할 것이다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 조사대상지에서 발생하는 유출량은 강우량에 비례관계는 상관계수 0.74이며, 선행무강우일수가 상대적으로 긴 (9일, 6일) 경우를 제외하면 상관계수가 0.90으로 증가하였다. 따라서 선행무강우일수가 유출량에 미치는 주요인자로 판단할 수 있다.
- (2) 유출계수에 미치는 강우사상의 특성을 보면 유출수가 발생하기 직전의 강우패턴, 그 중에서도 강우강도가 직접적인 영향요소로 나타났다.
- (3) 강우사상별 유출량 발생은 유출수에 의한 오염물질 (TSS, BOD, COD, TN 및 TP)들의 발생량과 유사한 경향을 나타내었으며 이는 유출수 발생에 미치는 영향인자들을 구축할 수 있는 연구의 필요성을 강조하게 한다.
- (4) 오염물질의 총량으로 보면, 선행무강우일수가 2일 이상인 경우에 유출계수가 높아지므로 오염부하량 산정을 위한 유출계수를 구할 때에는 선행무강우일수에 대한 분석이 요구됨을 알 수 있다.
- (5) 고구마재배지에 의해 발생하는 질산성질소 부하는 인근 지하수와 표류수 등의 수질오염과 직결되므로 시비 등의 일정은 선행무강우일수를 고려하여 실행 한다면, 비점오염원에 의한 오염부하량을 저감할 수 있는 방법이 된다.

사사

이 연구는 낙동강수계관리위원회 “주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법 연구”의 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌

국립환경과학원, 1997, 하천·호수의 수질보전과 유역관리에 관한 한·일 공동세미나.
 김진호, 한국현, 이종식, 2008, 농촌유역의 강우사상별 농업 비점원오염물질 유출특성, 한국물환경학회지, 24(1), 69-77.
 이치타오, 히진규, 김영철, 2008, 농촌지역에서 유출시간에 따른 비점오염물질의 유출평가, 24(6), 773-783.
 Dabrowski, J. M., Murray, K., Ashton, P. J., and Leaner, J. J., 2009, Agricultural impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions, Ecological Economics, 68, 1074-1082.

- Mahdi Gheysari, Seyed Majid Mirlatifi, Mehdi Homaei, Mohammad Esmail Asadi, Gerrit Hoogenboom, 2009, Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates, *Agricultural Water Management*, 96, 946-954.
- Meea Kang, Soo-Hyun Jo, Byoung-Woo Choi, Jae-Kwan Lee, 2009, Nitrate management from non-point source (Case study : Sweet potato plot), *Conference on World City Water Forum 2009*, 223.
- Sharpley, A. N., McDowell, R. W., and Kleinman, P. J. A., 2001, Phosphorous loss from land to water:intergrating agricultural and environmental management, *Plant Soil*, 237, 287-307.
- Qadir, M., Boers, T.M., Schubert, S., Ghafoor, A., and Murtaza, G., 2003, *Agricultural water management in water-starved countries:challenges and opportunities*, *Agricultural Water Management*, 62, 165-185.

최병우

안동대학교 환경공학과
 경북 안동시 송천동 388
 TEL: 054-820-6267
 FAX: 054-820-6267
 e-mail: luki21@hanmail.net

윤영삼

국립환경과학원 낙동강물환경연구소
 경북 고령군 다산면 평리 239-3
 TEL: 054-950-9711
 FAX: 054-950-9737
 e-mail: ysyoon3sf@korea.kr

2009년 8월 2일 원고접수, 2009년 9월 17일 게재승인

강미아

안동대학교 환경공학과
 경북 안동시 송천동 388
 TEL: 054-820-6267
 FAX: 054-820-6267
 e-mail: wdream@andong.ac.kr

조수현

안동대학교 환경공학과
 경북 안동시 송천동 388
 TEL: 054-820-6267
 FAX: 054-820-6267
 e-mail: eratosh@hanmail.net

이재관

국립환경과학원 낙동강물환경연구소
 경북 고령군 다산면 평리 239-3
 TEL: 054-956-9700
 FAX: 054-956-9707
 e-mail: jkleenier@korea.kr