



식생발두령과 실트펜스를 이용한 밭 비점오염 저감효과 평가

Evaluation for Non-Point Sources Reduction Effect by Vegetated Ridge and Silt Fence

김동현* · 김상민*,†

Kim, Dong-Hyeon · Kim, Sang-Min

Abstract

The objective of this study was to test the non-point source pollution (NPS) control by the vegetated ridge and silt fence through field monitoring. The experiment plots were established with three sizes which are 5 m width by 22 m length with 8 %, 3 % slope and 15 m width by 15 m length with 6 % slope. Flumes with the floating type stage gages were installed at the outlet of each plot to monitor the runoff. For a rainfall monitoring, tipping bucket rain gage was installed within the experiment site. Water quality samples were monitored during the heavy rainfall occurred. The amount of rainfall from 4 monitored events ranged from 27.6 mm to 130 mm. The runoff reduction rate could vary depending on slope, soil, crop growth condition, rainfall amount, rainfall intensity, antecedent moisture condition, and many other factors. The runoff from vegetated ridge and silt fence treatment plots was 24.05 % and -8.28 % lower than that from control plot, respectively. The monitoring results showed that the average pollution loads reduced by vegetated ridge compared to control were BOD 36.62~53.60 %, SS 40.41~73.71 %, COD 39.34~56.41 %, DOC 49.08~53.67 %, TN 26.74~67.23 %, and TP 52.72~91.80 %; by silt fence compared to control were SS 41.73 %, COD 1.93 %, and TN 2.38 %. The paired t-test result indicated that the vegetated ridge and silt fence were statistically significant effect in SS load reduction, with a 5 % significant level. Monitored results indicated that vegetated ridge and silt fence were both effective to reduce the pollutant from the field surface runoff.

Keywords: Non-point source pollution (NPS); vegetated ridge; silt fence; rainfall runoff; best management practices (BMPs)

1. 서 론

점오염원은 특정한 지역으로부터 오염원이 배출되고 이를 오염총량제 등을 통해 관리할 수 있는 반면에 비점오염은 강우시 불특정한 지역으로부터 오염물질이 배출되기 때문에 처리 및 관리가 어려운 오염원이다(Kim and Geun, 2014). 농촌 지역의 경우 밭이나 논에서 사용되는 농약, 비료에 포함된 질소, 인 등이 대표적인 비점오염원으로서 강우에 의해 유출되어 하천 및 호소로 유입시 수질을 악화시키게 된다(MOE, 2008). 특히 새만금 유역의 경우 농경지 비율이 높고 하천(만경강, 동진강) 중하류부에 위치한 대규모 평야지로서 강우시 발생하는 비점오염원의 양이 전체 오염부하의 약 40~60 %의 수준으로 큰 비중을 차지하고 있어 비점오염의 적절한 제어 대책이 필요한 지역이다(Kim et al., 2014). 따라서 농경지에서 발생하는 비점오염원에 대한 처리와 관리를 위해 최적관리기법(Best Management Practices, BMPs)을 개발하여 비

점오염원을 관리하고 하천 및 호소의 수질을 보호하기 위해 비점오염원의 유입을 제어할 필요성이 있다.

농경지에서 발생하는 비점오염원을 저감시키고 다양한 최적관리기법을 개발 또는 이용하여 제어대책을 마련하기 위해 여러 연구가 진행되고 있다. Won et al. (2014)은 강원지역에서 고랭지의 실 경작지를 대상으로 벧짚거적과 토양개량제 기법을 사용하여 강우유출수량과 비점오염부하의 저감 그리고 생산성에 미치는 영향을 분석하였다. 대조구와 비교하여 벧짚거적과 토양개량제 기법을 사용하였을 때 강우유출율의 경우 29.4 %가 저감되었으며, 오염부하량의 경우 SS, T-N, T-P 등이 최소 34.7 %에서 최대 86.5 %까지 저감되는 효과를 확인하였다. Choi and Jang (2014)은 우리나라 밭경지 특성에 적합한 초생대 설계에 필요한 기초자료를 제공하고자 경북 군위군에서 현장실험을 통해 다양한 초종(췌파, 피, 바랭이, 잔디, 톨페스큐 그리고 켄터키블루그라스)의 초생대를 적용하여 대부분 인공강우를 통해 실험을 수행하였다. 대조구와 비교하여 초생대를 적용하였을 때 평균 유출 저감효과는 6.1~77.8 %였으며, 오염부하량 저감효과는 TS 15.6~90.3%, T-N 6.7~91.1% 그리고 T-P 49.9~96.6%의 저감효과를 나타내었다. 전반적으로 비점오염 저감효과가 좋은 초종은 잔디, 켄터키블루그라스, 톨페스큐, 바랭이, 피 그리고 췌파 순으로 저감효과가 나타내는 것을 확인하였다. Gogo-Abite et al.

* Dept. of Agricultural Engineering, Gyeongsang National University

† Corresponding author

Tel.: +82-55-772-1931 Fax: +82-55-772-1939

E-mail: smkim@gnu.ac.kr

Received: July 2, 2015

Revised: September 22, 2015

Accepted: September 23, 2015

(2013)은 경사도 조절이 가능한 유압식 베드를 이용하여 본 연구의 저감기법과 동일한 실트펜스의 탁수 저감효과를 평가하였으며, 실트펜스의 종류에 따른 탁수 저감의 차이가 있는 것을 확인하였다. 직물필터보다는 부직포필터의 저감효과가 더 높은 것으로 나타났으며, 직물필터의 경우 경사도 10 %, 25 %에서 14~52 %의 평균 퇴적물 농도 제거 효율이 있는 것으로 나타났다.

이러한 농경지를 대상으로 비점오염을 저감시키기 위한 연구뿐만 아니라 도시지역을 대상으로 비점오염의 유출특성 및 제어대책을 마련하기 위해 다양한 비점오염 저감기법이 연구되고 있다. Chung et al. (2014)은 남양주시 월문천에 설치된 저류지, 인공습지를 통해 비점오염 저감효과 모니터링을 수행하였다. EMC 산정을 통한 수질 저감효과는 BOD 76.10 %, COD 73.53 %, SS 83.74 %, T-N 50.30 % 그리고 T-P 59.82 %로 나타났다. Koo et al. (2014)은 도시유역의 비점오염 저감 방안을 마련하기 위해 LID 기법을 적용하여 실험 장치를 제작하고 투수성 포장의 효과를 분석을 하였다. 강우 발생시 대학교 내에 인도 및 주차장과 실험장치인 투수성 포장의 초기 유출수를 채수하여 실험한 결과 투수성 포장의 유출수가 인도, 주차장의 유출수의 비해 BOD 60 %, TSS 60.43 %, T-N 87.73 % 그리고 T-P 26.84 %의 저감효과가 나타났다.

한편, 선행 연구에서는 식생발두렁과 실트펜스의 적용성 및 비점오염 저감효과를 평가한 바 있다. Kim et al. (2012)이 사천지역의 시험포장을 대상으로 2011년 경작기간 중 유출이 발생한 3회의 강우사상에 대하여 강우가 클수록 각 시험구의 유출량이 증가하는 것으로 나타났으며, 110 mm의 강우사상보다 345 mm의 강우사상에서 오염부하량 저감율이 감소하는 것으로 나타났다. 오염부하량 산정결과 대조구 대비 실트펜스에서 BOD 52.1 %, COD 36.1 %, SS 75.3 %, TOC 35.0 %, T-N 40.9 % 그리고 T-P 56.6 %의 저감효과가 나타났고, 식생발두렁에서는 BOD 67.1 %, COD 46.6 %, SS 65.3 %, TOC 43.4 %, T-N 81.8 % 그리고 T-P 54.3 %의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. Kim et al. (2014)은 익산지역의 시험포장을 대상으로 2013년 경작기간 중 유출이 발생한 2회의 강우사상은 각각 강우량이 103.6 mm, 78.4 mm이며, 단 2회이기 때문에 유출량을 비교하기에는 강우사상의 횟수가 적었다. EMC를 산정한 결과 대조구 대비 실트펜스에서 SS 70.7 %, T-N 61.4 %, NO₃ 62.3 % 그리고 Turbidity 31.6 %로 나타났고, 식생발두렁에서는 SS 20.1 %, Turbidity 39.6 %, NH₄ 30.3 %로 나타났다.

본 연구에서는 다양한 비점오염 저감기법 중 식생발두렁과 실트펜스를 적용하여 2014년에 익산과 사천지역의 시험

포장을 설치하고 농경지(밭)에서 발생하는 강우유출수를 모니터링하였다. 수집된 유출수는 수질분석을 통해 EMC와 오염부하량을 산정하고 식생발두렁과 실트펜스 저감기법의 정량적인 결과를 분석하여 시험포장의 크기, 경사, 강우량, 강우강도 그리고 저감기법에 따른 오염부하 저감율을 산정하고 비교·분석하여 고찰하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 시험포장 조성 및 모니터링

시험포장의 선정은 토지이용, 접근성, 포장면적, 주변환경, 유출특성 분석이 용이한 지점을 선정하여 조성하였으며, 익산의 경우 새만금 유역에 해당하며 앞에 서론에서 언급하였듯이 비점오염의 적절한 제어대책이 필요한 지역이다. 사천의 경우 본 연구실에 가까운 장점이 있으며 선행연구에서 새만금 유역의 식생발두렁 및 실트펜스를 적용하기 위해 시범 적용한 지역이다.

Fig. 1은 전라북도 익산시 금마면 동고도리 1073-9번지 일대로 밭경지 3,750 m²를 사용한 시험포장 조성도를 나타내고 있으며, 2013년 선행연구(Kim et al., 2014)에서 설치된 시험포장을 정비하였다. 각 시험구는 세로 22 m, 가로 5 m, 경사 8 %, 포장간 거리 1 m의 규모로 대조구 1개, 식생발두렁 2개를 조성하고, 가로 15 m, 세로 15 m, 경사 6 %, 포장간 거리 1 m의 규모로 대조구 1개, 식생발두렁 1개를 조성하였다. 무경운으로 시험포장을 설치하였으며, 작물은 콩(메주콩)을 파종하였다.

Fig. 2는 경상남도 사천시 용현면 선진리 355-5번지 일대를 사용한 시험포장 조성도를 나타내고 있으며, 2010~2012년에 비점오염 저감효과 평가 선행연구(Kim et al., 2012)를 시행한 지역으로 시험포 3개를 재채량 및 구축하였다. 경운으로 이랑, 고랑을 내어 시험포장을 설치하였으며, 각 시험포는 세로 22 m, 가로 5 m, 경사 3 %로 포장간 거리는 이랑 위에 슬레이트 골을 설치함으로써 각 시험구를 경계를 하고 대조구 1개, 식생발두렁 1개, 실트펜스 1개를 조성하였다. 작물은 익산지역과 동일하게 콩(메주콩)을 파종하였다.

강우시 각 시험구에서 발생하는 유출수를 모니터링하고 채취하기 위해 플룸, 자동시료채수기, 부자식 수위계, 자기유량계 등을 설치하였다(Fig. 3). 강우시 발생하는 지표유출수가 플룸을 통과하여 유출되는 유출수를 샘플링 하였으며, 직접채수를 이용하여 30분~2시간 간격으로 채취하였다. 유출수는 무균채수병에 1L를 채취하였으며, 시료는 현장작업 여건상 냉장보관이 어렵기 때문에 스티로폼 박스에 보관하고

강우사상이 끝나는 시점에서 모니터링을 종료하고 인근 우체국을 통해 서울대학교 농생명과학공동기기원 (National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)으로 보내었다. 본 연구에서는 pH, BOD, COD, DO, SS, DOC, Turbidity, T-N, T-P, NO₃, NH₄ 및 PO₄-P 총 12개 수질항목의 분석을 의뢰하였으며, 이 중 BOD, COD, SS,

T-N 그리고 T-P 항목을 사용하였다. 유량 측정은 플룸과 부자식수위계를 실내에 설치하여 실험을 통해 수위-유량 관계 곡선식을 도출하고 이 식을 통해 유량을 산정하였다.

$$Y = 149.22x^4 - 10.999x^3 + 0.4442x^2 + 0.002x$$

$$R^2 = 0.9989 \quad (1)$$

2. 비점오염 저감기법

본 연구에서는 비점오염 저감기법으로 식생발두령과 실트펜스를 사용하였다. 강우시 경작지 상단에서 하단으로 지표 유출이 발생될 때 빠른 유속으로 토양침식을 일으키게 되며 지속되는 강우로 인해 토양유실량이 상부에서 하부로 갈수록 증가하게 된다. 이러한 유속증가 및 유량을 감소시키고 토양 유실량 저감을 위한 저감기법은 밭 중간에 식생발두령과 실트펜스를 설치한 시설이다 (Fig. 4). 식생발두령은 모래주머니를 설치하였으며, 실트펜스는 합성 식물 필터를 지지대에 연결하여 설치하였다. 실트펜스는 일반적으로 건설공사장에서 흙수유출이 발생할 때 인접한 하천, 호소 등의 오염물질 유입을 방지하기 위한 시설로 사용 된다 (Kim et al., 2014).

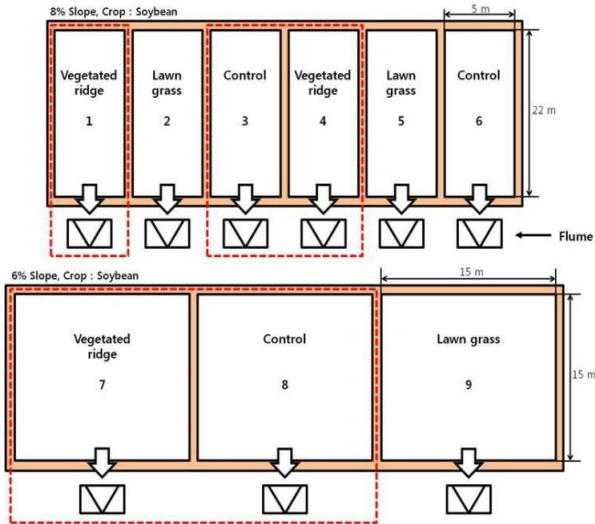


Fig. 1 Schematic view of experimental plot in Iksan

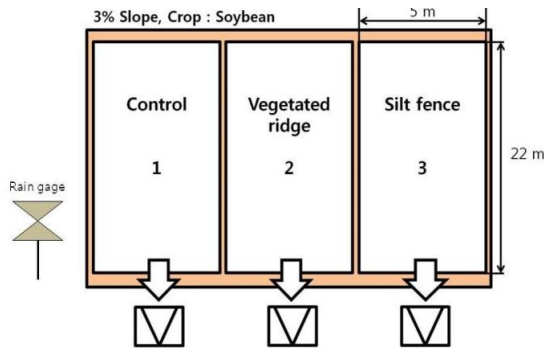


Fig. 2 Schematic view of experimental plot in Sacheon

3. EMC 및 오염부하량 분석방법

각 시험구에서 발생하는 강우유출수를 채취하여 분석된 수질농도 결과는 유출량을 고려한 유량가중평균농도 (Event Mean Concentration, EMC)를 산정하여 대조구와 관리기법을 비교하였다 (Kim et al., 2014). 강우-유출 관계에 따라 강우량이 증가할수록 유출량은 증가하게 되며, 유출량에 따라 배출되는 오염량에도 차이가 나타난다. 따라서 각 시험구에서 발생하는 유출량을 고려하여 수질샘플링 시점의 유량을 가중치로 설정하고 평균수질농도를 산정하였다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\int_0^n Q(i) \times C(i) di}{\int_0^n Q(i) di} \quad (2)$$



Fig. 3 Installed monitoring equipments (flume, water gage, rain gage)



Fig. 4 Installed silt fence (left) and vegetated ridge (right)

여기서, $Q(i)$ 는 i 번째 유출수 샘플링 시점의 유량 (m^3), $C(i)$ 는 i 번째 유출수의 분석된 수질항목농도 (mg/L), n 은 각 강우사상마다 분석된 시료의 개수이다.

하지만 밭에서 배출되는 비점오염의 경우 배출 시기나 형태에 따라 일정하지 않다. 따라서 한 강우사상에서 배출되는 오염물질의 총량을 측정하기 위해 플룸으로부터 직접유출되는 수위를 유량으로 산정한 유량자료와 수질자료를 이용하여 오염 부하량을 산출하여 비교 분석하였다 (Kim et al., 2014). 오염원단위는 강우사상 1회를 기준으로 하여 단위당 오염물질 부하량을 표시하였다.

$$Pollutant\ mass\ loading(kg/event) = \int_0^t C(t) \cdot Q(t) dt \quad (3)$$

여기서, $C(t)$ 는 t 시간동안 배출된 유출수의 수질농도, $Q(t)$ 는 t 시간동안 플룸을 통해 유출된 유량이다. 오염부하량 산정시 각 시험구의 유출수 샘플링은 1 L로 동일하지만 오염물질 배출의 경우 시험구 크기, 경사 그리고 강우량에 따른 차이를 고려하여 시험구별로 오염부하량을 산정하였다.

4. 통계 분석방법

대조구와 식생발두렁, 실트펜스 시험구의 오염부하량 데이터를 통계적 유의미가 있는지 판별하기 위하여 통계분석 프로그램 (IBM SPSS Statistics ver.20)을 통해 대응표본 t-검정을 실시하였다. 대응표본 t-검정은 대응되는 두 변수의 평균을 비교하는 것으로서 본 연구에서는 대조구와 저감기법을 적용한 식생발두렁, 실트펜스 시험구의 각 사상별 오염부하량 익산과 사천 두 지역 (경운과 무경운, 경사도의 차이 등)을 고려하여 데이터를 종합하고, 비점오염 저감효과에 대한 유의성을 목적으로 분석하였다. 대조구와 저감기법 사이에서

오염부하량의 차이를 통계적 유의성을 검증하고 각 오염부하량 데이터의 평균, 표준편차, 표준오차 그리고 변수사이의 상관관계를 비교하고 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우유출수 조사

Table 1에서는 익산과 사천의 모니터링기간 동안 유출수 샘플링을 실시한 날의 강우량, 유출량, 유출율, 그리고 유출량 저감율을 나타내고 있다. 여기서 유출량은 부자식 수위계로부터 얻은 수위자료를 수위-유량 곡선식을 통해 유량을 산정하였으며, 유량 데이터는 각 시험구의 면적으로 나누고 단위를 mm로 변환하였다. 강우유출수 조사는 총 4회이며, 평균 강수량이 78.7 mm이고 유출수 샘플링은 총 112점이다.

사천 시험포장에서 7월 18일과 8월 2~3일의 강우사상을 비교해보면 강우강도의 차이는 없으나 8월 2~3일에 강우량이 많고 지속시간이 길게 나타났다. 유출량 저감율은 7월 18일에 상대적으로 유출량 저감율이 크게 나타났으며, 강우량이 많고 지속시간이 길면 유출량 저감율은 감소하는 것으로 나타났다. 7월 18일에 실트펜스 시험구의 경우 야간작업으로 시야확보가 어려웠으며, 유출수를 수집하는 과정에서 플룸 주변에 있던 토사 유입을 방지하지 못하여 수질농도가 대조구 시험구보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

익산 시험포장에서 8월 17~18일과 8월 25일의 강우사상을 비교해보면 8월 25일에 상대적으로 강우량과 강우강도가 크게 나타났으며, 지속시간은 짧게 나타났다. 유출량 저감율은 8월 25일에 상대적으로 적게 나타났으며, 6% 경사도 밭에서는 큰 차이 없이 근소하게 감소(-14.82%)하였지만, 8% 경사도 밭에서는 유출량 저감율이 큰 차이로 감소(-62.72%, -50.48%)하였다. 이는 경사도가 클수록 유출량 저감율이 감

Table 1 Summary of runoff characteristics by storm events (2014)

Date	Fields	Rainfall	Rainfall intensity	Duration (hr)	Number of sampling	BMPs	Runoff (mm)	Runoff ratio	Depth of runoff (mm)	Reduction rate (%)
18 Jul	Sacheon, slope: 3%, Area: 110 m ²	27.6	2.76 (*8.4)	10	6	Control	1,202	0.396	10,925	-
					5	Vegetated ridge	0,680	0.224	6,182	43.42
					6	Silt fence	1,693	0.558	15,394	-40.90
2-3 Aug		91.6	3.66 (*9.6)	25	20	Control	6,255	0.621	56,866	-
					18	Vegetated ridge	4,993	0.496	45,389	20.18
					19	Silt fence	4,733	0.470	43,027	24.34
17-18 Aug	Iksan, slope: 6%, Area: 225 m ²	65.6	3.12 (*12.8)	21	2 (#8)	Control	0,534	0.036	2,375	-
2 (#7)					Vegetated ridge	0,376	0.025	1,670	29.69	
25 Aug					130	10 (*32.6)	13	2 (#8)	Control	3,552
	2 (#7)	Vegetated ridge	2,653	0.091				11,792	25.29	
17-18 Aug	Iksan, slope: 8%, Area: 110 m ²	65.6	3.12 (*12.8)	21	7 (#4)	Control	1,793	0.248	16,296	-
					7 (#1)	Vegetated ridge	1,297	0.180	11,793	27.63
					7 (#3)	Vegetated ridge	1,362	0.189	12,383	24.01
25 Aug		130	10 (*32.6)	13	3 (#4)	Control	6,906	0.483	62,778	-
					3 (#1)	Vegetated ridge	6,194	0.433	56,311	10.30
					3 (#3)	Vegetated ridge	6,084	0.425	55,311	11.89

*: Maximum rainfall intensity
#: Experimental plot number

소하는 것을 나타낸다.

평균 유출량 저감율은 식생발두렁이 24.05 %이고 실트펜스는 -8.28 %로 나타났으며, 실트펜스의 경우 7월 18일을 제외한 유출량 저감율은 24.34 %이다. 사천 시험포장과 익산 시험포장의 유출량을 비교해보면 사천 시험포장에서 유출량 저감율은 크게 나타났으나, 경사도, 강우량, 강우강도가 적은 사천 시험포장에서 유출되는 양이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 시험포장 조성시 경운과 무경운의 차이로 판단되며, 경운이 된 밭보다 무경운이 된 밭에서 유출량 저감효과가 더 좋은 것으로 판단된다. 또한 Lee et al. (2015)도 경사도에 따른 경운과 무경운 밭에서의 유출량 비교결과에서도 무경운 밭에서 유출량 저감효과가 큰 것을 확인한 바 있다.

Fig. 5에서는 강우사상에 대한 강우량, 지속시간, 유출수 샘플링 그리고 각 시험구의 유출량을 나타내고 있다. 유출량 수문곡선의 경우 누적곡선으로 나타나지 않는데 이는 유출이 발생하였을 때 부자가 설치된 플룸 내부에 저류되고 유출량 만큼 저류하는 수위가 높아진다. 하지만 플룸 내부 용량은 한계가 있기 때문에 플룸 내부 용량이 채워지게 되면 강우 지속 시간 동안 플룸을 통과하여 유출되는 유출수 높이만큼의 수위만 계측된다. 이에 따라 유출량의 미세한 변동에도 0.04~0.06 mm 정도 수위변화가 발생하기 때문에 유출량 수문곡선이 누적곡선으로 나타나지 않았다.

강우- 유출 관계에서는 7월 18일과 8월 2~3일의 경우 강우발생 후 지체없이 유출이 발생하였으나, 8월 17~18일과 8월 25일의 경우 이전 강우사상보다 강우량이 더 크게 발생하였는데도 강우발생 이후로부터 2~3시간 정도의 지체시간이 있었다. 이는 (c), (d)의 경우 익산지역의 무경운 밭으로서 사천지역의 경운이 된 밭보다 유출발생이 느리게 나타나는 것으로 판단된다.

2. EMC 산정 결과

Table 2, 3에서는 익산 시험포장 및 사천 시험포장의 대조구, 식생발두렁, 그리고 실트펜스의 평균 EMC 및 저감기법 시험구의 EMC 저감율 결과를 나타내고 있다. 저감율은 각 상별 시험구의 EMC를 평균하여 산정하였다. 대조구 대비 식생발두렁에서는 BOD 5.73~33.45 %, SS 45.71~59.80 %, COD 7.55~37.24 %, DOC 18.10~39.50 %, TN 36.01~52.47 %, 그리고 TP 42.53~83.44 %의 저감효과가 나타났다. 실트펜스에서는 SS 37.31 TN 3.65 %, 그리고 TP 9.27 %의 저감효과만 나타났으며, 이는 앞에서 언급하였듯이 7월 18일에 야간작업으로 인해 유출수를 수집하는 과정에서 오류로 인해 수질농도가 대조구 시험구보다 높게 나타나 EMC 산정에서도 영향을 미친 것으로 판단된다.

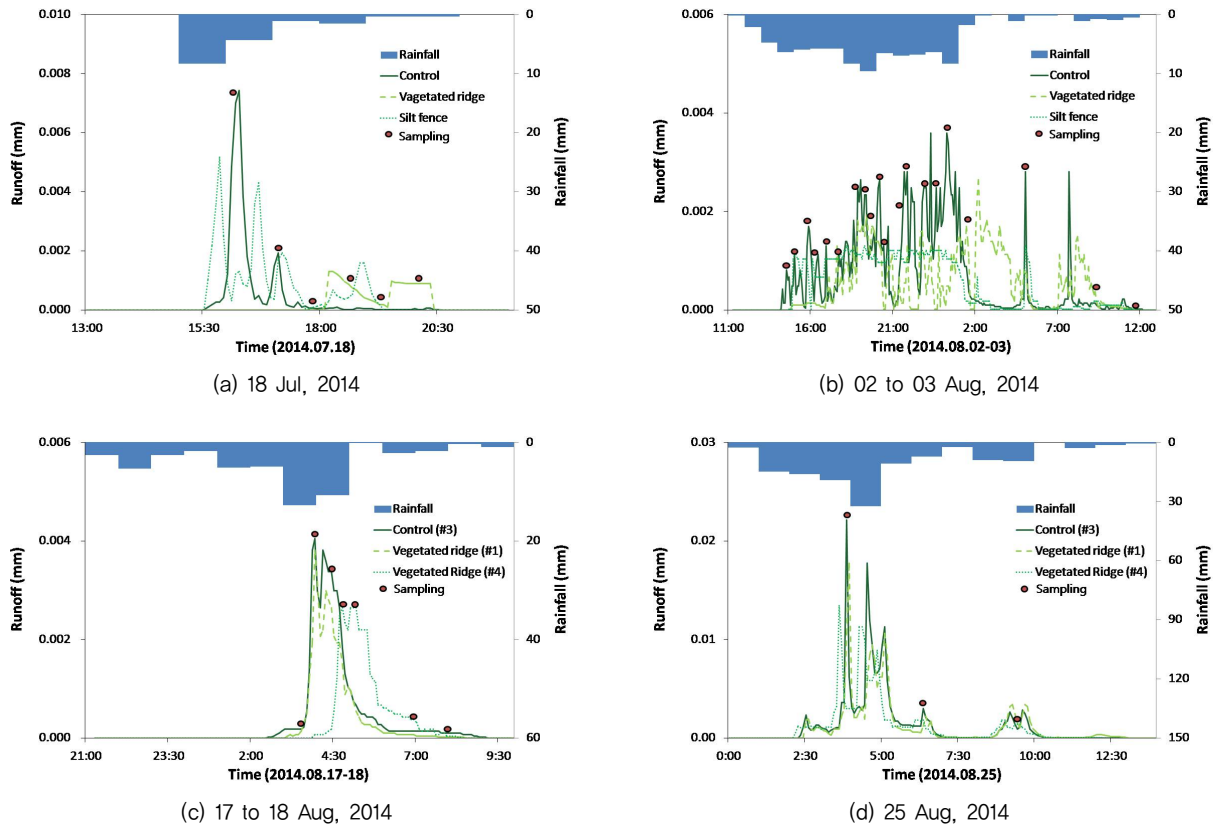


Fig. 5 Hydrograph for the storm event

Table 2 EMC from each experimental plot (2014)

Date	Field	BMPs	Item					
			BOD	SS	COD	DOC	T-N	T-P
18 Jul	Sacheon	Control	1,00	419,36	3,72	3,22	0,66	0,16
		Vegetated ridge	0,85	280,29	3,10	2,92	0,46	0,08
		Silt fence	1,31	231,35	2,87	3,43	0,60	0,14
2-3 Aug		Control	1,84	364,52	3,34	2,06	0,25	0,02
		Vegetated ridge	1,50	145,30	2,66	3,02	1,01	0,02
		Silt fence	2,26	260,03	4,23	2,83	0,27	0,02
17-18 Aug	Iksan	Control (#1)	3,78	146,29	8,10	11,99	9,37	0,67
		Vegetated ridge (#3)	5,06	331,24	12,09	13,68	6,30	1,23
		Vegetated ridge (#4)	2,78	74,45	6,05	7,79	12,88	0,47
		Control (#8)	4,44	346,49	11,29	12,51	6,96	1,23
25 Aug		Vegetated ridge (#7)	4,82	742,10	13,24	14,01	3,47	0,89
		Control (#1)	5,36	108,15	12,77	14,63	2,95	3,76
		Vegetated ridge (#3)	3,56	42,73	7,21	7,86	1,58	0,28
		Vegetated ridge (#4)	3,30	27,83	7,05	8,31	1,59	0,26
25 Aug	Control (#8)	5,90	117,28	13,51	14,84	3,58	3,57	
	Vegetated ridge (#7)	3,40	30,05	7,00	8,39	1,54	0,31	

#: Experimental plot number

Table 3 Reduction rate of EMC according to the treatment types

(Unit: %)

BMPs	Item	BOD	SS	COD	DOC	T-N	T-P
*Vegetated ridge		17.56	45.71	18.37	-12.53	-62.81	42.53
*Silt fence		-25.73	37.31	-0.54	-18.60	3.65	9.27
Vegetated ridge (#3)		5.73	-46.98	7.55	19.06	36.01	65.97
Vegetated ridge (#4)		33.45	59.80	37.24	39.50	-17.50	83.44
Vegetated ridge (#7)		20.59	-66.49	18.38	18.10	52.47	75.22

*: Experimental plot in Sacheon

Table 4 Pollutant loads from each experimental plot (2014)

(Unit: kg/ha)

Date	Field	Item	BOD	SS	COD	DOC	T-N	T-P
18 Jul	Sacheon	Control	1.21	503.98	4.47	3.87	0.79	0.19
		Vegetated ridge	0.58	190.59	2.11	1.99	0.32	0.06
		Silt fence	2.21	391.75	4.85	5.81	1.02	0.24
2-3 Aug		Control	11.48	2280.18	20.88	12.89	1.55	0.14
		Vegetated ridge	7.47	725.44	13.27	15.07	5.03	0.10
		Silt fence	10.71	1230.72	20.01	13.39	1.26	0.10
17-18 Aug	Iksan	Control (#1)	6.77	262.23	14.52	21.49	16.79	1.20
		Vegetated ridge (#3)	5.06	331.24	12.09	13.68	6.30	1.23
		Vegetated ridge (#4)	3.79	101.41	8.25	10.61	17.55	0.64
		Control (#8)	2.37	185.13	6.03	6.68	3.72	0.66
		Vegetated ridge (#7)	1.81	278.77	4.97	5.26	1.30	0.33
25 Aug		Control (#1)	37.01	746.83	88.21	101.01	20.37	26.00
		Vegetated ridge (#3)	22.03	264.70	44.66	48.70	9.78	1.72
		Vegetated ridge (#4)	20.08	169.34	42.87	50.56	9.68	1.59
		Control (#8)	20.97	416.53	47.99	52.72	12.73	12.69
	Vegetated ridge (#7)	9.02	79.74	18.57	22.25	4.08	0.81	

#: Experimental plot number

Table 5 Reduction rate of Pollutant loads according to the treatment types

(Unit: %)

BMPs	Item	BOD	SS	COD	DOC	T-N	T-P
*Vegetated ridge		36.62	67.10	39.34	-1.80	-128.41	52.72
*Silt fence		-1.87	41.73	1.93	-14.58	2.38	-4.69
Vegetated ridge (#3)		38.14	40.94	44.76	49.08	56.73	89.14
Vegetated ridge (#4)		45.49	73.17	50.24	50.06	26.74	91.80
Vegetated ridge (#7)		53.60	40.41	56.41	53.67	67.23	91.44

*: Experimental plot in Sacheon

3. 오염부하량 산정 결과

Table 4, 5에서는 익산 시험포장 및 사천 시험포장의 대조구, 식생밭두렁, 그리고 실트펜스의 오염부하량 및 저감기법

시험구의 비점오염 저감율 결과를 나타내었다. 저감율은 오염부하량의 경우 단위가 kg/ha로 동일하기 때문에 각 사상별 시험구의 오염부하량을 합하여 산정하였다. 대조구 대비 식

생발두령에서는 BOD 36.62~53.60 %, SS 40.41~73.71 %, COD 39.34~56.41 %, DOC 49.08~53.67 %, TN 26.74~67.23 %, 그리고 TP 52.72~91.80 %의 저감효과가 나타났으며, 실트펜스에서는 SS 41.73 %, COD 1.93 %, 그리고 TN 2.38 %의 저감효과만 나타났다.

4. 통계분석 결과

SS 오염부하량 데이터를 사용하여 Table 6과 같이 대조구와 저감기법을 적용한 시험구의 수질 저감효과를 확인하기 위해 대응표본 t-검정을 실시하였다. SS 오염부하량 데이터의 선정이유는 본 연구에서 저감효과를 평가한 수질항목 중 T-P 다음으로 저감율이 높은 것으로 나타났으며, 탁수와 부유물질을 나타내는 SS는 수질항목 중 비점오염원을 대표할 수 있는 변수로 판단하여 SS 오염부하량 데이터를 선정하였다. 오염부하량의 단위를 kg/ha로 동일하게 하였으며, 귀무가설 설정은 대조구와 저감기법의 평균 오염부하량을 감소하였다는 유의한 차이가 없음으로 설정하였다.

대조구와 저감기법 시험구의 오염부하량 저감에 대한 상관관계수는 식생발두령이 0.489 (유의확률: 0.002), 실트펜스가 0.520 (유의확률: 0.001)로서 유의하지만 낮은 선형관계를 나타냈다. 이는 초기 유출조건에서는 밭의 상단으로부터 하단까지 유출수가 도달하는 시간이 필요하기 때문에 대조구와 저감기법 시험구 간의 큰 차이가 없거나 대조구의 유출량이 적게 나타날 수도 있으나, 강우 지속시간에 따라 대조구에 비해 저감기법 시험구에서 유출량, 오염부하량의 저감율이 크게 증가하기 때문에 대조구와 저감기법의 상관관계는 낮은 선형관계를 갖는 것으로 판단된다. 평균의 차이는 대조구와 식생발두령이 56.14, 실트펜스는 59.40으로 대조구의 SS 오염부하량 데이터의 평균과 많은 차이가 있음을 나타내었다. 이러한 평균 비교만으로도 저감기법을 통해 오염부하량이 많이 저감된 것을 나타낸다. 표준편차의 차이는 대조구와 식생발두령이 122.06, 실트펜스가 128.38로서 오염부하량의 수치가 다양하게 분포하고 있는 것을 나타낸다.

대조구와 식생발두령 사이의 유의확률은 유의수준 5 %보

다 낮은 0.009로서 귀무가설을 기각하고 유의한 차이가 있으므로 나타났다. 대조구와 실트펜스의 유의확률도 식생발두령과 동일하게 유의수준 5 %보다 낮은 0.009로서 귀무가설을 기각하고 유의한 차이가 있음을 나타내었다. 따라서 저감기법인 식생발두령과 실트펜스는 오염부하량을 감소시키는 것이 유의함을 통계적으로 확인하였다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 밭에서 발생하는 비점오염 저감을 위해 익산과 사천지역에 실트펜스 및 식생발두령을 적용한 시험포장 및 모니터링 장비를 구축하여 강우유출수 모니터링을 실시하였다. 각 지역에 대해 2회씩 총 4회의 강우사상에 대한 모니터링을 수행하였으며, 강우시 밭에서 발생하는 유출수를 채취하고 수질분석을 하였다.

밭에서 유출이 발생한 총 4회의 강우사상에 대한 강우-유출관계에서는 강우강도는 비슷하나 강우량과 지속시간이 적을수록 유출량 저감율이 크게 나타나며, 강우량이 증가할수록 유출량 저감율은 감소하는 것으로 나타났다. 경사도 차이에 따른 강우-유출 관계를 비교했을 때, 경사도가 클수록 유출량 저감율이 크게 감소하는 것을 확인하였다. 또한 경운과 무경운을 비교하였을 때 무경운 된 밭에서 강우발생 후에도 유출에 대한 지체시간이 발생하였으며 경운된 밭에서는 강우 발생 후에 지체시간 없이 유출수가 유출되는 것을 확인하였다.

EMC 저감율을 산정한 결과 대조구 대비 식생발두령에서는 BOD 5.73~33.45 %, SS 45.71~59.80 %, COD 7.55~37.24 %, DOC 18.10~39.50 %, TN 36.01~52.47 %, 그리고 TP 42.53~83.44 %의 저감효과가 나타났다. 실트펜스에서는 SS 37.31 TN 3.65 %, 그리고 TP 9.27 %의 저감효과만 나타났다. 오염부하량을 산정한 결과 대조구 대비 식생발두령에서는 BOD 36.62~53.60 %, SS 40.41~73.71 %, COD 39.34~56.41 %, DOC 49.08~53.67 %, TN 26.74~67.23 %, 그리고 TP 52.72~91.80 %의 저감효과가 나타났으며, 실트펜스에서

Table 6 Significant test between control and each treatment for SS load

BMPs	N	Sig. (2-tailed)	Paired Differences			95 % Confidence Interval of the Difference		Correlation (Sig.)
			Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	Lower	Upper	
Control-Vegetated ridge	36	0.009	56,14	122,06	20,34	14,84	97,44	0.489 (0,002)
Control-Silt fence	19	0.009	59,40	128,38	21,40	15,96	102,84	0.520 (0,001)

는 SS 41.73 %, COD 1.93 %, 그리고 TN 2.38 %의 저감효과만 나타났다. 하지만 특정 수질 항목에서는 저감효과가 나타나지 않았다. 이는 현장작업 여건상 시료의 온도유지, 보관의 어려움이 있으며, 강우 지속시간까지 길게는 10시간 이상 방치되어 있기 때문에 수질의 변질 우려가 있다. 따라서 샘플링 시점에서의 수질농도와 분석된 수질데이터는 차이가 나타날 수 있으며, 오염부하량 결과에 반영된 것으로 판단된다.

식생발두령과 실트펜스의 오염부하량 저감효과를 대응표본 t-검정 통계분석을 통해 유의함을 분석한 결과 대조구와 저감기법 사이의 유의확률은 모두 유의수준 5 %보다 낮게 나타나 귀무가설을 기각하고 유의한 차이가 있음으로 나타났다. 따라서 저감기법인 식생발두령과 실트펜스는 오염부하량을 감소시키는 것이 유의함을 통계적으로 확인하였으며, 식생발두령과 실트펜스의 설치를 통하여 밭에서 발생하는 비점오염을 저감시키고 유출수의 수질 개선에 기여할 뿐만 아니라 우리나라 농업에 적합한 최적관리기법 (BMPs)에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 지원되는 “새만금유역 농업비점오염저감기법 개발 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Choi, K. S., and J. R. Jang, 2014. Selection of Appropriate Plant Species of VFS (Vegetative Filter Strip) for Reducing NPS Pollution of Uplands, *Journal of the Korea Water Resources Association* 47(10): 973-983 (in Korean).
2. Chung, W. J., I. K. Lee, S. J. Lee, and S. W. Chang, 2014. Assessment of Constructed Wetland of Removal Efficiency of Non-point Source Pollution by Rainfall Characteristics in Wolmun Stream, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 14(1): 327-332 (in Korean).
3. Gogo-Abite I., M. Chopra, 2013. Performance evaluation of two silt fence geotextiles using a tilting test-bed with simulated rainfall. *Geotextiles and Geomembranes* 39: 30-38.
4. IBM SPSS Statistics ver.20.
5. Kim, D. H., J. R. Jang, and S. M. Kim, 2014. A Plot Scale Soil Erosion Control Experiment for Silt Fence and Vegetated Ridge Applied Sloped Upland, *Journal of Agriculture & Life Science* 48(4): 273-284 (in Korean).
6. Kim, M. J., and I. T. Geun, 2014. Analysis of Runoff Characteristics of Non-point Sources Pollutant and Application of BMP Using BASINS/WinHSPF Model, *Journal of Environmental Impact Assessment* 23(2): 88-100 (in Korean).
7. Kim, S. J., T. Y. Park, S. M. Kim, J. R. Jang, and S. M. Kim, 2012. A Plot Scale Experiment to Analysis the NPS Reduction by Silt Fence and Vegetated Ridge for Non-irrigated Cropland, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 19-27 (in Korean).
8. Koo, Y. M., Y. D. Kim, and J. H. Park, 2014. Analysis of Non-point Pollution Source Reduction by Permeable Pavement, *Journal of Korea Water Resources Association* 47(1): 49-62 (in Korean).
9. Lee, S. I., C. H. Won, M. H. Shin, J. Y. Shin, J. H. Jeon, and J. D. Choi, 2015. Analysis of NPS Pollution Reduction from No-Till Field. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(4): 51-59 (in Korean).
10. Ministry of Environment (MOE), 2008. Bi-jum o-yeom jeogam-si-seol-ui seol-chi mit gwan-ri · woon-young manual. p.17-18, Ministry of Environment.
11. Won, C. H., M. H. Shin, S. I. Lee, D. H. Kum, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2014. Effects of Surface Cover and Soil Amendments on the NPS load Reduction from Alpine Fields, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(3): 47-53 (in Korean).