



벼짚거적과 토양개량제를 활용한 경사지 밭의 비점오염원 저감평가

Evaluations of NPS Reduction using the Rice Straw Mats and Soil Amendments from Steep Sloped Field

원철희* · 신민환* · 최용훈* · 신재영* · 박운지* · 이수인* · 최중대*†

Won, Chul-Hee · Shin, Min-Hwan · Choi, Yong-Hun · Shin, Jae-Young · Park, Woon-Ji · Lee, Su-In · Choi, Joong-Dae

ABSTRACT

The objective of the research was to describe the effect of straw mat cover and soil amendments on the reduction of runoff and non-point source load from steep sloped highland agricultural fields. Four 5×30 m plots on sandy loam soil with 28 % slope were prepared. Experimental treatments were bare (control), rice straw mat cover (3,000 kg/ha) (S), PAM (5 kg/ha)+Gypsum (1 ton/ha) (PG) and rice straw mat cover+PAM+Gypsum (SPG). A variety of lettuce was cultivated and runoff was monitored during a growing season in 2011. Natural monitoring was conducted to three times. Runoff rate of S, PG and SPG plots were significantly lower than those of control plot. Especially, the runoff rate is zero in SPG plot at a first rainfall events. The reduction rate of runoff from the S, PG and SPG plots was 30.8 %, 29.0 % and 81.8 % compared to control plots, respectively. The reduction rate of NPS pollution load of S, PG and SPG was ranged of 50~90 %, 30~70 % and 90~100 %, respectively. Yield of lettuce from S, PG and SPG plots was respectively 400 (567 kg/ha), 320 (453 kg/ha) and 760 (1,067 kg/ha) that of compared to control plots greater than that from control plots (140 kg/ha). We speculated that the experimental treated plots could hold more nutrients and moisture than the control and helped the crop grow healthier. When analyzing the above results, in terms of reduction of runoff and NPS pollution load and crop yields, SPG experimental treatment had the best effect. It was concluded that the use of rice straw mats cover and soil amendments on soil surface could not only reduce the NPS pollution loads in receiving waters but also help increase the crop yield.

Keywords: Gypsum; PAM; Rice straw mats cover; Runoff

1. 서 론

농업지역에서 토양유실은 전 세계적인 관심의 대상으로, 산림이나 초지에 비하여 토양 유실량이 많다고 알려져 있다 (Boardman et al., 1990). 이는 땅의 평탄화나 테라스 등의 부재로 인하여 침식과 또 다른 토양의 물리적 구조의 해체과정이 가속화되기 때문이다 (Cerdà et al., 2007). 한편, 토양의 침식은 강우 시 고농도의 탁수를 유발할 수 있는데, 국내의 대표적 고령지 농업 지역인 도암댐 유역이 이에 해당한다 (Choi et al., 2012). 특히 이 지역은 잦은 객토로 인하여 농경지의 표면이 배수로보다 높아졌기 때문에 강우 시 농경지에서 발생하는 강우유출수와 유실된 토양이 하천으로 쉽게 유입되어 수생태계를 악화시키고 있다 (Korea Rural Economic Institute, 2005). 이를 방지하기 위

해서는 발생 후 대책이 아닌, 농경지에서 강우유출수와 토양 유실을 제어 할 수 있는 최적영농관리방법 (best management practices, BMPs)의 도입이 반드시 필요하다. BMPs의 종류로는 완충식생대, 등고선 경작, 멀칭, 녹비작물재배 등이 있으며 (Rural Research Institute, 2012), 주로 미국에서 개발된 방안이다. 또한 작물 잔재물을 이용한 피복과 경운방법의 변경에 따른 연구도 많이 진행되었는데 (Martinez et al., 2006; Seeger, 2007; Jin et al., 2008; Garcia-Orenes et al., 2009; Jordan, 2010), 이 또한 BMPs의 하나로 인식되어 오고 있다. 그러나 국외에서 개발된 BMPs를 국내에 직접 적용하기에는 농업의 형태나 지형적인 차이로 인하여 많은 어려움이 있을 수 있다. 특히 탁수를 유발하는 토양유실은 강수량, 강우지속시간, 강우강도, 토양 특성, 재배작물, 경운방법, 지표피복, 유출량, 유속 그리고 경사도 등의 영향을 받기 때문에 (Choi, 1997; Choi et al., 2000) 국외에서 개발된 BMPs를 국내에 적용하려면 많은 노력과 시간이 필요하다. 이러한 BMPs 중 지표 피복 방법은 재료의 구입 및 적용이 용이하기 때문에 우리나라와 같은 집약농업에 쉽게 적용시킬 수 있을 것으로 판단된다 (Won et al., 2011).

* 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: +82-33-250-6464

Fax: +82-33-251-1518

E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

2013년 2월 8일 투고

2013년 3월 6일 심사완료

2013년 3월 11일 게재확정

이와 관련하여 농업잔재물인 빗짚을 이용하여 인공강우 조건에서 토양 유실량과 표면 유출량을 저감하였던 연구가 있으며 (Shin et al., 2009), 빗짚거적과 토양개량제 (Polyacrylamide, Gypsum) 그리고 톱밥과 왕겨를 조합하여 강우유출을 모의한 연구가 진행되어 오고 있다 (Won et al., 2011; 2012a). 이들의 연구에 의하면, 빗짚과 토양개량제를 이용하는 방법은 농경지에서 토양유실과 강우유출수를 제어할 수 있는 효과적인 BMP의 하나로 인식되고 있다. 한편 자연강우조건에서도 비점오염부하를 저감하였던 연구가 진행되었으나 (Shin et al., 2011), 밭의 경사도가 5 % 미만이기 때문에 토양유실과 탁수가 다량으로 발생하는 고랭지 농업지역과는 많은 차이가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기 수행된 빗짚거적과 토양개량제 관련 연구 결과를 고랭지 실경작지에 적용하기 위한 기초 실험을 수행하였다. 연구는 고랭지 농업지역과 유사한 급경사지 밭에 시험포를 조성하고 자연강우조건에서 유출량 및 오염부하량 그리고 작물의 생산성 등을 나지 상태인 대조구 (control)와 비교 및 분석하는 방법으로 진행하였다.

II. 연구방법

1. 시험포 조성 및 실험처리

시험포는 강원도 춘천시에 위치한 강원대학교 농장의 경사지를 개량하여 4개를 조성하였다 (Fig. 1). 각 시험포는 5×30 m의 크기로 150 m²의 면적으로 조성되었으며, 경사도는 28 %이다. 시험포와 시험포 사이는 각 시험포에서 나오는 유출수를 분리하기 위하여 철관으로 된 격막을 설치하였으며, 동일한 크기의 플럼을 설치하여 각 시험포에서의 유출수량을 측정하였다. 시험포는 관행농법인 나지 상태의 대조구 (C, control)와, 빗짚거적 시험포 (S, straw mat cover), 토양개량제 (Polyacrylamide, Gypsum) 시험포 (PG, PAM+ Gypsum) 그리고 빗짚거적과 토양개량제를 모두 적용한 시험포 (SPG, Straw mat cover + Polyacrylamide + Gypsum)로 실험처리를 하였다. 빗짚거적 시

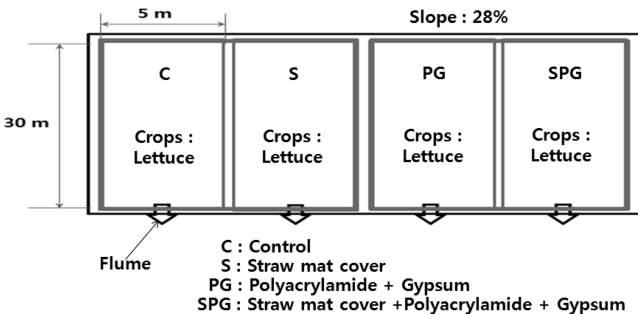


Fig. 1 Schematic diagram of experimental plots

Table 1 Selected properties of PAM used in the experiment

Form	Color	Odor	Water solubility	Specific gravity	pH (0.5 % solution)
Granular powder	White	Little or no	Soluble	0.75	6~9

험포 (S)와 빗짚거적과 토양개량제를 적용한 시험포 (SPG)에는 3,000 kg/ha의 거적을 사용하였다.

토양개량제인 PAM (Polyacrylamide)은 수용성이고 분자량이 1,000 이상인 고분자 물질로서 뛰어난 흡착관능기를 가지고 있기 때문에 토양 입자간의 결합력을 증가시켜 유출을 억제하는 것으로 알려져 있으며 (Barvenik, 1994; Entry et al., 2002), 토양 표면의 피막 형성을 차단하고 토양유실을 방지하는데 이용되고 있다 (Shainberg et al., 1990; Flanagan et al., 1997). 연구에 이용된 PAM의 특성은 Table 1과 같으며, Won et al (2012a)의 연구와 동일한 제품을 이용하였다. Gypsum (석고)은 천연광물로서 채광하는 경우와 인산 비료의 부산물로 생산되는 phosphorus-gypsum (인산석고), 화력발전소에서 SO₂를 제거하는 과정에서 생산되는 탈황석고, 폐황산 용액을 중화시키는 과정에서 생산되는 산중화석고로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 Ca²⁺를 함유하고 있고 점토의 분산 및 피막 형성 감소에 효과가 좋아 유출수 및 침식을 막는데 이용되고 있는 (Keren and Shainberg, 1981) 인산석고를 사용하였다.

연구에 사용된 Gypsum과 PAM의 양은 문헌 (Jian et al., 2003; Won et al., 2011)상의 자료를 분석하여 적용하였다. Won et al. (2011)은 빗짚거적만으로도 유출량과 유사량을 저감하는데 효과가 있다고 보고하였으며, Jian et al. (2003)에 의하면 20 kg/ha PAM과 4 Mg/ha Gypsum을 혼합할 경우 빗물의 침투능이 대조구에 비하여 약 4 배가 증가하고, 토양유실은 약 30 %가 저감된다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 빗짚거적의 사용량은 Won et al. (2011)과 동일한 양을 사용하였다. 그러나 PAM과 Gypsum은 문헌에 보고된 양 (Jian et al., 2003; Choi et al., 2010; Lee et al., 2010), PAM 20~40 kg/ha, Gypsum 4~5 Mg/ha보다 적은 양을 사용하였다. PG 시험포와 SPG 시험포의 PAM 사용량은 5 kg/ha으로서 수용액 상태로 토양에 분사하지 않고, 입자 상태로 토양에 직접 뿌렸다. 또한 Gypsum은 1 Mg/ha을 사용하였다. 실험처리는 경운 후 바로 하였으며, 이후 양상추를 정식하고 모니터링을 하였다. 한편 경운에 앞서 비료를 시비하였다. 비료는 양상추의 고랭지 시비기준인 질소 5.0 kg/10a, 인산 6.5 kg/10a, 칼리 4.3 kg/10a에 준하여 실시하였으며, 시험포별 실 사용량은 질소 0.75 kg/150 m², 인산 0.975 kg/150 m² 그리고 칼리는 0.645 kg/150 m²으로서 4개의 시험포에 동일한 양을 사용하였다. 또한 토양의 산성화를 방지하기 위하여 시험포별로 석회 1포석을 뿌렸다.

2. 모니터링 및 분석

경사 밭에 지표피복재와 토양개량제를 실험처리 한 후 양상추를 재배하면서 강우 시 모니터링을 하였다. 양상추는 고랭지 용양상추로서 생육기간은 1달 정도이다. 따라서 모니터링은 양상추를 정식하고, 뿌리가 토양에 안정되었다고 판단된 6월 중순 이후부터 7월초까지 실시하였다. 한편 정확하고 정밀한 유량측정 및 수질분석은 비점오염부하를 산정하는데 매우 중요하다. 유량을 측정하기 위하여 시험포 하단 유출부에 V자형의 플룸을 설치하였으며, 유출량은 20 L의 Bucket을 이용하여 실측하였다. 수질시료는 플룸의 유출수에서 채취하여 분석하였다. 분석항목은 BOD, SS, COD_{cr}, TN, TP 등을 수질공정시험법 (Ministry of Environment, 2001)에 따라 분석하였다. 비점오염부하는 식 (1)을 이용하여 산정하였다 (Shin et al., 2009).

$$Pollutant\ load(g/150m^2) = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \quad (1)$$

여기서 c_i 는 1번째의 농도이고, q_i 는 구간유량, t_i 는 $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 에 해당하는 I번 째 샘플로서 표현되는 시간구간이다.

4. 생산량 및 생산성 분석

경사 밭에서 지표피복재와 토양개량제의 적용 시 토양의 온도 및 수분변화, 그리고 영양물질 함유량의 등의 변화에 따라 작물의 성장에 영향을 미칠 수 있다. 만약, 지표피복재와 토양개량제를 사용할 경우 작물의 생산성이 크게 저하된다면, 농민들은 이를 사용하지 않을 것이다. 이에 본 연구에서는 각 실험처리에 따른 작물의 생산량과 나지대비 생산성을 분석하였다. 생산량은 전수조사를 통하여 조사하였으며, 나지 시험포대비 생산성은 식 (2)를 이용하였다.

$$\frac{P_a}{P_c} \times 100 \quad (2)$$

여기서 P_a 는 S, PG, SPG 시험포의 생산량이고 P_c 는 대조구 시험포의 생산량이다.

III. 결과 및 고찰

1. 유출량

모니터링은 총 3 차례 (2011년 6월 23~27일, 6월 29~30일, 7월 3~4일)를 실시하였으며, 시험포별 유출량과 나지시험포대비 저감율을 산정하여 Table 2에 제시하였다. 각 강우사상별 강우량은 각각 207.5 mm, 218.0 mm, 72.0 mm로 측정되었으며, 강우 지속시간은 각각 82 hr, 31 hr, 14 hr로 관측되었다 (기상청, 지역별상세관측자료 (AWS)). 또한 각 강우사상별 평균 강우강도는 2.5 mm/hr, 7.0 mm/hr, 5.1 mm/hr로 조사되었다.

첫 번째 강우사상 (6월 23~27일)은 82 시간 동안 총 207.5 mm의 강우가 발생하였다. 실험처리별 강우 유출율은 나지시험포가 1.4 %로 조사되었으며, 지표를 실험처리 한 S, PG, SPG의 유출율은 각각 1.0 %, 0.9 %, 0.0 %로서 총 강우량을 고려했을 때, 시험포별 유출율은 상당히 작게 나타났다. 이는 양상추를 정식한 6월 중순을 전·후하여 비가 거의 내리지 않았기 때문에 (10 mm 미만) 모든 시험포에서 토양에 흡수된 양이 많았기 때문으로 판단된다. 그러나 빗길저적과 토양개량제의 유출저감효과는 관측되었다. 나지시험포의 유출을 대비 실험처리구인 S, PG, SPG 시험포의 유출율은 각각 25.0 %, 27.7 %, 100.0 %가 저감된 것으로 조사되었다. 특히 빗길저적과 토양개량제를 첨가한 SPG 시험포에서는 유출이 발생하지 않았다. 비록 건조한 기후 발생한 첫 번째 강우이고 평균 강우강도가 2.5 mm/hr로서 낮았지만, 이는 지표피복재와 토양개량제의 효과로 판단된다. 이후 발생한 2 번의 강우사상에서도 유사한 결과를 보였다. 이를 보다 명확히 분석하기 위하여 누적유출량에 기초하여 분석하여 보았다 (Fig. 2). 누적 유출량에 기초할 경우, 대조구의 누적유출량은 3.9 m³으로 조사되었으며, 실험처리구인 S, PG, SPG의 누적 유출량은 각각 2.70 m³, 2.77 m³ 그리고 0.71 m³로서, 유출량은 Control > PG > S > SPG 순으로 발생하였다. 또한 대조구인

Table 2 Runoff rate and reduction rate with respect to experimental treatment

Date	2011.6.23~27				2011.6.29~30				2011.7.3~4			
Rainfall (mm)	207.5				218.0				72.0			
Rainfall duration (hr)	82				31				14			
Rainfall intensity (mm/hr)	2.5				7.0				5.1			
Treatments	C	S	PG	SPG	C	S	PG	SPG	C	S	PG	SPG
Runoff (m ³)	0.42	0.32	0.30	0.00	1.57	1.29	1.27	0.50	1.91	1.09	1.20	0.21
Runoff rate (%)	1.4	1.0	0.9	0.0	5.2	4.2	4.2	1.6	16.4	9.4	10.3	1.8
Reduction rate(%)	-	25.0	27.7	100	-	17.6	19.4	68.3	-	42.3	37.2	88.8

나지시험포의 유출을 대비 실험처리별 유출 저감율은 S (빗짚거적) 시험포에서는 30.8 %, PG (토양개량제) 시험포에서는 29.0 % 그리고 SPG (빗짚거적 + 토양개량제) 시험포에서는 81.8 %로서 빗짚거적과 토양개량제를 모두 적용한 SPG 시험포에서 유출을 저감효과가 가장 높게 나타났다. 그러나 S 시험포와 PG 시험포에서의 유출량 및 나지시험포 대비 유출량의 차이는 크지 않은 것으로 조사되었다.

이상의 결과와 누적강우량 500 mm를 고려하여 유출량과 나지 (대조구) 시험포 대비 실험처리 시험포의 유출 저감율을 다시 산정하였다 (Fig. 2). 재산정 결과 빗짚거적만을 실험처리 한 시험포에서도 유출량의 저감효과(약 30 %)를 얻을 수 있었는데, 이는 Won et al. (2012b)이 빗짚거적을 피복하고 실시한 인공강우 실험 (강우강도 30 mm/hr, 60 mm/hr, 경사도 10 %, 20 %)의 유출 저감율 약 25~100 %와 유사한 결과이다. 또한 PAM과 Gypsum을 혼합할 경우 유출수량을 저감할 수 있다고 한 Lee et al. (2010)의 연구와도 유사한 결과로서, 유출 저감율은 20P + 5G > 40P > 20P > 5G 순으로 보고하였다. 즉 PAM과 Gypsum의 양에 따른 차이는 있으나, 일반적인 사용범위 (PAM 20~40 kg/ha, Gypsum 4~8 Mg/ha)에서 Gypsum 보다는 PAM이 유출량 저감효과가 좋으며, 적은 양의 PAM과 Gypsum을 혼합할 경우 저감효과가 증가함을 알 수 있다. 그러나 PAM을 단독 처리할 경우 대조구 (미처리) 보다 유출수량이 감소한다는 연구와 (Bjorneberg et al., 2003; Flanagan et al., 2003), 유출수량이 오히려 증가한다는 연구가 (Lee et al., 2011) 있으며, 또한 경사도가 증가함에 따라 유출수량의 증가하는 연구 (Huang 1995; Fox et al., 1997; Fox and Bryan, 1999)와 변하지 않는 연구 (Lal, 1976; Mah et al., 1992; Lee et al., 2011)가 다양하게 분포하고 있기 때문에 PAM을 단독으로 사용할 경우에는 지형적 특성과 토성 등을 고려해서 적용하여야 할 것으로 판단된다. 한편 본 연구에서는 빗짚거적과 토양개량제 (Gypsum, PAM)를

모두 적용하여 보았는데, 나지 (대조구) 시험포 대비 유출 저감율은 약 80 %로서 유출량 저감효과는 빗짚거적 혹은 토양개량제를 적용한 시험포보다 2 배 이상 증가하였다. 이는 1 차적으로 빗짚거적이 빗물의 타격에너지를 감소시키고, 2 차적으로 농지에 적용된 토양개량제 (PAM, Gypsum)의 효과가 복합적으로 고려되어 나타난 것으로, 강우유출수량 저감에 효과가 있는 BMPs나 다양한 방법을 조합할 경우 그 효과가 증대됨을 알 수 있었다. Won et al. (2012a)의 연구 (강우강도 30 mm/hr, 경사도 10 %, 20 %)에 의하면 본 연구와 동일한 SPG 조건에서 대조구 대비 유출 저감율은 약 70~80 %로 보고한 바 있다. 비록 강우강도와 경사도의 차이는 있으나, 본 연구와 유사한 결과로서 실내에서 수행된 결과를 현장에 적용하여도 유출 저감효과는 크게 변동되지 않음을 알 수 있었다. 그러나 Won et al. (2012a)에 의하면 SPG 조건에 추가적으로 첨가물을 투입할 경우 유출 저감효과는 재료에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 경제성 측면에서 농경지에서 발생하는 강우유출수를 저감하기 위해서는 본 연구에서 수행된 SPG 조건이 적절한 것으로 판단된다.

2. 오염부하량

Table 3에는 강우시 시험포에서 발생하는 유출량과 오염물질의 농도에 기초하여 분석한 시험포별 비점오염부하량과 대조구 (나지) 시험포 대비 비점오염부하량의 저감율을 각각 나타내었다. 2011년 6월 23~27일의 강우 시 나지시험포의 비점오염부하량을 살펴보면, COD_{Cr}은 1.27 kg/ha, TN은 1.31 kg/ha, TP는 0.13 kg/ha로 조사되었다. 그러나 빗짚을 피복한 S 시험포에서 오염부하량은 COD_{Cr}이 0.67 kg/ha, TN이 0.77 kg/ha 그리고 TP는 0.08 kg/ha로서 나지시험포의 오염부하와 비교 시, 각각 47.6 %, 41.1 %, 36.8 %가 저감되었는데, 이는 본 연구보다 낮은 경사도에서 수행된 Shin et al. (2012)의 연구와 유사한 경향을 보였다. Shin et al. (2012)은 빗짚거적을 피복할 경우 TN과 TP는 나지 시험포 대비 각각 68.3 %와 53.3 %가 저감되며, 빗짚을 피복하였을 경우 TN과 TP는 각각 28.5 %와 35.2 %가 저감된다고 보고한 바 있다. 그러나 피복제의 사용량 (빗짚 3,409 kg/ha, 빗짚거적 3,136 kg/ha)에는 큰 차이가 없었으나, TN과 TP의 저감율은 빗짚거적 피복 시 20~40 % 정도가 높게 나타났다. 이는 빗짚거적이 빗짚보다 토양에 잘 밀착되어 토립자의 이탈을 방지와 토양 공극의 막힘 현상을 방지하는데 보다 효과적임을 보여주는 결과로서, 본 연구에서 빗짚거적의 사용량 (3,000 kg/ha)이 Shin et al. (2012)의 빗짚 사용량 (3,409 kg/ha) 보다 적고, 경사도도 매우 큼에도 불구하고 TN과 TP의 저감율이 높은 것은 이에 기인하는 것으로 판단된다. 토양개량제로 실험처리 한 PG 시험포에서도 유사한 경향을 보였으며, S

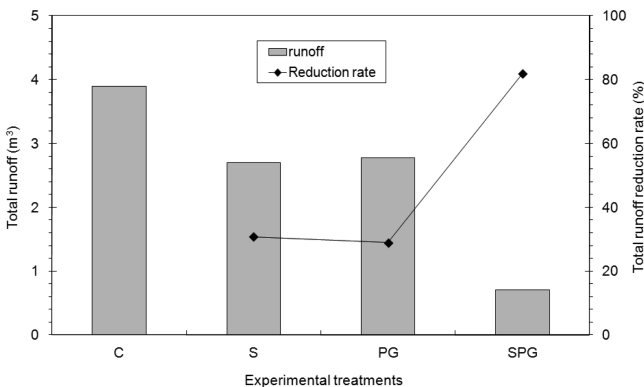


Fig. 2 Runoff and Runoff reduction ratio with respect to experimental treatment

Table 3 NPS pollution loads and reduction rate of applied experimental treatment plots

Date	Treatments	NPS pollution load (kg/ha)					Reduction rate (%)				
		BOD	SS	COD _{Cr}	TN	TP	BOD	SS	COD _{Cr}	TN	TP
2011.6.23~27	C	0.11	51.21	1.27	1.31	0.13	-	-	-	-	-
	S	0.05	14.99	0.67	0.77	0.08	58.8	70.7	47.6	41.1	36.8
	PG	0.04	8.85	0.48	0.61	0.07	64.7	82.7	62.3	53.8	42.1
	SPG	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100	100	100	100	100
2011.6.29.~30	C	0.24	125.33	3.02	1.33	0.18	-	-	-	-	-
	S	0.13	12.23	1.39	1.15	0.05	44.4	90.2	54.1	13.1	70.4
	PG	0.21	38.90	1.33	0.98	0.09	11.1	69.0	56.1	26.1	48.1
	SPG	0.04	0.65	0.34	0.25	0.01	83.3	99.5	88.7	80.9	92.6
2011.7.3.~4	C	0.21	112.19	2.49	2.72	0.16	-	-	-	-	-
	S	0.09	9.52	0.91	1.35	0.05	58.1	91.5	63.3	50.2	66.7
	PG	0.14	37.95	1.19	1.79	0.13	32.3	66.2	52.3	34.3	16.7
	SPG	0.02	0.73	0.21	0.23	0.01	90.3	99.3	91.7	91.4	91.7

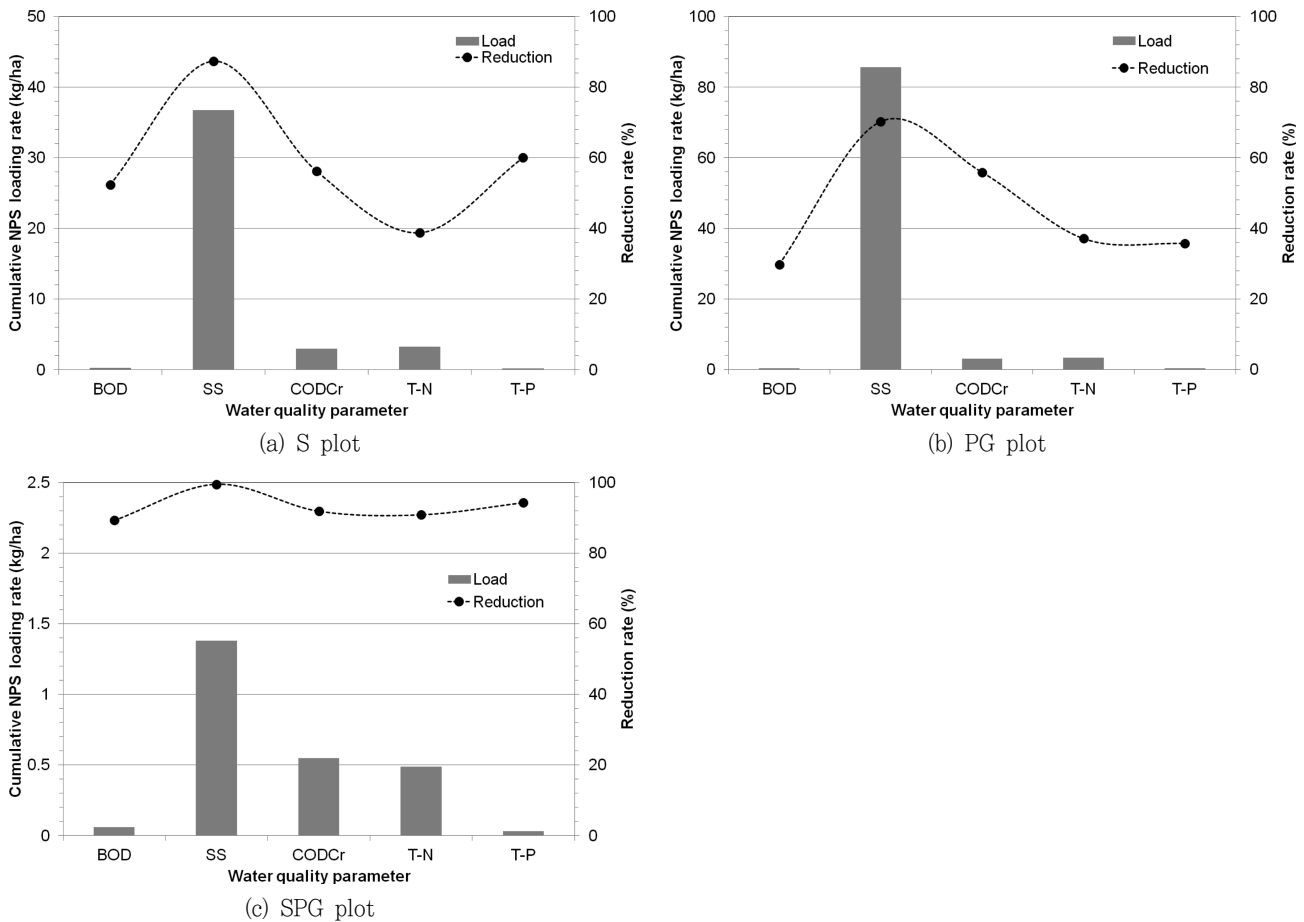


Fig. 3 Cumulative NPS loads and reduction rate with respect to experimental treatments

시험포보다 다소 높은 저감율을 보였다. 벚길거적과 토양개량제를 모두 처리한 SPG 시험포에서는 유출이 발생하지 않은 관계로 나지 시험포 대비 100%가 저감되었다. 그러나 2 일 후 발생

한 강우시에는 SPG 시험포에서도 유출이 발생하였는데, COD_{Cr}은 0.34 kg/ha, TN은 0.25 kg/ha, TP는 0.01 kg/ha로서 S와 PG 시험포의 1차 강우시보다도 오염부하량이 낮게 조사되었다.

또한 3차 강우시에도 빗짚겨적과 토양개량제를 처리한 SPG 시험포에서는 유사한 범위의 비점오염부하량을 보였다. 이에 따른 SPG 시험포의 비점오염부하량은 항목별로 차이는 있으나, 나지 시험포 대비 2차 강우시에는 약 80~100%, 3차 강우시에는 90~100%가 저감된 것으로 조사되었다.

강우사상별로 산정된 비점오염부하는 일부 항목에서 강우사상에 따른 편차가 발생하였다 (TN, TP). 따라서 강우사상에 따른 비점오염부하가 아닌 누적 비점오염부하로써 저감량을 평가할 필요가 있다. Fig. 3에는 각 시험포 (S, PG, SPG)의 누적 비점오염부하와 나지시험포의 누적비점오염부하 대비 저감율을 나타내었다. Table 3의 자료에서 C (대조구, 나지) 시험포의 누적오염부하를 살펴보면, BOD는 0.56 kg/ha, SS는 288.73 kg/ha, COD_{Cr}은 6.78 kg/ha, TN은 5.36 kg/ha, TP는 0.47 kg/ha로 조사되었다. S (빗짚겨적) 시험포의 BOD, SS, COD_{Cr}, TN, TP의 항목별 누적오염부하는 각각 0.27 kg/ha, 36.73 kg/ha, 2.97 kg/ha, 3.28 kg/ha 그리고 0.19 kg/ha로서 나지 시험포의 누적오염부하 대비 약 50~90%가 저감되었다. PG 시험포의 누적오염부하도 유사한 경향을 보였으며, 나지 시험포의 누적오염부하 대비 약 30~70%의 오염부하가 저감된 것으로 조사되었다. 그러나 S 시험포보다는 다소 낮은 저감율을 보였다. 특히 BOD와 SS의 저감율은 빗짚겨적 피복시보다 약 20%가 낮은 것으로 조사되었다. 이는 빗짚겨적 피복 시, 부유성 물질이 빗짚사이에서 걸리거나 흡착되어 나타난 결과로 판단된다. 농경지에서 유출되는 오염물질 중, BOD와 SS는 부유성 물질의 유·무가 농도에 큰 영향을 미친다. 그러나 COD_{Cr}의 경우 용존 상태의 난분해성 물질이, 그리고 비료 성분에서 포함된 질소와 인은 주로 용존성 물질로 유출되기 때문에 BOD와 SS와는 다른 경향을 보인 것으로 판단된다.

한편 SPG 시험포의 누적오염부하를 살펴보면, BOD가 0.06 kg/ha, SS가 1.38 kg/ha, COD_{Cr}은 0.55 kg/ha, TN은 0.49 kg/ha, TP는 0.03 kg/ha로서 항목에 따른 차이는 있으나, 나지 시험포의 오염부하 대비 약 90~100%의 저감효과를 얻을 수 있었다. 또한 S, PG 시험포보다도 훨씬 낮은 오염부하를 보였는데, 빗짚겨적을 피복한 S 시험포보다는 항목에 따라 77.8~96.2%, 토양개량제를 피복한 시험포보다는 84.6~98.4%의 저감효과가 있는 것으로 조사되었다 (Table 4).

Table 4 NPS load reduction rate of SPG plot compared to S, PG plots

Item	BOD	SS	COD _{Cr}	TN	TP
Reduction rate*	77.8	96.2	81.5	85.1	84.2
Reduction rate**	84.6	98.4	81.6	85.5	90.0

* Reduction rate of SPG plot compared to S plot

** Reduction rate of SPG plot compared to PG plot

Table 5 Comparison of lettuce yield at harvest

Treatments	Product quantity (kg/ha)	Yield index
C	140	100
S	567	400
PG	453	320
SPG	1,067	760

3. 생산성 분석

본 연구에서는 양상추의 총 생산량을 분석하였다. 그러나 모니터링 후, 양상추의 수확시기에 지속적으로 비가 내려 시험포에 들어갈 수 없는 상황이었다. 따라서 양상추는 빗물에 많이 상한 상태에서 수확을 하고 생산량을 측정하였다 (Table 5). 무처리구인 C 시험포의 수확량은 140 kg/ha로 조사되었으며, S 시험포는 567 kg/ha, PG 시험포는 453 kg/ha 그리고 SPG 시험포에서는 1,067 kg/ha의 생산량을 보였다. 이를 바탕으로 S 시험포의 수량지수를 100으로 했을 때, S, PG 그리고 SPG 시험포의 수량지수는 각각 400, 320 그리고 760으로 증가한 것으로 나타났다. 특히 지표피복재와 토양개량제를 모두 적용한 SPG 시험포에서의 생산량이 크게 증가한 것으로 조사되었다. 이는 지표피복재 또는 토양개량제를 적용 할 경우, 강우를 비롯한 환경에 대한 작물의 저항성이 증가되고, 영양물질의 유실량이 감소하여 나타난 결과로 판단된다. 특히 시험포의 경사도 28%를 감안했을 때, 강우시 S 시험포에서는 시비된 영양물질이 쉽게 유실될 수 있다. 반면에 지표피복재와 토양개량제를 적용한 S, PG 그리고 SPG 시험포에서는 영양물질의 손실량이 줄어들 수 있고 작물이 섭취할 수 있는 양이 많아졌기 때문으로 판단된다 (Shin et al., 2012). 이러한 이유로 지표피복재 또는 토양개량제를 처리한 시험포의 양상추가 나지시험포의 양상추보다 성장이 좋았던 것으로 판단된다. 이는 빗짚 혹은 빗짚겨적으로 피복을 할 경우 수량지수가 증가한다고 한 Shin et al. (2012)의 연구와 유사한 연구결과이다. 그러나 작물이 일부 폐사한 상태에서 측정본 연구의 결과로 생산성의 증대효과를 판단하기에는 한계가 있으며, 많은 오차가 발생할 수 있다. 따라서 지표피복재 또는 토양개량제가 작물의 성장에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 이러한 검증 과정을 통하여 지표피복재와 토양개량제의 효과를 검증하고 농민에 보급할 필요가 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 빗짚겨적과 토양개량제 (PAM, Gypsum)를 조합한 실험처리가 강우시 유출수량과 비점오염부하 그리고 생산성에 미치는 영향을 급경사지 시험포에서 비교·분석하였다. 시

험포의 경사도는 약 28 %로 조성하였으며, 자연강우조건에서 모니터링을 하였다. 모니터링 결과 빗झ겨적과 토양개량제로 실험 처리 할 경우, 대조구 (나지) 시험포 대비 유출수량과 비점오염 부하 저감에 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히 빗झ겨적과 토양개량제를 모두 적용한 시험포 (SPG)에서 유출수량과 비점오염 부하의 저감율이 높게 나타났다. SPG 시험포에서의 비점오염 부하는 나지 시험포의 오염부하 대비 약 90~100 %가 저감된 것으로 조사되었다. 또한 다른 실험처리구인 S, PG 시험포보다도 훨씬 낮은 오염부하를 보였는데, 빗झ겨적을 피복한 S 시험포 보다는 항목에 따라 77.8~96.2 %, 토양개량제를 피복한 시험포 보다는 84.6~98.4 %의 저감효과가 있는 것으로 조사되었다. 그러나 S 시험포와 PG 시험포의 비점오염부하는 유의적 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 실험처리에 따른 양상추의 생산성 역시 SPG 시험포에서 높은 것으로 나왔다. 이상의 결과로 판단할 때, 지표를 피복하거나 토양개량제를 첨가하는 방법은 강우시 발생하는 비점오염부하 저감뿐만 아니라 작물의 생산성도 증대시킬 수 있는 BMP (Best management practice)의 하나로 판단된다. 그러나 본 연구는 짧은 연구기간 동안의 제한된 연구 조건에서 수행되었기 때문에 지표피복재와 토양개량제의 효과를 보다 객관화하기 위해서는 보다 세분화된 강우조건, 경사도, 그리고 작물에 따른 반복 실험이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 Eco-star (과제번호 II-7-6) 과제의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Barvenik, F. W., 1994. Polyacrylamide characteristics related to soil applications, *Soil Science* 158: 235-243.
2. Bjorneberg, F. L., N. S. Santos, O. C. Castanheira, J. L. Reis, J. K. Aase, and R. E. Sojka, 2003. Using polyacrylamide with sprinkler irrigation to improve infiltration. *Journal of Soil and Water Conservation* 58: 283-289.
3. Boardman, J., I. D. L. Foster, and J. A. Dearing, 1990. *Soil erosion on agricultural land*. John Wiley and Sons: Chichester.
4. Cerdà, A., 2007. Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. *Science of the Total Environment* 378: 151-155.
5. Choi, J. D., S. O. Jang, B. Y. Choi, and S. H. Lyou, 2000. Monitoring Study on Groundwater Quality of an Alluvial Plane in the North Han River Basin. *Journal of the KSWQ* 16(3): 283-294 (in Korean).
6. Choi, J. D., 1997. Effect of Rural Watershed Management on the Discharge of NPS Pollutants to Streams. *Inst. of Rural Dev., Kangwon Nat'l Univ.* 1(1): 91-107 (in Korean).
7. Choi, Y. B., B. S. Choi, S. W. Kim, S. S. Lee, and Y. S. Ok, 2010. Effects of Polyacrylamide and Biopolymer on Soil Erosion and Crop Productivity in Sloping Uplands: A Field Experiment. *Journal of KSEE* 32(11): 1024-1029 (in Korean).
8. Choi, Y. H., C. H. Won, W. J. Park, M. H. Shin, J. Y. Shin, S. I. Lee, and J. D. Choi, 2012. Comparison of NPS Pollution Characteristics between Snowmelt and Rainfall Runoff from a Highland Agricultural Watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 28(4): 523-530 (in Korean).
9. Entry, J. A., R. E. Sojka, M. Watwood, and C. Ross, 2002. Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants. *Enviro. Poll.* 120: 191-200.
10. Flanagan, D. C., L. D. Norton, and I. Shainberg, 1997. Effect of water chemistry and soil amendments on a silt loam soil-Part I. Infiltration and Runoff. *Transactions of the ASABE* 40: 1549-1554.
11. Flanagan, D. C., L. D. Norton, J. R. Peterson, and K. Chaudhari, 2003. Using polyacrylamide to control erosion on agricultural and disturbed soils in rainfed areas. *Journal of Soil and Water Conservation* 58: 301-311.
12. Fox, D. M., and R. B. Bryan, 1999. The relationship of soil loss by interrill erosion to gradient. *CATENA* 38: 211-222.
13. Fox, D. M., R. B. Bryan, and A. G. Price, 1997. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma* 80: 181-194.
14. Garcia-Orenes, F., A. Cerda, J. Mataix-Solera, C. Guerrero, and M. B. Bodi, 2009. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil-water losses in eastern Spain. *Soil & Tillage Research* 106: 117-123.
15. Huang, C. H., 1995. Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas. *Soil*

- Science Society of America Journal* 59: 982-990.
16. Jian Y., T. Lei, I. Shainberg, A. I. Mamedov, and G. J. Levy, 2003. Infiltration and Erosion in Soils Treated with Dry PAM and Gypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 630-636.
 17. Jin, K., W. M. Cornelis, D. Gabriels, W. Schiettecatte, S. D. Neve, J. Lu, T. Buysse, J. Wu, D. Cai, J. Jin, and R. Harmann, 2008. Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. *CATENA* 75: 191-199.
 18. Jordan, A., L. M. Zavala, and J. Gil, 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *CATENA* 81: 77-85.
 19. Keren, R., and I. Shainberg, 1981. Effect of dissolution rate on the efficiency of industrial and mined gypsum in improving infiltration of a sodic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1001-1004.
 20. Korea Rural Economic Institute, 2005. A Basic Study for Environmentally Friendly Reorganization of Highland Agriculture (in Korean).
 21. Lal, R., 1976. Soil erosion of Alfisols in western Nigeria: Effect of slope, crop rotation and residue management. *Geoderma* 16: 363-375.
 22. Lee, S. S., C. J. Gantzer, A. L. Thompson, and S. H. Anderson, 2010. Polyacrylamide and gypsum amendments for erosion and runoff control on two soil series. *Journal of Soil and Water Conservation* 65(4): 233-242.
 23. Lee, S. S., C. J. Gantzer, A. L. Thompson, and S. H. Anderson, 2011. Polyacrylamide efficacy for reducing soil erosion and runoff as influenced by slope. *Journal of Soil and Water Conservation* 66(3): 172-177.
 24. Mah, M. G. C., L. A. Douglas, and A. J. Ringrose-Voase, 1992. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall. *Soil Science* 154(1): 37-43.
 25. Martinez, J. R. F., V. H. D. Zuazo, and A. M. Raya, 2006. Environmental impact from mountainous olive orchards under different soil-management systems (SE Spain). *Science of the Total Environment* 358: 46-60.
 26. Ministry of Environment, 2001. Official test methods for water pollution (in Korean).
 27. Seeger, M., 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *CATENA* 71: 56-67.
 28. Shainberg, I., D. N. Warrington, and P. Rengasamy, 1990. Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing. *Soil Science* 149: 301-307.
 29. Shin, M. H., C. H. Won, Y. H. Choi, J. Y. Seo, J. W. Lee, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2009. Simulaion of field soil loss by artificial rainfall simulator-by varing rainfall intensity, surface condition and slope. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(5): 785-791 (in Korean).
 30. Shin, M. H., C. H. Won, W. J. Park, Y. H. Choi, J. Y. Shin, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2011. Surface cover application for reduction of runoff and sediment discharge from sloping fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 129-136 (in Korean).
 31. Rural Research Institute, 2012. U.S. Department of Agriculture – National Resources Conservation Service (in Korean).
 32. Won, C. H., M. H. Shin, Y. H. Choi, J. Y. Shin, W. J. Park and J. D. Choi, 2011. Applications of surface cover materials for reduction of soil erosion. *Journal of Korean Society on Water Quality* 27(6): 848-854 (in Korean).
 33. Won, C. H., M. H. Shin, Y. H. Choi, J. Y. Shin, W. J. Park, and J. D. Choi, 2012a. Simulations of runoff using rice straw mats and soil amendments. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 95-102 (in Korean).
 34. Won, C. H., Y. H. Choi, M. H. Shin, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2012b. Effects of rice straw mats on runoff and sediment discharge in a laboratory rainfall simulation. *Geoderma* 189-190: 164-169.