

## 야채재배 밭에서 지표피복의 비점오염원 저감효과

신민환 · 장정렬\* · 원철희 · 최용훈 · 신재영 · 임경재 · 최중대†

강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

\*한국농어촌공사 농어촌연구원

## Effect of Surface Cover on the Reduction of NPS Pollution at a Vegetable Field

Minhwan Shin · Jeongryeol Jang\* · Chulhee Won · Younghun Choi · Jaeyoung Shin ·  
Kyoung Jae Lim · Joongdae Choi†

Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University

\*Rural Research Institute, KRC

(Received 27 January 2012, Revised 10 April 2012, Accepted 15 April 2012)

### Abstract

This research was focused on the effect of rice straw and rice straw mat on the reduction of upland field non-point source (NPS) pollution discharges. Six experimental plots of 5 × 22 m in size and 3% in slope prepared on gravelly sandy loam soil were treated with control, rice straw cover and rice straw mat cover. Radish in Spring growing seasons were cultivated. NPS pollution discharge was monitored and compared with respect to the treatments. The surface cover rate of rice straw and rice straw mat right after the treatments was 64.7% and 73.7%, respectively. Rainfall of the 16 monitored events ranged from 12.8 mm to 538.2 mm. Runoff coefficient of the events was 0.01~0.67 in control plot, 0~0.63 in rice straw plot and 0~0.45 in rice straw mat plot. The reduction of runoff compared to the control plot was 5.4~99.7% in rice straw plot and 32.9~100% in rice straw mat plot. The reduction of NPS pollution load was 52.0% for SS, 28.5% for T-N and 35.2% for T-P in rice straw plot and 79.8% for SS, 68.3% for T-N and 53.3% for T-P in rice straw mat plot. This research revealed that rice straw mat cover on the soil surface could not only increase the crop yield and farmer's income but also reduce the NPS pollution loads significantly.

**keywords** : NPS pollution, Radish, Runoff, Surface cover material

### 1. 서론

농업유역에서 강우에 의해 발생하는 비점오염물질은 하천의 수생태계에 영향을 미칠 뿐 아니라, 하천 및 하천주변에서의 여가활동에도 큰 영향을 미친다. 또한 농업유역에서 발생하는 비점오염물질은 용수공급의 상수원인 댐에 탁수를 유발할 뿐만 아니라, 호소와 저수지로 유입되어 부영양화를 발생시킨다(권영호 등, 2002). 그러나 농업지역에서 발생하는 비점오염원을 줄이기 위한 노력은 도시지역의 하수처리나 환경기초시설의 투자에 비해 매우 미흡한 실정이다. 최근 들어 일부 고령지 지역에 대한 비점오염원의 문제점에 대한 심각성을 인식하고, 비점오염원 비율이 상대적으로 높은 지역을 비점오염원(탁수) 관리지역으로 지정하고 관리대책을 수립하는 등 비점오염원 관리를 위한 제도를 마련하여 비점오염원 저감을 위한 노력을 기울이고 있다. 그러나 우리나라의 밭 비점오염원 연구는 유출시험포와 경지단위 최적관리방법의 적용 실험을 통한 비점오염원 해석이 매우 중요함에도 불구하고, 경지단위의 실험연구 없이

유역 모니터링을 수행하여 오염부하량을 정량화하는 연구가 진행되었다(박성천 등, 2005; 이병수 등, 2008). 유역모니터링을 통한 결과는 기초적인 경지단위의 자료와 모니터링 결과가 부족하여 원단위 산정이나 모델링 적용에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 밭에서 발생하는 비점오염원을 정량화하는 장기모니터링 연구가 진행되고 있으며, 인공강우 시험기를 이용한 토양유실량의 기초실험이 이루어지고 있다(신민환 등, 2009, 2010; 원철희 등, 2011a; 최용훈 등, 2009). 그러나 선행연구들은 밭에서 발생하는 비점오염원에 대한 정량화를 통한 원단위 산정과 모델링을 위한 입력자료 구축은 가능하나 실제 비점오염원을 저감시키기 위한 구체적이고 근본적인 방법을 제시하기 어렵다. 신민환 등(2011b)에 의하면 밭의 비점오염원 저감은 강우유출수의 관리와 매우 밀접하게 관련되어 있기 때문에 유출수의 수량과 유속을 감소시키고, 소류력과 운반력을 줄이는 방법을 적용하여야 한다고 하였다. Osborn (1954)은 작물을 재배하여 작물에 의해 토양 표면이 피복됨으로써 강우에 의한 토양 표면의 타격력을 감소시키고, 토양입자의 분산 및 비산을 줄여 토양유실을 억제할 수 있다고 하였다. Ghawi and Battikhi (1986)은 밭에서 벧짚을 이용하여 침투량을 증가시켜 직접유출량을 감소시켰으며, Lal (1976)의

† To whom correspondence should be addressed.  
jdchoi@kangwon.ac.kr

연구에서는 경사지에서 벧짚을 이용하면 큰 강우강도가 발생하여도 토양유실량 감소뿐만 아니라 유출량 저감에도 매우 효과적인 재료라고 하였다. 이처럼 밭의 비점오염물질을 줄이는 최적관리방안은 완충식생대와 등고선 경작, 식생밭 두렁, 멀칭, 녹비작물, 계단식 논, 식생사면 조성, 다년생 작물재배, 피복 및 경운방법 등이 있다(Garcia-Orenes et al., 2009; Jin et al., 2008; Jordan et al., 2010). 그러나 다양한 비점오염원 최적관리 방안 중 우리나라에서 이루어지고 있는 집약농업에 적합하고, 오염원의 발생원 관리를 통한 최적영농관리 방법에 관한 연구는 수행되지 못하고 있다. 신민환 등(2010)이 실내실험을 통해 피복재의 유출 및 비점오염원 저감효과를 측정하였으나, 이를 실제 영농 크기의 야채재배 밭에 적용하지 않았다. 따라서 실내실험에서 긍정적인 효과를 보인 피복재 방법을 실제 영농에 적용하여 효과를 측정하고, 최적영농관리 방법을 개발하기 위한 자료를 수집할 필요가 있다. 또한 최적관리 방안이 적용된 농경지에서 농민의 수입을 보장할 수 있는 정책적인 방안이 필요하며, 최적관리방법의 유지와 관리에 대한 필요성과 방법 및 제시를 위한 기초연구 역시 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 야채재배 밭에서 발생하는 비점오염원을 저감하기 위하여 여러 최적관리방안 중 벧짚을 이용하여 지표를 피복한 뒤 유출량과 비점오염물질 저감효과를 평가하였으며, 또한 벧짚을 이용한 최적관리방법을 적용하였을 때 작물의 생산량과 작물재배를 위한 작업시간에 미치는 영향을 비교하여 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 시험포 조성

밭에서 발생하는 비점오염원을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 6개의 시험포를 조성하였다. 각 시험포는 수준측량기를 이용하여 경사도 3%와 110 m<sup>2</sup> (가로 5 m × 세로 22 m)의 크기로 조성하였다. 시험포와 시험포 사이에는 각 시험포에서 발생하는 유출수를 분리하기 위하여 폭 0.4 m × 높이 0.2 m로 받두름을 조성하였으며, 시험포 상단 부분에도

동일한 크기의 받두름을 설치하여, 외부에서 유입되는 유출수가 유입되지 못하도록 하였다. 각 시험포 하단부에는 유출량 측정과 수질시료를 채취하기 위해 Flume과 부자식 수위계(Level gauge) 그리고 수질자동시료채취기(Auto sampler)를 설치하였다. 또한 자기우량계를 설치하여 0.2 mm 단위의 강우량을 측정하였으며, 지표를 피복하지 않은 시험포 밭에서 물의 순환을 분석하기 위한 물수지 분석을 위하여 강우량 자료와 기상청에서 측정한 최저기온과 최고기온(°C), 상대습도(%), 평균풍속(m/s), 일조시간(hr) 등의 입력 자료를 이용하였으며(기상청, 2011), 증발산량은 ETo 모델을 적용하여 산정하였다(Allen et al., 1998).

### 2.2. 작물과 피복재 선정

원철희 등(2011b)과 최용훈 등(2009)의 연구의 경우 밭에서 발생하는 비점오염원에 대한 조사를 하였으나, 밭의 오염물질에 가장 큰 영향을 미치는 영농활동(거름과 비료 사용 등)과 피복재의 적용을 통한 작물에 미치는 영향 등을 고려하지 않았다. 이에 본 연구에서는 작물과 영농활동에 미치는 영향과 작물과 피복재에 의한 피복률 등을 고려하여 피복재의 밭 적용을 고려하고자 하였다. 연구기간(2011년 4~7월) 동안 시험포에는 무를 재배하였으며, 재배방법은 일반 농민이 재배하는 관행방법과 동일하게 거름과 비료 살포 후, 트랙터를 이용하여 로타리 작업과 이랑짓기 그리고 이랑고루기 작업을 한 뒤 60 × 25 cm의 재식거리로 파종하였다. 또한 작물의 생육을 위하여 추비를 실시하였으며, 김매기와 농약살포도 일반영농 방법과 동일하게 하였다.

시험포에는 Fig. 1과 같이 두 개의 시험포(1번과 2번)는 대조구(Control) 시험을 위하여 지표를 피복하지 않았고, 다른 두 개의 시험포에(3번과 4번)는 벧농사 후 남은 잔류물(Rice straw)을 시험포의 지표면에 흩어 뿌렸으며, 나머지 두 개 시험포(5번과 6번)에는 시중에서 건설현장의 경사면에서 발생하는 토사유출을 방지하기 위한 목적으로 판매되는 벧짚거적(Rice straw mat) 제품(약 1 m × 60 m)을 구매하여 시험포의 가로(5 m) 크기에 맞게 재단한 뒤 피복하였다. 사용된 벧짚과 벧짚거적의 양은 벧짚 3,409 kg/ha (37.5

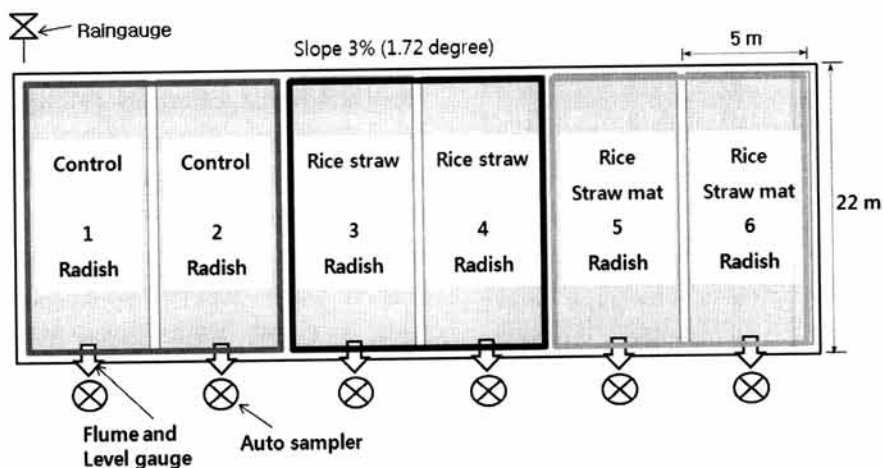


Fig. 1. Sketch of the runoff plot and monitoring equipment.



Fig. 2. Rice straw.



Fig. 3. Rice straw mat.

kg/110m<sup>2</sup>)과 3,136 kg/ha (34.5 kg/110m<sup>2</sup>)이다(Fig. 2, 3). 피복재를 적용하는데 있어서 무 작물의 경우 배추와 같이 따로 묘종을 파종하지 않고, 씨앗을 파종하여 발아하기 때문에 무 발아 및 성장에 장애가 될 것으로 우려하였으나, 적용 결과 문제가 없는 것으로 나타났다. 배추나 고추와 같이 묘종을 이용하여 작물을 정식하는 경우, 피복재를 먼저 포설하는 방법이 작물에 미치는 영향을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

지표의 피복률에 따라 밭에서 발생할 수 있는 오염부하량의 크기는 본 연구의 결과와 같이 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서 지표를 피복하고 있는 피복재의 피복율을 분석하기 위하여 작물 파종시기의 피복률을 산출하였다. 산출 방법은 디지털 카메라를 이용하여 지표를 촬영한 뒤 ArcGIS를 이용하여 피복된 면적을 산정하였다. 작물의 파종시기에 지표를 피복하지 않은 관행시험포는 피복율을 0%로 하였으며, 벧짚과 벧짚거적 시험포는 피복재의 면적을 산정하여 피복율을 산정하였다.

### 2.3. 강우유출수와 부하량 산정 및 작물의 모니터링

밭에서 발생하는 비점오염원을 조사하기 위해서는 기상청의 일기예보를 통한 현장조사 뿐 만 아니라 본 연구에서와 같이 유출량을 측정할 수 있는 수위계와 Flume 그리고 강우량을 측정하는 자기우량계를 설치하여야 밭의 오염원 조사를 정량적으로 수행할 수 있다. 이는 강우량은 지역마다 크게 다르고, 강우에 의한 비점오염원 유출특성은 매우 상이하기 때문이다. 특히 비점오염물질은 건기시 다양한 형태로 존재하고 있다가 강우가 발생하였을 때 강우유출수와 함께 유출된다. 따라서 비점오염원에 대한 연구는 조사대상 지역의 강우특성 연구가 필요하며, 강우특성을 반영하여 비점오염원 저감시설의 설계 및 용량 결정에 반영할 필요가 있다. 이에 연구지점인 춘천시의 30년 강우분석을 실시하였으며, 최근 2년간의 강우분석을 실시하여 강우량 빈도 변화를 살펴보았다. 유출량 측정의 경우 측정시간 간격이 좁을수록 정확히 분석할 수 있으며, 수질농도는 시료의 분석수가 많으면 많을수록 오차의 범위를 줄일 수 있다. 환경부(2009a)에 의하면 강우유출수 조사시 유출직후 15분~2시간 간격으로 유출량을 측정하도록 되어 있으나, 밭의 경우 강우에 의한 유출량 변화가 크기 때문에 Flume을 통해

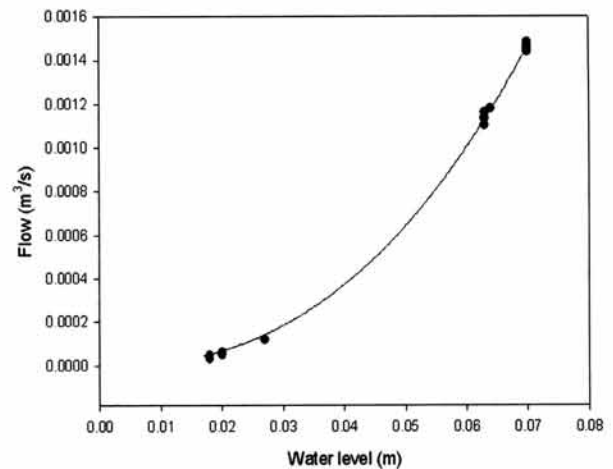


Fig. 4. Rating-curve.

발생하는 유출수를 5분 단위로 수위를 측정된 뒤 수위-유량곡선(Fig. 4)을 이용하여 유량으로 환산하였다(식 (1)). 수질분석은 강우지속시간에 따라 30분~2시간 간격으로 채취하여, 수질오염공정시험방법에 따라 SS, T-N 그리고 T-P 등을 분석하였다(환경부, 2007). 측정된 유출량과 수질농도를 이용하여 유량가중평균농도(Event mean concentration: EMC)와 오염부하량(식 (2))을 산정하였다.

$$Q = 1.639H^{2.627} \quad (R^2 = 0.993) \quad (1)$$

여기서 Q는 유량(m<sup>3</sup>/s)이고, H는 수위(m)이다. R<sup>2</sup>값이 0.993으로 매우 높아 본 수위-유량곡선 식을 이용하여 수위를 유량으로 환산하는 방법에 적합하다고 판단하였다.

$$\text{Pollutant load (kg/ha)} = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \quad (2)$$

여기서, c<sub>i</sub>는 i번째의 농도이고, q<sub>i</sub>는 구간유량, t<sub>i</sub>는  $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 에 해당하는 i번째 샘플로써 표현되는 시간 구간이다.

지표피복에 의한 무의 수확량과 초기생육현황, 김매기 소요시간과 지표피복재 적용시간 등의 조사를 통해 작업효율과 생산성 등을 비교하였다. 수확량은 무의 엽장과 엽수,

염증, 근경, 근장 그리고 근중 등을 조사하였으며, 관행시험포의 수확량을 100으로 환산하여 벧짚과 벧짚거리의 시험포의 수량지수를 산정하였다. 김매기 시간과 피복재 적용 시간은 각 시험포에서 동일한 조건(작업인원, 면적, 사용도구)에서 소요되는 시간을 측정하여 비교하였다.

**2.4. 토양특성 및 상관성 분석**

연구에 사용된 시험포의 토양분석을 위하여 각 시험포에서 지그재그형으로 10개 지점에서 약 1 kg씩 총 10개의 시료를 채취하여 혼합한 뒤 1개의 복합시료로 만들어, 각 시료에 대해 토양오염공정시험방법에 의거하여 pH, 수분함량 등의 이화학적 분석을 실시하였다(환경부, 2009b). 또한 입도분석시험(KS F 2309)과 비중시험(KS F 2308)을 통해 밭 시험포의 토성을 분석하고, 미국 농무성의 삼각좌표분류법을 이용하여 분류하였다(박춘수 등, 1999). 실험처리에 따라 산정된 유출률과 수질항목의 EMC 그리고 오염부하량의 유의적 차이를 분석하기 위하여 SAS 9.2 통계 프로그램을 이용하여 분산분석을 실시하였다. 또한 p<0.05 수준에서 Duncan의 다중범위검정(Duncan's multiple range test)을 실시하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 강우 및 토양의 특성**

연구지역인 춘천시의 30년(1982~2011년) 일 강우량 자료를 분석하였다. 또한 최근 급변하는 강수량의 변화를 살펴보기 위해 2011년의 강수량을 분석하였다. 춘천시의 30년 평균 연 강수량은 1,332.7 mm로 우리나라 전국평균 1,307.7 mm (1981~2010년)와 유사한 것으로 나타났다(기상청, 2011). 일강수량 100 mm 이상의 큰 비가 발생한 빈도는 1.5회로 2년에 3회 정도 발생하는 것으로 나타났다. 100 mm 이상의 강수는 평균 연 강수량의 약 17%를 차지하는 것으로 나타났다. 강우계급별 연 강수량은 강우계급이 커질수록 감소하는 것으로 나타났다. 춘천시의 2011년도 일강우량을 분석한 결과 예년 30년 평균보다 많은 강우량이 발

생한 것으로 조사되었다. 2011년도에는 2,000 mm 이상의 강우가 발생한 것으로 나타났으며, 특히 일강수량이 50 mm가 넘는 강우가 10번이나 발생하였고, 100 mm 이상의 강우가 3번이나 발생한 것으로 나타났다(Table 1). 즉, 30년 평균에 비하여 2011년의 연간 발생하는 총 강수량과 강우빈도, 그리고 계급별 강우량이 모두 증가한 것으로 나타났다. 따라서 2011년의 유출이나 비점오염부하는 예년보다 많았을 것으로 예상되었다. 또한 일강수량 50 mm 이상 강수량이 553.6 mm로 연 평균 강수량의 41.5%에 달한다. 반면에 오염총량관리제도에서는 50 mm 이상의 강수를 1개의 계급으로 묶어 원단위를 산정하기 위한 준비를 하고 있다. 농촌지역의 강우-유출 특성을 고려하면 농지, 특히 밭 지역의 유출은 일 강수량 50 mm 이하에서는 크지 않은 반면 50 mm 이상의 강수에서 크게 나타난다. 밭 지역의 비점오염부하 원단위는 일 강수량 50 mm 이상의 강우계급을 세분화하여 산정할 필요성을 검토해 볼 필요가 있다. 따라서 지속적인 연구를 통해 강우계급별 유출과 비점오염부하를 정량화하고 강우량에 따른 유출과 비점오염부하의 예측능력을 향상시켜 농촌지역의 수자원과 수질 관리를 효과적으로 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

시험포의 토양분석 결과 모래(Sand) 82%, 실트(Silt) 3.1%, 점토(Clay) 14.9%로 산정되었으며, 토성은 사질흙(Sandy loam)으로 나타났다. 이는 Choi et al. (1999)이 강원도 지역에서 작물재배에 사용되는 밭이 화강암풍화토 계열로 대부분 사질 및 양질사토라고 보고한 연구내용과 유사한 결과이다. 또한 pH는 5.5~5.6의 범위로 무를 재배하기 위한 pH 5.5~6.8 정도의 중성내지 약한 산성 범위에 있는 것으로 나타났다. 만약 토양산성이 강할 경우(pH 5.5 이하일 때) 망간이나 철과 같은 원소의 용탈이 많아 작물에게 해로울 수 있을 뿐 아니라 유효한 토양 미생물의 번식과 활동을 억제할 수 있다(National Institute of Crop Science, 2011).

**3.2. 유출량**

연구기간 동안 총 16회의 강우유출사상을 분석한 결과 Fig. 5와 같이 강우량은 12.8~538.2 mm 이었으며, 강우에

**Table 1.** Daily rainfall frequency analysis in Chuncheon city (1982~2011)

Year	1982~2011			2011		
	Rainfall class (mm)	Annual average rainfall (mm)	Average No. of event	Rainfall per event (mm)	Annual rainfall (mm)	No. of event
0-10	202.4	73.9	2.7	174.3	69	2.5
10-20	186.1	12.8	14.7	271.5	18	15.1
20-30	152.3	6.2	24.8	227.5	9	25.3
30-40	147.3	4.3	34.7	198	6	33.0
40-50	91.2	2.1	44.2	92.5	2	46.3
50-60	107.5	2.0	54.6	54	1	54.0
60-70	68.4	1.1	64.8	134	2	67.0
70-80	58.7	0.8	75.7	220	3	73.3
80-90	58.1	0.7	82.7	82	1	82.0
90-100	36.0	0.4	96.0	-	-	-
100-	224.9	1.5	148.3	575.5	3	191.8
Sum	1,332.7	105.6		2,029.3	114	



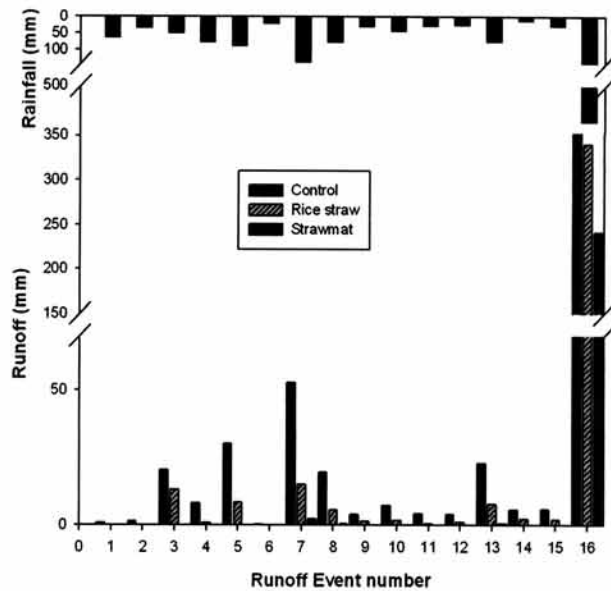


Fig. 5. Comparison of runoff with respect to experimental treatment.

의해 발생한 관행시험포의 유출량은  $0.02 \sim 39.6 \text{ m}^3$  ( $0.2 \sim 359.8 \text{ mm}$ ), 볏짚 시험포  $0 \sim 37.4 \text{ m}^3$  ( $0.001 \sim 340.4 \text{ mm}$ ), 볏짚거적 시험포에서  $0 \sim 26.6 \text{ m}^3$  ( $0 \sim 241.6 \text{ mm}$ )으로 나타났다. 이때 산정된 유출률은 관행시험포  $0.01 \sim 0.67$ , 볏짚 시험포  $0 \sim 0.63$ , 볏짚거적 시험포에서  $0 \sim 0.45$ 로 유출률이 지표피복으로 인해 감소한 것을 알 수 있었다. 볏짚을 피복한 시험포에서는 볏짚거적을 피복한 시험포보다 유출량이 크게 나타났는데, 이는 볏짚의 경우 두둑에 피복하였던 볏짚이 바람이나 영농활동에 의해 고랑으로 흘러내려 두둑에서 발생하는 유출수를 저감시키는 기능이 훼손되었기 때문으로 판단된다. 관행시험포를 기준으로 볏짚과 볏짚시험포의 유출량 저감율은 볏짚시험포에서  $5.4 \sim 99.7\%$  (평균  $70.9\%$ ), 볏짚거적시험포에서  $32.9 \sim 100\%$  (평균  $95.1\%$ ) 이었다. 이는 지표를 피복한 볏짚이 강우의 타격에너지에 의한 토립자의 이탈을 감소시키고, 지표면의 공극막힘 현상을 줄여 침투능이 높게 유지되었기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구결과는 Table 2와 같이 신민환 등(2009)이 실내인

Table 3. Comparison of runoff coefficient with respect to the treatment by Duncan's multiple range test

Index	Bare soil	Rice straw	Straw mat
mean	0.223 <sup>A</sup>	0.098 <sup>B</sup>	0.029 <sup>B</sup>

note) A, B : Mean comparison by Duncan's multiple range test at  $\alpha=0.05$ .

공간우기를 이용하여 볏짚의 직접유출량 저감효과를 분석한 결과(약 46%)보다 크게 나타났으며, 신민환 등(2011a)이 경사지 밭에 피복재와 왕겨, 톱밥 그리고 PAM 등을 이용하여 분석한 저감효과(약 4.7~81.5%)와 유사한 것으로 나타났다. 기존 신민환 등(2009)의 실내실험을 통한 연구결과는 10% 이상의 경사도와 1 m 크기의 소규모 시험포의 경사장, 그리고 1시간 동안 30 mm와 60 mm의 매우 높은 강우강도를 모의하였기 때문에 유출저감효과가 작았던 것으로 판단된다. 또한 볏짚거적에 왕겨와 톱밥 그리고 PAM 등을 이용한 연구결과는 28%의 경사도에서도 높은 유출저감을 보였기 때문에 피복재들이 작물에 악영향을 미치지 않는다면 본 연구에서 적용한 3% 정도의 밭에 적용할 경우 더욱 높은 유출저감을 보일 수 있을 것으로 보이며, 이에 대한 추가 연구를 통한 밭의 최적관리방안을 도출해야 할 것으로 판단된다.

Table 3은 16회의 모니터링 결과를 이용하여 피복재 유무에 따른 유출율의 차이를 평가한 결과이다. 강우유출사상의 평균 유출률은 관행시험포에서 0.223이며, 볏짚시험포에서 0.098, 볏짚거적시험포에서 0.029로 나타났다. 볏짚과 볏짚 거적으로 처리한 시험포의 유출률은 유의적 차이가 나타나지 않았으나, 관행시험포와는 유의한 차이를 보였다. 따라서 볏짚이나 볏짚거적으로 처리할 경우 유출량 저감에 효과적인 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3. 수질농도 및 오염부하량

각 시험포에서 발생한 강우유출수의 수질시료를 채취하여 SS, TN, TP에 대한 평균 EMC를 분석한 결과 관행시험포의 SS 농도는  $490.7 \text{ mg/L}$ , T-N  $16.2 \text{ mg/L}$ , T-P  $1.4 \text{ mg/L}$ 로 나타났으며, 볏짚시험포의 SS 농도는  $289.9 \text{ mg/L}$ , T-N  $14.6 \text{ mg/L}$ , T-P  $1.2 \text{ mg/L}$ , 볏짚거적 시험포 SS 농도는  $140.0$

Table 2. Comparison of runoff reduction rate with respect to cover material

Cover material and condition	Runoff	Reduced runoff	Reduction rate	Ref.
Straw covered (RI 30 mm/hr)	18.2 ~ 25.7 L	1.5 ~ 14.3 L	44.4 ~ 91.6%	Shin et al. (2009)
Straw covered (RI 60 mm/hr)	44.8 ~ 52.0 L	28.0 ~ 42.0 L	19.2 ~ 37.4%	
Wood shaves	$0.3 \sim 28.5 \text{ m}^3$	$0.2 \sim 23.8 \text{ m}^3$	4 ~ 30%	Shin et al. (2011b)
Straw mat	$0.3 \sim 28.5 \text{ m}^3$	$0.08 \sim 18.9 \text{ m}^3$	33 ~ 75%	
Straw mat + Sawdust and PAM or Chaff and PAM or PAM	$2.3 \sim 5.3 \text{ m}^3$	0.8 ~ 4.1 L	4.7 ~ 81.5%	Shin et al. (2011a)
Rice straw	$0.02 \sim 39.6 \text{ m}^3$	$0 \sim 37.4 \text{ m}^3$	5.4 ~ 99.7% (Ave. 70.9%)	This study
Rice straw mat	$0.02 \sim 39.6 \text{ m}^3$	$0 \sim 26.6 \text{ m}^3$	32.9 ~ 100% (Ave. 95.1%)	

RI : Rainfall Intensity

**Table 4.** Comparison of EMC with respect to the treatment by Duncan's multiple range test

Index	Bare soil	Rice straw	Straw mat
SS	490.7 <sup>A</sup>	289.9 <sup>AB</sup>	140.0 <sup>B</sup>
TN	16.215 <sup>A</sup>	14.618 <sup>A</sup>	12.050 <sup>A</sup>
TP	1.444 <sup>A</sup>	1.155 <sup>A</sup>	0.826 <sup>A</sup>

note) A, B : Mean comparison by Duncan's multiple range test at  $\alpha=0.05$ .

mg/L, T-N 12.1 mg/L, T-P 0.8 mg/L로 나타났다. 벧짚과 벧짚거적을 피복한 시험포에서 수질농도가 대체로 낮은 것으로 나타났다. 이는 피복재로 인해 거름이나 비료의 유실이 적어 수질농도에 미치는 영향이 낮은 것으로 판단된다.

Table 4는 측정된 EMC를 비교한 표이다. SS를 제외한 관행시험포와 피복시험포의 수질농도는 유의적인 차이를 보이지 않았다. 그러나 벧짚거적 피복시험포의 SS 농도는 관행시험포에 비해 유의적으로 낮게 나타났다. 나머지 수질 항목은 통계분석결과와 같이 EMC는 관행시험포와 피복재를 적용한 시험포에서 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다.

각 시험포의 강우사상별 오염부하량을 산정한 결과 관행시험포의 총 오염부하량은 SS 1,463.3 kg/ha, T-N 75.1 kg/ha, T-P 10.4 kg/ha로 나타났다. 벧짚시험포의 총 오염부하량은 SS 702.5 kg/ha, T-N 53.7 kg/ha, T-P 6.7 kg/ha로 나타났으며, 벧짚거적시험포의 총 오염부하량은 SS 295.3 kg/ha, T-N 23.8 kg/ha, T-P 4.8 kg/ha로 나타났다. 오염부하량 저감효과는 관행시험포 대비 벧짚시험포에서 SS 52.0%, T-N 28.5%, T-P 35.2%의 저감효과가 있는 것으로 나타났고, 벧짚거적시험포에서는 SS 79.8%, T-N 68.3%, T-P 53.3%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 벧짚거적을 이용하여 지표를 피복할 경우 50% 이상의 높은 저감효과를 나타낸 것으로 나타났다. 이는 지표피복으로 피복률이 증가되고, 피복재로 인해 강우타격력이 피복재에 흡수되었기 때문으로 판단된다. 또한 토립자의 이탈이 현저히 감소하여 지표의 공극 막힘현상이 줄어들었기 때문에 토양으로 침투하는 강우량이 많아진 것으로 판단된다(신민환 등, 2011b). 이처럼 영농활동에서 지표를 피복할 경우 유출량 저감뿐만 아니라 SS 농도와 같이 하천의 탁도를 증가시키는 오염물질과 부영양화의 원인이 되는 T-P 등의 오염물질을 저감시킴으로써, 강우시 토양의 유실방지와 탁수를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5는 실험처리에 따라 수질항목별 오염부하의 차이가 나타나는지 조사하였다. SS 항목에서는 관행시험포와 벧짚시험포 사이에서 유의적인 차이가 나타났으며, 벧짚시험포와 벧짚거적시험포 사이에는 유의적인 차이가 나타나지 않았다. TN 항목에서는 관행시험포와 벧짚거적시험포

**Table 5.** Comparison of pollutant loads with respect to the treatment by Duncan's multiple range test

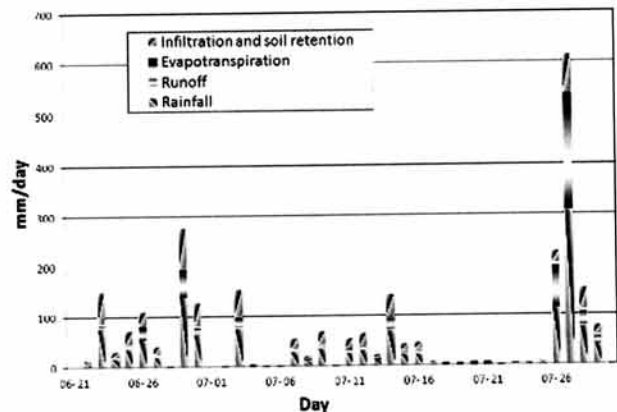
Index	Bare soil	Rice straw	Straw mat
SS	1006.0 <sup>A</sup>	483.0 <sup>B</sup>	203.0 <sup>B</sup>
TN	51.64 <sup>A</sup>	36.94 <sup>AB</sup>	16.37 <sup>B</sup>
TP	7.14 <sup>A</sup>	4.63 <sup>A</sup>	3.33 <sup>A</sup>

note) A, B : Mean comparison by Duncan's multiple range test at  $\alpha=0.05$ .

사이에서 유의적인 차이가 나타났으나, TP 항목에서는 시험처리에 따른 유의적인 차이가 없는 것으로 나타났다.

### 3.4. 관행시험포의 물수지 분석

밭에서 이루어지는 물의 순환을 분석하기 위하여 관행시험포를 기준으로 유출량과 강우량 그리고 증발산량 등을 이용하여 물수지 분석을 실시하였다. 분석기간은 Fig. 6과 같이 강우의 빈도가 높았던 6월 21일부터 작물수확기인 7월 30일까지 분석하였다. 유출량과 강우량은 자정을 기준으로 측정된 자료를 구분하였으며, 분석기간(총 40일) 동안 강우량은 1,309.6 mm, 유출량은 59.18 m<sup>3</sup>(약 538 mm), 잠재증발산량은 120.3 mm, 토양저류량은 651.3 mm로 분석되었다. 유출량은 강우량의 41.1%, 토양저류량은 강우량의 49.7%, 잠재증발산량은 강우량의 9.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 이처럼 40일 정도의 짧은 기간동안 1,000 mm 이상의 강우가 연속될 경우 밭의 지표를 통해 발생하는 유출량이 약 40%가 발생하기 때문에 본 연구에서 적용한 지표피복재 등을 피복하여 밭에서 발생하는 비점오염원을 줄이기 위한 노력이 필요함을 알 수 있다.



**Fig. 6.** Analysis of water budget.

### 3.5. 작물과 영농활동에 미치는 영향

Table 6과 같이 무의 엽장과 엽수, 엽중, 근경, 근장, 근중 등을 측정하여 상품수량을 비교한 결과 관행시험포는 2,227 kg/10a인 것으로 나타났으며, 벧짚 시험포 3,050 kg/10a, 벧짚거적 시험포 3,126 kg/10a로 나타났다. 이를 바탕으로 수량지수를 산정한 결과 관행시험포의 수량지수를 100으로 했을 때 벧짚과 벧짚거적의 시험포는 137과 140으로 증가한 것으로 나타났다. 이처럼 벧짚과 벧짚거적 시험포에서 수량지수가 관행시험포보다 높아진 것으로 나타났으며, 이는 무를 재배하기 위해 조성하였던 두둑의 유실을 방지하고, 잡초의 성장을 억제함으로써 생산성이 높아진 것으로 판단된다. 연구결과와 같이 무밭에서 지표를 피복할 경우 생산량이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 피복재로 인해 지표를 피복하는 피복률이 증가하여, 토양의 유실량을 저감시키면서 작물이 필요로 하는 영양분이 유실되지 않고, 작물이 섭취할 수 있는 양이 많아졌기 때문으로 판단된다.

**Table 6.** Comparison of radish growth property and yield at harvest

	Leaf length	Leaf number	Leaf weight	Root diameter	Root length	Root weight	Yield	Yield index
Unit	(cm)	(sheet)	(g/plant)	(cm)	(cm)	(g/plant)	(kg/10a)	-
Control Ave.	38.1	14.0	168.8	24.7	32.6	1,022.9	2,227	100
Rice straw Ave.	40.8	14.1	199.0	26.1	34.6	1,282.7	3,050	137
Straw mat Ave.	39.9	13.9	218.3	26.1	35.9	1,283.9	3,126	140

여기서 피복재가 지표를 피복한 피복율은 벧짚이 64.7%, 벧짚거적 73.7%인 것으로 나타났으며, 피복율이 높을수록 밭에서 발생하는 유사량을 저감할 수 있으며, 오염물질의 이동을 줄일 수 있다. 그러나 피복율이 너무 높을 경우 작물에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 추가 연구를 통한 최적의 피복률을 도출하여 작물의 성장에 피해가 가지 않는 범위에서의 지표 피복을 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

지표를 피복할 경우 영농활동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 각 시험포 별로 김매기와 솥아주기를 실시하면서 소요되는 시간을 측정하였다. 측정결과 벧짚 시험포에서 김매기 시간이 43.5 min/110m<sup>2</sup>로 관행시험포 40 min/110m<sup>2</sup>와 벧짚거적 시험포 30.5 min/110m<sup>2</sup>보다 오래 걸린 것으로 나타났는데, 이는 김매기 작업을 하는 동안 벧짚과 벧짚이 얽혀있지 않기 때문에 벧짚의 이동을 최소화하기 위하여 조심스럽게 작업을 하기 때문에 다른 시험포에 비해 시간이 더 소요되는 것으로 나타났다. 벧짚거적 시험포에서의 김매기 소요시간은 벧짚거적으로 인한 잡초의 발생률이 적고, 썩이 없이 손으로 제거할 수 있어 시간이 단축된 것으로 나타났다. 또한 솥아주기 시간의 경우 모두 12~13.5 min/110m<sup>2</sup> 비슷한 시간이 걸린 것으로 나타났으며, 관행시험포에서는 무씨의 발아가 적어 솥아 줄 양이 적었기 때문에 지표를 피복한 시험포들과 소요시간이 유사하게 나타났다. 이처럼 지표를 피복할 경우 밭에서 발생하는 비점오염물질을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 영농활동에도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구결과와 같은 최적관리방법을 도입하기 위해서는 농민의 관심과 노력이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지표피복재인 벧짚과 벧짚거적을 이용하여 밭에서 발생하는 비점오염원을 저감시키고자 하였다. 3% 경사도와 110 m<sup>2</sup> 면적의 무밭에서 벧짚과 벧짚거적을 이용하여 유출량 저감효과를 산정한 결과, 벧짚시험포는 평균 70.9%, 벧짚거적시험포는 평균 95.1%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 유출량과 수질농도를 이용하여 산정한 오염부하량 저감효과는 관행시험포 대비 벧짚시험포에서 SS 52.0%, T-N 28.5%, T-P 35.2%의 저감효과가 있는 것으로 나타났고, 벧짚거적시험포에서는 SS 79.8%, T-N 68.3%, T-P 53.3%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 연구결과와 같이 벧짚이나 벧짚거적으로 지표를 피복할 경우 밭에서 발생하는 유출량과 오염부하량을 저감하는데 매우 효과적인 것으로 나타났으며, 무 재배를 위한 영농활동과 작물에 미치는 영향도 긍정적으로 나타났다. 그러나

본 연구의 결과는 경작지 단위의 소규모 시험포에서 진행된 연구결과로써 대단위 규모의 영농활동에서 발생할 수 있는 문제점들을 고려하고, 추가적인 연구를 통해 밭의 비점오염물질을 저감시키기 위한 연구를 진행해야 할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 지원되는 “새만금유역 농업비점오염 저감기법 개발 연구”와 강원대학교 학술연구조성비 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 권영호, 한선임, 이준배(2002). 대청호 유역 오염부하량 산정, *상하수도학회지*, 16(5), pp. 581-595.
- 기상청(2011). <http://www.kma.go.kr/>.
- 박성천, 오창열, 진영훈, 김동수(2005). 섬진강 유역 농촌지역의 비점오염원 배출특성에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 14(11), pp. 1057-1062.
- 박춘수 외 3인(1999). *토질역학*, pp. 78.
- 신민환, 원철희, 박운지, 최용훈, 신재영, 임경재, 최중대(2011a). 경사지 밭에서 발생하는 토양유실 저감을 위한 피복재 적용, *한국농공학회지*, 53(6), pp. 129-136.
- 신민환, 원철희, 박운지, 최용훈, 장정렬, 임경재, 최중대(2011b). 지표피복재 적용을 통한 비점오염원 저감효과 분석, *한국농공학회지*, 53(4), pp. 29-37.
- 신민환, 원철희, 최용훈, 서지연, 이재운, 임경재, 최중대(2009). 인공강우기에 의한 시험포장 토양유실량 모의-강우강도, 지표면 및 경사조건 변화-, *수질보전 한국물환경학회지*, 25(5), pp. 785-791.
- 신민환, 원철희, 최용훈, 서지연, 최중대(2010). 인공강우기에 의한 밭에서의 영양물질 배출특성 모의-시비량 및 경사도 변화-, *한국농공학회지*, 52(3), pp. 31-38.
- 원철희, 신민환, 최용훈, 신재영, 박운지, 최중대(2011a). 토양유실 저감을 위한 지표피복재 적용, *수질보전 한국물환경학회지*, 27(6), pp. 848-854.
- 원철희, 최용훈, 신민환, 신동석, 강동구, 최중대(2011b). 강우시 밭의 비점오염물질 유출 특성, *수질보전 한국물환경학회지*, 27(5), pp. 572-579.
- 이병수, 정용준, 박무중, 길경익(2008). 경안천 유역 농촌지역의 비점오염원 배출 특성에 관한 연구, *수질보전 한국물환경학회지*, 24(2), pp. 169-173.
- 최용훈, 원철희, 서지연, 신민환, 양희정, 임경재, 최중대(2009). 평지밭과 고령지밭의 비점오염에 대한 분석과 비교, *수질보전 한국물환경학회지*, 25(5), pp. 682-688.
- 환경부(2007). *수질오염공정시험법*, pp. 166-167, 182-186, 191-193.

- 환경부(2009a). 강우유출수 조사 방법, pp. 2.
- 환경부(2009b). 토양오염공정시험기준, pp. 23-25, 26-31.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No. 56, Rome, Italy, pp. 300.
- Choi, J. D., Lee, C. M., and Choi, Y. H. (1999). Effect of Land Use on the Water Quality of Small Agricultural Watersheds in Kangwon-do, *Korea Water Resources Association*, 32(4), pp. 501-510.
- Garcia-Orenes, F., Cerda, A., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., and Bodi, M. B. (2009). Effects of Agricultural Management on Surface Soil Properties and Soil-water Losses in Eastern Spain, *Soil & Tillage Research*, 106, pp. 117-123.
- Ghawi, I. and Battikhi, A. (1986). Water Melon Production under Mulch and Trickle Irrigation in the Jordan Valley, *Journal of Agronomy and Crop Science*, 157, pp. 145-155.
- Jin, K., Cornelis, W. M., Gabriels, D., Schiettecatte, W., Neve, S. D., Lu, J., Buysse, T., Wu, J., Cai, D., Jin, J., and Harmann, R. (2008). Soil Management Effects on Runoff and Soil Loss from Field Rainfall Simulation, *CATENA*, 75, pp. 191-199.
- Jordan, A., Zavala, L. M., and Gil, J. (2010). Effects of Mulching on Soil Physical Properties and Runoff under Semi-arid Conditions in Southern Spain, *CATENA*, 81, pp. 77-85.
- Lal, R. (1976). Soil Erosion on Alfisols in Western Nigeria II Effect of Mulch Rates, *Geoderma*, 16(5), pp. 377-387.
- National Institute of Crop Science (2011). <http://www.nics.go.kr/>.
- Osborn, B. (1954). Effectiveness of Cover on Reducing Soil Splash by Raindrop Impact, *Journal of Soil and Water Conservation*, 9, pp. 70-76.