



## 인공강우기에 의한 밭에서의 영양물질 배출특성 모의 - 시비량 및 경사도 변화 -

### Simulation of Generable Nutritive Salts by Artificial Rainfall Simulator in field - By Varying Amount of Fertilization and Slope -

신민환\* · 원철희\*\* · 최용훈\*\* · 서지연\*\* · 최중대\*\*†

Shin, Min hwan\* · Won, Chul hee\*\* · Choi, Yong hun\*\* · Seo, Ji yeon\*\* · Choi, Joongdae\*\*†

#### ABSTRACT

Various fundamental and practical theories and technologies are needed for the development of Best Management Practices (BMPs) to manage the problems. The objectives of this paper was to investigate the effect of fertilizer and Non-point source (NPS) pollution discharges from the field. The effect of fertilizer application was measured with respect to 10 % and 20 % slopes, respectively, using artificial rainfall simulator. The effect of fertilizer application on runoff was not significant because the effect of slope and rainfall intensity were overwhelmed. Runoff from 20 % plots was 21 % larger than that from 10 % plots. While groundwater discharge from 10 % plots was about 70 % larger than that from 20 % plots. It was concluded that runoff and groundwater discharge were largely affected by slope. T-N concentration in groundwater was much higher than that in runoff for both 10 % and 20 % plots. While T-P concentration in groundwater was lower than that in runoff. It explained that T-N moved well through soil pores without adsorption and other chemical reactions but T-P was well adsorbed on the surface of soil particles.

**Keywords:** Concentration; Fertilizer; Groundwater discharge; NPS pollution; Runoff

#### 1. 서 론

비점오염원에 대한 관심이 높아지면서 비점오염원 관리를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Jung et al., 2009; Choi et al., 2009). 비점오염원은 강우에 의한 영향이 크며, 우리나라의 경우 여름철에 발생하는 집중호우로 인해 다양한 오염물질이 지표유출수를 통해 하천으로 유입된다. 유입된 오염물질은 하천의 부영양화를 초래하여 하천의 생태계를 파괴하고 하천 수질을 악화시키게 된다 (Ng Kee Kwong et al., 2002). 이러한 비점오염원은 오염물의 종류, 독성, 발생량 등이 동시다발적으로 일어나고, 강수량, 강우강도, 경사도, 유출량 등 다양한 인자에 따라 유역에 미치는 영향이 크게 달라지므로 명확히 나타내기가 어렵다 (Sharpley and Halvorson, 1994; Choi et al., 2000). 또한 하천이나 호소로 유입된 후 수중의 오염물질

을 처리하기 위해선 엄청난 양의 물을 처리해야 하기 때문에 천문학적인 예산이 요구된다 (Shin et al., 2007).

한편 비점오염원 중 농업비점오염원은 영농관리방법을 기반으로 한 오염원 (management-based pollutants)과 농경지를 기반으로 한 오염원 (land-based pollutants)으로 구분할 수 있다 (Shin et al., 2006). 영농관리방법을 기반으로 하는 오염원은 작물생장과 생산성 그리고 병해충 방제를 위해 사용되는 비료와 농약 등에 의한 오염이라 할 수 있으며, 농경지를 기반으로 하는 오염원은 여름철 집중 호우시에 발생하는 토양유실과 관련이 있다. 이 중 토양유실은 산지개간이나 무분별한 개토가 성행하고 있는 고랭지 농경지에서 여름철 집중 호우시에 자주 발생하며, 토양유실로 인한 탁수의 증가는 도시지역에 용수를 공급하는 소양강댐이나 임하댐 등의 상수원에 심각한 문제를 유발하기도 한다 (Ministry of Environment Republic of Korea, 2007). 또한 농경지에서 발생하는 질소와 인은 비점오염원의 많은 부분을 차지하며, 농경지의 질소와 인의 유실은 농경지 토양의 영양부족 뿐만 아니라 호소의 부영양화를 일으킨다 (Yang et al., 2009). 따라서 농지에서 토양유실의 방지와 이로 인해 야기되는 하천 및 호소의 오염을 최소화하기 위한 대책이나 방안이 요구되어진다. 그러나 지금까지의 대책은 오

\* 국립환경과학원 금강물환경연구소  
\*\* 강원대학교 지역건설공학과  
† Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6464  
Fax: +82-33-244-6702  
E-mail address: jdchoi@kangwon.ac.kr

2010년 4월 8일 투고  
2010년 4월 27일 심사완료  
2010년 4월 28일 게재확정

염이 발생한 후에 처리하는 방법으로 진행되어 왔으며, 농경지에서 토양유실을 저감하는 적극적인 대책이나 방안은 초기 수준에 머물러 있다. 이는 토양유실에 영향을 주는 인자가 다양하기 때문인데, 토양유실량은 강우강도, 강우지속시간, 경사 및 경사장, 토성, 토양관리, 영농방법 등에 영향을 받는다고 보고되고 있다 (Choi et al., 1997). 이중 강우량과 경사도 그리고 강우강도 등은 자연현상으로써 인위적 조절이 불가능하지만 경운방법, 경사도, 토양관리 등은 인위적 노력을 통해 제어가 가능하다. 따라서 토양유실로 인해 발생하는 수질오염을 저감하기 위해서 인위적 조절이 가능한 인자들에 대한 충분한 연구와 정량적인 연구가 필요하다 (Shin et al., 2009).

이에 본 연구에서는 실내인공강우 시험기를 이용하여 경사도와 시비방법에 따른 실험처리별 표면유출량, 기저유출량 그리고 영양물질의 배출 특성을 분석하여 강우시 농지에서 발생하는 비점오염물질에 대한 기초 자료를 확보하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 실험장치

실제 밭에서 발생하는 토양유실량과 부하량을 모의하기 위해 강우강도, 경사도 그리고 시비방법을 달리하여 표면유출량, 기저유출량 그리고 오염부하량을 조사하였다. 실험에 사용된 인공강우기 (Norton Rainfall Simulator)는 미국 인디애나주 퍼듀 대학교에 위치하고 있는 미국 농무성 산하 토양유실실험실에서 개발된 Norton Ladder-type Rainfall Simulator로 20~100 mm/hr의 강우강도를 모의할 수 있다 (Fig. 1). 실험은 토양상자의 상단부에 상단거터를 제작하여 상단거터를 통하여 유출되는 유출수를 표면유출량으로 측정하였고, 토양상자의 하단부에 철망과 필터로 구성된 하단거터 (집수시설)를 설치하여 경반 아래로 침투되어 유출되는 유출수를 기저유출량으로 측정하였다. 인공강우시험기는 1마력 펌프로 약 6 ton의 물을 저장할 수 있는 물탱크의 물을 인공강우시험기로 압송하여 인공강우기 컨트롤러에 의해 조절되는 노즐을 통해서 인공강우를 발생시킨다. 인공강우시험기는 4개의 노즐로 유입되는 물의 압력

을 일정하게 조절하기 위하여 유량조절밸브와 압력게이지를 설치하였다. 토양상자는 토양의 성분과 함수비를 동일하게 처리하기 위하여 20개의 토양상자를 실험차수마다 다르게 하여 사용하였다. 실험에 사용된 토양은 양질사토이고, 각 토양상자마다 50 cm 깊이의 흙 채움을 하였다. 흙 채움의 하단부 40 cm는 10 cm 간격으로 일정하게 다짐을 하며 흙을 채웠고, 하단부 40 cm의 흙 채움이 끝난 후에는 표면에 부직포를 덮고 충분한 양의 물을 공급하여 자연적으로 물다짐이 이루어지도록 하였다. 물다짐 후 충분한 배수가 되도록 2주간의 시간동안 방치한 뒤 표토 10 cm는 다짐 없이 흙으로 채워 실제 영농의 토양상태와 동일한 조건이 되도록 하였다.

### 2. 운전 및 분석방법

유출 모의시간 동안 충분한 유출이 발생할 수 있는 강우강도를 모의하기 위해 강원도 춘천지역에 30년에 한번 발생할 수 있는 강우인 60 mm/hr의 강우강도로 실험하였다. 실험시간은 함수비 차이에 따른 유출량과 영양물질의 발생량을 비교하기 위하여 전반 30분 후 휴식시간 30분 그리고 후반 30분 수행하였다. 실험에 사용된 토양은 삼각분류법에 의해 분류한 결과 양질사토 (Loamy Sand)로 나타났다. 토양상자는 경사도 10 %와 20 %의 두가지 종류를 이용하였으며, 비료는 화학비료 100 %, 화학비료 70 % + 유기비료 30 %, 화학비료 30 % + 유기비료 70 %, 유기비료 100 % 그리고 무처리 등으로 구분하였다. 비료처리는 농촌진흥청 배추재배 권장량을 적용하여 한강 상류에서 많이 사용되고 있는 요소비료, 용과린, 염화칼륨 그리고 유기비료를 사용하여, 처음 실험처리 후 5일, 25일, 42일, 그리고 67일 등 4차례에 걸쳐 실험기간을 달리하여 실험하였다. 시험에 사용된 단위면적당 화학비료와 퇴비사용량 그리고 실험처리별로 사용한 토양상자는 Table 1과 같다. 토양상자의 지표상태는 작물재배 없이 나지상태에서 실험을 하였고, 작물에 의한 영양물질의 섭취는 고려되지 않았다. 각 시험포에 필요한 비료와 퇴비는 정확하게 계량하여 흙 채움 마지막 단계에서 표토 10 cm의 토양과 함께 혼합하였다. 또한 실제 영농에서 살포한 양의 비료와 퇴비의 영향을 분석하기 위한 실험

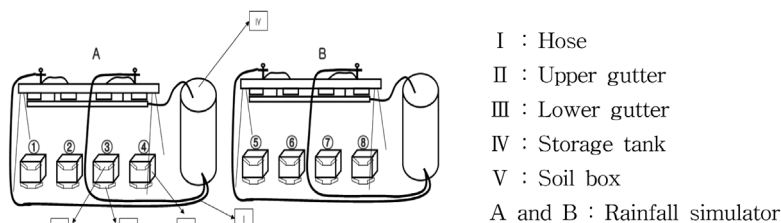


Fig. 1 Sketch of the rainfall simulator and soil-box placement (Shin et al., 2009)

**Table 1 Experimental treatments with respect to fertilizer application (Unit: g/m<sup>2</sup>)**

Chemical fertilizer (%)	Organic fertilizer (%)	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Compost	Plot No.
None (Control)		0.0	0.0	0.0	0.0	17,18,19,20
100	0	71.3	39.0	32.5	0.0	2,6,10,14
70	30	49.9	27.3	22.7	900.0	3,7,11,15
30	70	21.4	11.7	9.74	2,100.0	4,8,12,16
0	100	0.0	0.0	0.0	3,000.0	1,5,9,13

로 1차 실험을 수행하기 전에 화학비료와 유기비료 그리고 퇴비를 시비한 후 2차 실험부터는 더 이상의 추비를 하지 않고 4차까지 실험하였다. 각 노즐에서 토양상자로 분사되는 인공강우가 다른 토양상자에 영향을 미치지 않도록 토양상자의 거리를 일정하게 배치하였고, 토양상자의 측면으로 유입될 수 있는 인공강우를 배제하기 위하여 토양상자 측면을 비닐로 덮고 실험하였다. 또한 인공강우가 토양상자의 토양부분에만 영향을 미치게 하기위해 토양상자 상단부 거터에 아크릴 판을 설치하여 토양상자 상단부 거터에 표면적으로 분사되는 인공강우를 배제하였다. 유출량의 측정은 토양상자 상단부 거터로 유출되는 양을 표면유출량으로, 하단부 거터로 유출되는 양을 기저유출량으로 측정하였다. 실험은 측정 데이터간의 오차를 줄이기 위하여 4회를 반복하였다.

시료는 표면유출수와 기저유출수를 대상으로 채취하였으며, T-N과 T-P를 분석하였다. T-N은 자외선 흡광도법, T-P는 흡광도법 (아스코르빈산 환원법)으로 수질오염공정시험방법에 준하여 분석하였다 (Ministry of Environment Republic of Korea, 2001). 오염부하는 분석된 표면/기저유출수의 유출량과 농도를 이용하여 식 (1)과 같이 산정하였다. 또한 처리조건들에 따른 상호간의 상관성을 분석하기 위해 SAS Ver. 9.1을 이용하여 처리조건들 간의 Pearson 상관관계 분석을 실시하였다.

$$\text{오염부하 (kg/ha)} = \text{유출수량 (L)} \times \text{농도 (mg/L)} \times 0.1 \quad (1)$$

여기서, 오염부하는 경사와 비료처리의 동일한 조건으로 실험한 결과를 평균하였고, 0.1은 단위환산을 위한 환산계수이며, 유출수량과 농도는 각 실험 조건의 항목별 측정된 양과 수질 농도를 말한다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 인공강우량의 보정

4개의 노즐로부터 분사되는 강우량을 균일하게 60 mm/hr

**Table 2 Result of the rainfall simulator calibration using by rain gauges**

Rainfall Simulator Location of rain gauge	Rainfall Simulator A (mm / 60 min)				Rainfall Simulator B (mm / 60 min)			
	Nozzle 1	Nozzle 2	Nozzle 3	Nozzle 4	Nozzle 1	Nozzle 2	Nozzle 3	Nozzle 4
Up-left	59.0	58.0	60.0	51.0	60.0	58.0	60.0	60.0
Up-right	59.0	60.0	60.0	52.0	61.0	56.0	61.0	57.0
Down-left	60.0	62.0	59.0	53.0	61.0	59.0	59.0	60.0
Down-right	62.0	59.0	60.0	50.0	60.0	57.0	60.0	62.0
Average	60.0	59.8	59.8	51.5	60.5	57.5	60.0	59.8

강우강도로 맞추기 위해 실험 전 강우보정을 하였다. 강우보정을 위한 강우강도 측정방법은 각 노즐로부터 분사되는 인공강우가 토양상자 표면에 균일하게 분사되는지 조사하기 위하여 노즐 아래의 4곳에 비커를 이용하여 강우량을 측정하여 강우강도로 환산하였다. 인공강우기에서 분사되는 강우량은 Table 2에서 보는바와 같이 노즐 4에서 분사되는 강우가 다른 노즐에서 분사되는 강우에 비하여 그 양이 약 15 % 가량 적게 나타났다. 이는 물을 압송하는 압력이 노즐에 균등하게 전달되지 않아 각각의 노즐에서 발생하는 분사량의 미세한 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 실험 오차를 줄이기 위해 실험 전 강우보정 과정을 여러 차례 반복한 결과 각 노즐의 분사량이 동일한 강우강도로 나타났기 때문에 측정된 값을 강우강도로 사용하였고, 결과에서는 다른 노즐에서 분사되는 강우량과 같은 모의를 하기 위하여 해 동일한 양으로 보정하여 이용하였다.

#### 2. 표면유출량

1차 실험 5일전에 화학비료와 유기비료 그리고 퇴비를 시비한 후, 2차 실험부터는 더 이상의 추비를 하지 않고 총 4차례에 걸쳐 인공강우 실험을 하였다. Fig. 2는 경사도 10 %와 20 %에서 발생한 전반기 (Dry condition runoff)와 후반기 (Wet condition runoff)의 표면유출량을 나타낸 그래프이다. 표면유출량을 측정된 결과 경사도가 20 %일 때의 전+후반기 평균 표면유출량 (48.60 L)은 경사도 10 %일 때의 전+후반기 평균 표면유출량 (38.39 L)보다 약 21 % 정도 더 많이 발생하였다. 이는 Smith et al. (2007)이 평지밭과 경사진 고랭지 밭에서 실험한 결과와 유사한 결과이며, 경사도의 차이에 따라 유출량이 증가하면서 발생하는 토양유실량도 증가할 것으로 판단된다. 10 % 경사도의 전반기 평균 표면유출량 (16.48 L)은 20 % 경사도의 전반기 평균 표면유출량 (22.15 L)보다 약 25.6 % 적게 발생하였다. 경사도가 클수록 초기유출량이 많아짐을

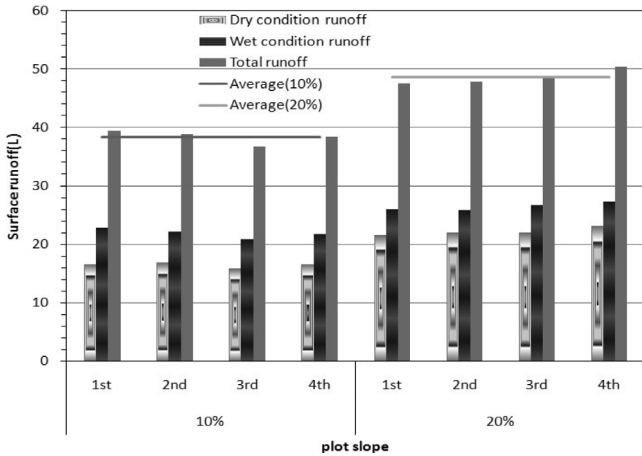


Fig. 2 Surface runoff from 10 % and 20 % plots

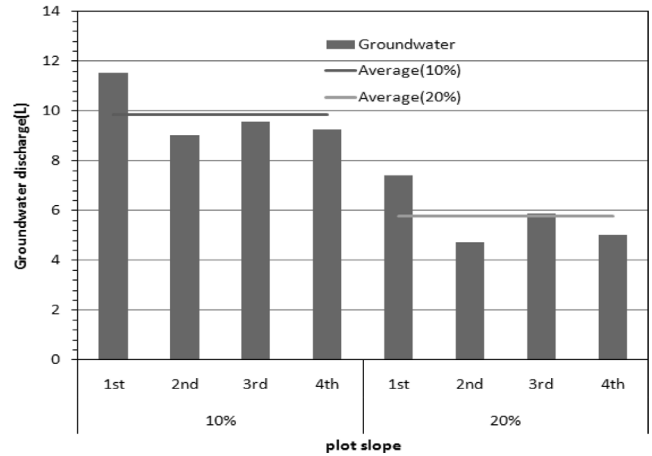


Fig. 3 Groundwater discharge from 10 % and 20 % plots

알 수 있었고, 토양이 건조한 상태라도 강우가 발생하였을 때 경사도의 차이에 따라 발생하는 유출량에도 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 10 % 경사도의 후반기 평균 표면유출량 (21.91 L)은 20 % 경사도의 후반기 평균 표면유출량 (26.45 L)보다 약 17.1 % 적게 발생하였다 (Fig. 2). 전반기의 건조한 토양과 후반기의 젖은 토양에서 발생한 표면유출량을 비교하였을 때 표면유출량은 토양의 수분흡수 상태와 경사도에 따라 유출량의 차이가 발생한 것을 알 수 있었다. 이는 경사도의 증가로 인한 유출유속의 증가와 토양침투 시간의 감소로 표면으로 발생하는 유출량이 증가한 것으로 판단된다.

경사도 10 %와 20 %에서 후반기의 평균 표면유출량은 전반기의 평균 표면유출량보다 각각 32.9 %와 19.4 % 증가하였다. 이는 후반기 시험시 토양의 함수비 증가와 토양표면의 미세립자로 인한 토양공극의 막힘 현상으로 인해 유출량의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 즉 동일한 경사도라도 토양이 차지하고 있는 함수비의 차이에 따라 유출량에 미치는 영향이 달라짐을 알 수 있으며, 실제 고랭지 경작지를 고려할 경우 강우 후 선행무강우일수가 적으면 토양함수비의 증가로 인한 유출수량의 증가와 함께 토양유실량도 증가할 것으로 예상된다. 따라서 약 67.7 % 유사량 저감효과를 보인 벚짚 피복 방법 (Shin et al., 2009)과 polyacrylamides (PAM)을 토양에 적용하여 최대 89 %의 토양유실량을 저감한 방법 (Choi et al, 2009) 등을 이용하여 경작지에서 발생하는 토양유실량을 저감시켜야 할 것으로 판단된다.

### 3. 기저유출량

Fig. 3은 경사도 10 %와 20 %에서 발생한 기저유출량 (Groundwater)을 나타낸 그래프이다. 경사도 10 %일 때의 평

균기저유출량 (9.85 L)은 경사도 20 %일 때의 평균기저유출량 (5.77 L) 보다 약 70 % 정도 많이 발생되었다. 경사도 10 %에서 발생한 9.85 L의 기저유출량은 1시간 동안 강우가 발생하였을 때 토양으로 침투하여 발생한 양으로써 총 강우의 약 15 %에 해당하는 양이다. 또한 경사도 20 %의 기저유출량 보다 경사도 10 %에서 기저유출량이 많이 발생하였다. 이는 경사도가 낮을 경우 유출유속의 감소와 이로 인한 지표면 체류 시간의 증가로 침투량이 증가한 것에 기인된다. 여기서 10 %와 20 % 경사의 1차 시험에서 발생한 기저유출량은 2~4차 시험에서 발생한 기저유출량보다 많이 발생하였다. 이는 1차 시험을 수행하기 전 토양다짐과 함수비 조건을 동일하게 맞춰주기 위해 공급하였던 물의 양이 자연적인 다짐과 침투가 채 이루어지지 않은 상태에서 시험을 수행하여 발생한 문제로 판단된다.

### 4. 오염물질 농도

Fig. 4는 경사도 10 %와 20 %에서 발생한 전반기와 후반기의 표면유출수와 기저유출수의 T-N 농도를 나타낸 그래프이다. 4차례에 걸쳐 인공강우 시험을 통해 발생한 표면유출수와 기저유출수의 T-N 농도는 전·후반기의 표면유출수 평균농도 (4.8 mg/L)보다 기저유출수의 평균 T-N 농도 (36.8 mg/L)가 더 높게 나타났다. 이는 질소가 물에 용해되어 침투수와 함께 기저유출로 배출되었기 때문으로 판단된다. 또한 전·후반기의 표면유출수 평균 T-N 농도는 경사도가 10 %에서 20 %로 증가함에 따라 T-N의 농도 변화가 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 경사도가 10 %에서 20 %로 증가함에 따라 표면유출량은 증가하지만 표면유출수의 T-N 농도는 경사에 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

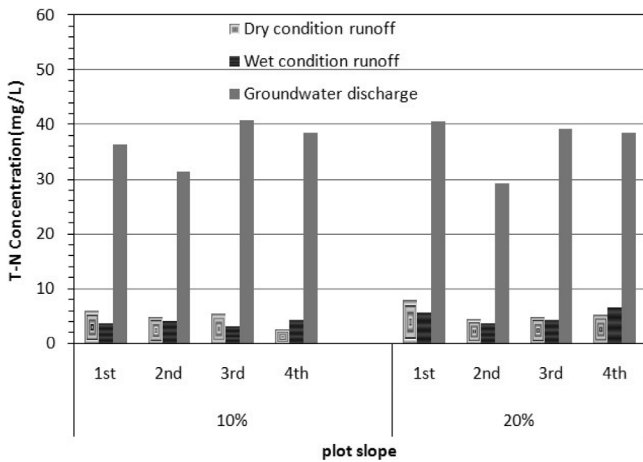


Fig. 4 T-N concentrations from 10 % and 20 % plots

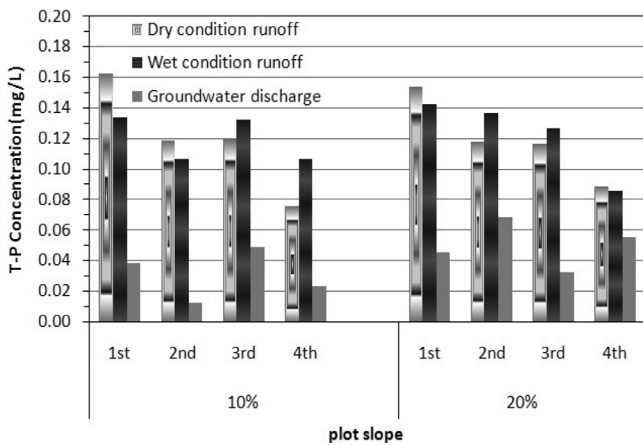


Fig. 5 T-P concentrations from 10 % and 20 % plots

인공강우 시험시 Table 1과 같이 각 토양상자마다 화학비료와 유기비료 그리고 퇴비를 다르게 하여 실험을 실시하였으나, 비료처리가 표면유출량과 기저유출량에 미치는 영향이 적으므로 나타났다. 이러한 결과는 Faucette et al. (2004)이 다양한 퇴비처리와 토양을 피복 처리하여 실험한 뒤 유출량에 대하여 실험한 결과와 상반된 결과이다. 이는 본 연구에서 수행한 실험의 경우 경사도의 영향이 크고, 비료처리의 양이 많지 않아 영향이 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다. 차후 연구에서는 충분한 비료와 퇴비를 살포 한 뒤 발생하는 오염부하에 대한 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 경사도 10 %와 20 %에서 발생한 전반기와 후반기의 표면유출수와 기저유출수의 T-P 농도를 나타낸 그래프이다. 경사도 10 %와 20 %에서 기저유출수 평균 T-P 농도 (0.031 mg/L와 0.050 mg/L)는 전·후반기 표면유출수의 T-P 농도 (0.119~0.123 mg/L)보다 낮게 나왔다. 이는 많은 양의 인 (P)이 토립자에 흡착되어 토양유실과 함께 표면유출수에 유

출되었고, 나머지 인은 침투되어 기저유출로 유출되는 과정에서 토양에 흡착되기 쉬운 인의 특성 (Kim et al., 2004)에 따라 토양에 흡착되어, 매우 적은 양의 인만이 기저유출로 발생한 것으로 판단된다. 표면유출수의 전·후반기 T-P 농도는 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 인 (P)이 토양에 흡착되는 성질 때문에 표면유출수와 함께 발생하는 토립자의 유실량과 밀접한 관계가 있어, 실험처리 과정에서 인 성분이 토양상자에 균일하게 분포가 되어 있지 않았기 때문으로 판단되며, 동일한 양의 농도가 포함되어 있는 토양이라도 강우에 의해 발생하는 토양 유실량 차이에 따라 농도의 변화가 클 것으로 사료된다.

### 5. 오염부하

Fig. 6은 경사도 10 %와 20 %에서 발생한 전반기와 후반기의 표면유출수와 기저유출수의 T-N 오염부하를 나타낸 그래프이다. 경사도 10 %의 표면유출수에 대한 T-N의 전·후반기 오염부하는 각각 7.76 kg/ha와 8.46 kg/ha이고, 경사도 20 %의 표면유출수에 대한 T-N의 전·후반기 오염부하는 각각 12.35 kg/ha와 13.58 kg/ha로 조사되었다. 기저유출수의 경우 경사도 10 %와 20 %의 T-N 오염부하는 각각 38.78 kg/ha와 22.40 kg/ha로 표면유출수의 전·후반기 오염부하보다 크게 나타났다. 이는 경사도 10 %와 20 %의 기저유출량은 표면유출량보다 적었지만 (Fig. 2, 3 참조), 기저유출수의 T-N 농도가 매우 높았기 때문에 기저유출수의 T-N 오염부하량이 크게 산정되었다. 기저유출수의 오염부하량은 20 %의 경사도에서보다 10 %의 경사도에서 큰 경향을 보였는데, 이는 표면유출수와 기저유출수의 농도에는 큰 차이가 없었지만 기저유출량이 많아 오염부하에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행한 실내인공강우시험은 시험포가 작기 때문에 실제 영농현장과 다르고, 자연상태에서 발생하는 지하침투량과 다를 수 있으나, 이상의 결과에 기초할 때 사질토 밑에서 강우시 발생하는 T-N 부하는 표면유출 보다 지하로 침투하여 인근수계에 영향을 미칠 수 있는 기저유출로 발생하는 부하가 더 심각한 문제를 야기할 것으로 판단된다 (Choi et al., 1999; Schilling and Zhang, 2004).

Fig. 7은 경사도 10 %와 20 %에서 발생한 전반기와 후반기의 표면유출수와 기저유출수의 T-P 오염부하를 나타낸 그래프이다. T-P 오염부하는 T-N 오염부하와 달리 기저유출수의 오염부하보다 표면유출수의 오염부하가 큰 것으로 나타났다. 경사도 10 %의 표면유출수에 대한 T-P의 전·후반기 오염부하는 각각 0.198 kg/ha와 0.263 kg/ha로 나타났고, 경사도 20 %의 표면유출수에 대한 T-P의 전·후반기 오염부하는 각각 0.263 kg/ha와 0.325 kg/ha로 나타났다. 기저유출수의

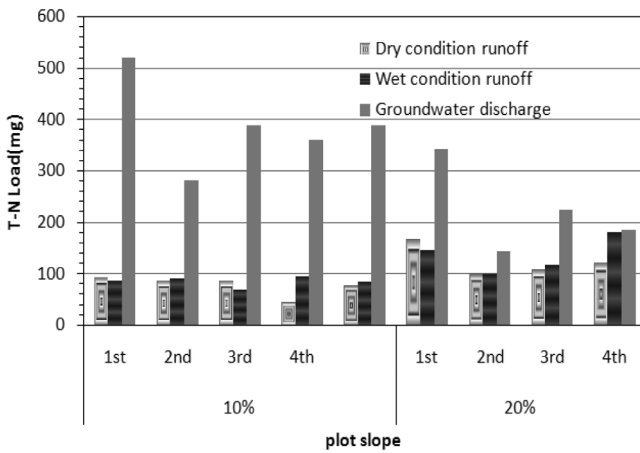


Fig. 6 T-N loads from 10 % and 20 % plots

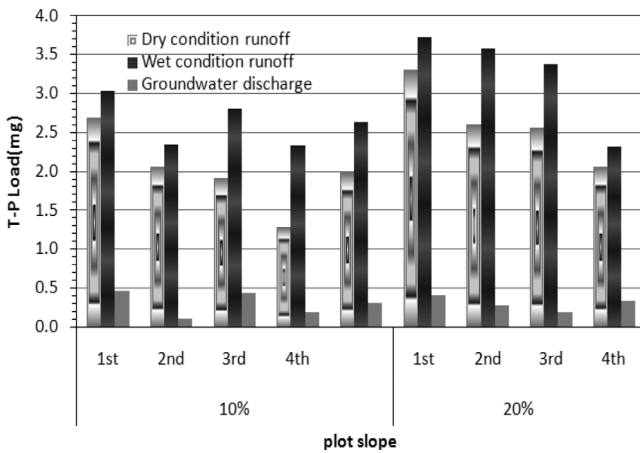


Fig. 7 T-P loads from 10 % and 20 % plots

경사도 10 %와 20 %의 T-P 오염부하는 각각 0.029 kg/ha와 0.030 kg/ha로 표면유출수의 전·후반기 오염부하보다 크게 나타났다. 이는 농도에 의한 차이보다 경사도에 따른 표면유출량의 크기 차이로 판단된다. 따라서 T-P 항목의 오염부하를 줄이기 위해서는 강우시 지표면으로 발생하는 유출수와 토양유실을 줄여야 할 것으로 판단된다.

### 6. 통계분석

실내인공강우기를 이용하여 경사도와 시비방법에 따라 T-N과 T-P농도에 따른 밭에서 발생하는 표면유출량과 기저유출량 그리고 오염부하량과의 상관관계를 분석하였다. 분석은 경사도에 따라 전반기에 발생한 유출량과 농도의 관계, 후반기에 발생한 유출량과 농도의 관계, 기저유출량과 농도의 관계를 상관분석 하였다. 상관계수는 -1에서 +1까지의 값을 갖는데, -1 또는 1의 관계를 갖는 경우 완전상관이라고 하며 0인 경우는 무

Table 3 Pearson correlation analysis of the experimented treated

Dry Condition	Direct runoff	slope	T-N	T-P	T-N pollutant	T-P pollutant
Direct runoff	1	<b>0.984**</b>	0.242	-0.086	0.660	0.485
slope		1	0.315	0.003	0.710*	0.567
T-N			1	<b>0.800**</b>	<b>0.879**</b>	<b>0.835**</b>
T-P				1	0.537	<b>0.820**</b>
T-N pollutant					1	<b>0.852**</b>
T-P pollutant						1
Wet Condition	Direct runoff	slope	T-N	T-P	T-N pollutant	T-P pollutant
Direct runoff	1	<b>0.963**</b>	0.686	-0.050	<b>0.821**</b>	0.457
slope		1	0.590	0.085	0.742*	0.568
T-N			1	-0.512	<b>0.975**</b>	-0.115
T-P				1	-0.419	<b>0.862**</b>
T-N pollutant					1	0.033
T-P pollutant						1
	Groundwater	slope	T-N	T-P	T-N pollutant	T-P pollutant
Groundwater	1	<b>-0.895**</b>	0.195	-0.545	<b>0.942**</b>	0.255
slope		1	0.013	0.587	-0.714*	0.017
T-N			1	-0.057	0.393	0.421
T-P				1	-0.363	0.587
T-N pollutant					1	0.491
T-P pollutant						1

\* and \*\* are statistically significant at  $p < 0.05$  (\*) and at  $p < 0.01$  (\*\*), respectively

상관이라고 한다. Won et al. (2009)에 의하면 상관계수의 절대값이 0.6 이상일 경우 상관관계가 높다고 말하며 0.3 이하는 상관관계가 낮다고 하였다. 상관분석결과 표면유출량과 경사도는 0.984의 가장 높은 양의 상관관계를 나타냈고, T-N (Dry runoff) 농도와 T-P (Dry runoff) 농도, T-N (Dry runoff) 농도와 T-P (Dry runoff) 오염부하 간의 상관관계는 유의수준 1 %에서 0.8 이상의 높은 양의 관계를 나타냈다. 또한 전반기와 후반기 모두에서 동일한 수질항목간의 농도와 오염부하 상관관계도 0.8 이상의 높은 상관관계를 나타냈다. 동일한 수질항목간의 농도와 오염부하 상관관계가 높은 것은 오염부하의 경우 유출량과 농도의 곱으로 산정되는 결과로서 유출량과 농도의 변화에 영향을 받는 것은 당연한 결과로 여겨진다. 후반기의 표면유출량도 전반기의 표면유출량과 동일하게 경사도와 상관관계가 0.963으로 높은 것으로 나타났고, T-N (Wet runoff) 오염부하와도 0.821로 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 기저유출량은 경사도와 음의 상관관계가 높은 것

으로 나타났고, T-N (Wet runoff) 오염부하와도 양의 상관관계로 높게 나타났다. 결과적으로 유출량은 모두 경사도에 의한 영향이 큰 것으로 나타났고, 동일한 수질항목간의 농도와 오염부하의 상관관계가 크기 때문에 밭에서 발생하는 오염부하량을 줄이기 위해선 유출량뿐 만 아니라 밭에서 발생하는 수질 농도에 의한 영향도 고려하여 수질오염에 미치는 영향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구는 실내인공강우 시험기를 이용하여 탁수를 유발하는 경사지 밭의 토양유실에 대한 기초자료를 확보하기 위하여 강우강도와 경사도 그리고 시비방법에 따른 표면유출량, 기저유출량 그리고 오염부하량의 배출을 측정하고 이를 분석하였다.

연구결과 경사도가 20 %일 때의 표면유출량은 경사도 10 %일 때의 표면유출량보다 약 21 % 정도 더 많이 발생하였고, 경사도 10 % 경사도 일 때의 기저유출량이 20 % 경사도 일 때의 기저유출량보다 약 70 % 많이 발생되었다. 이는 경사도가 클수록 표면유출수의 유속이 증가되어 유출량이 증가되고, 토양표면의 미세립자로 인해 토양 공극의 막힘 현상으로서 토양의 침투량이 감소되는 것으로 판단된다. 또한 경사도 10 %와 20 %에서 발생한 T-N 농도는 표면유출수보다 기저유출수의 T-N 농도가 더 높게 나타났다. 이는 질소가 물에 용해되어 침투수와 함께 기저유출로 배출되었기 때문으로 판단된다. 또한 기저유출수의 T-P 농도는 표면유출수의 T-P 농도보다 적게 나타났다. 이는 많은 양의 인이 표면유출수에 의해 유출되었고, 잔류 인은 침투되어 기저유출로 유출되는 과정에서 토양에 흡착되어, 매우 적은 양의 인만이 기저유출로 발생한 것으로 판단된다. 상관분석 결과 유출량은 모두 경사도에 의한 영향이 큰 것으로 나타났고, 동일한 수질항목간의 농도와 오염부하의 상관관계가 크기 때문에 밭에서 발생하는 오염부하량을 줄이기 위해선 유출량뿐 만 아니라 밭에서 유출되는 농도를 저감시켜야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 화학비료와 유기비료 그리고 퇴비의 양을 다르게 처리하여 실험하였으나, 비료처리 양이 적어 수질농도에 미치는 영향이 크게 나타나지 않았기 때문에 충분한 비료와 퇴비를 살포하여 영양물질 배출특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 논문은 환경부 Eco-Star 사업단의 효율적인 농촌비점 오염원 관리기술개발 과제의 일환으로 수행되었기에, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. Kim, H. S., J. S. Kim, Y. I. Kim, and B. H. Cheong, 2004. Analysis of the Characteristics of Nutrients Loading and the Water Purification Function in the Paddy-fields. *Journal of KCID* 11(1): 36-44 (in Korea).
2. Choi, B. S., J. E. Lim, Y. B. Choi, K. J. Lim, J. D. Choi, J. H. Joo, J. E. Yang, and Y. S. Ok, 2009. Applicability of PAM (polyacrylamide) in Soil Erosion Prevention: Rainfall Simulation Experiments. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 28(3): 249-257 (in Korean).
3. Choi, J. D., C. M. Lee, and Y. H. Choi, 1999. Effect of Land Use on the Water Quality of Small Agricultural Watersheds in Kangwon-do. *KWRA* 32(4): 501-510 (in Korean).
4. 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).
5. Choi, Y. H., C. H. Won, J. Y. Seo, M. H. Shin, H. J. Yang, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2009. Analysis and Comparison about NPS of Plane Field and Alpine Field. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(5): 682-688 (in Korean).
6. Faucette, L. B., L. M. Risse, M. A. Nearing, J. W. Gaskin, and L. T. West, 2004. Runoff, erosion, and nutrient losses from compost and mulch blankets under simulated rainfall, *Journal of Soil & Water Conservation* 59(4): 154-160.
7. Jung, J. W., K. S. Yoon, S. G. Yoon, W. J. Choi, W. Y. Choi, Y. J. Huh, K. M. Cho, and J. J. Hong, 2009. Evaluation of Effective Rainfall Ratio Method for Estimating Unit Load from Paddy Fields. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(6): 849-854 (in Korean).
8. Ministry of Environment Republic of Korea, 2001. *Determination of water pollution process*.
9. Ministry of Environment Republic of Korea, 2007. *Management Plan of Alpine farmland in Soyanggang Dam watershed*.
10. Ng Kee Kwong, K. F., A. Bholah, L. Volcy,, and K.

- Pynee, 2002. Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty caly loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius. *Agriculture Ecosystems & Environment* 91: 147-157.
11. Schilling, K. and Zhang, Y. K., 2004. Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA. *Journal of Hydrology* 295: 305-316.
  12. Sharpley, A. N., and Halvorson, A. D., 1994. The Management of Soil Phosphorous Availability and its Impact on Surface Water Quality In R. Lal and B. A. Stewart, eds., *Soil Processes and Water Quality (part of the series, Advance in Soil Science)*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
  13. Shin, Y. C., C. W. Lyou, Y. H. Choi, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2006. Pollutant Load Characteristics by Baseflow in a Small Agricultural Watershed. *Journal of korean society on Water Quality* 22(2): 244-249 (in Korean).
  14. Shin, M. H., C. H. Won, Y. H. Choi, J. Y. Seo, J. W. Lee, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2009. Simulation 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).
  15. Shin, Y. C., M. H. Shin, Y. K. Kim, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2007. Estimation of Streamflow Discharges using Kajiyama Equation and SWAT Model. *Journal of KCID* 14(1): 41-49 (in korea).
  16. Smith, D. R., E. A. Warnemuende,, C. Huang, and G. C. Heathman, 2007. How does The First Year tilling a Long-Term No-Tillage Field Impact Soluble Nutrient Losses in Runoff, *Soil & Tillage Research* 95: 11-18.
  17. Won, C. H., Y. H. Choi, J. Y. Seo, K. C. Kim, M. H. Shin, and J. D. Choi, 2009. Determination of EMC and Unit Loading of Rainfall Runoff from Forestry-Crops Field. *Journal of korean society on Water Quality* 25 (4): 615-623 (in Korean).
  18. Yang, J. L., G. L. Zhang,, X. Z. Shi,, H. J. Wang,, Z. H. Cao, and C. J. Ritsema, 2009. Dynamic changes of nitrogen and phosphorous losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan Basin, Southwest China. *Soil & Tillage Research* 105: 292-299.