

실내인공강우기를 이용한 경사지 발의 토양유실량과 오염부하 모의

Simulation of generable muddy water quantity and pollutant loads in sloping field using artificial rainfall simulator

신민환*, 최용훈**, 서지연***, 이재운****, 최종대*****

Min hwan Shin, Yong hun Choi, Ji yeon Seo, Jae-Woon Lee, Joongdae Choi

Abstract

Using artificial rainfall simulator, the soil loss, which is deemed as most cause of muddy water problem among Non-point source(NPS) pollutant, was studied by the analysis of direct runoff flow, groundwater runoff, and groundwater storage properties concerned with rainfall intensity, slope of area, and land cover. The direct runoff showed increasing tendency in both straw covered and bared boxes which are 5%, 10%, and 20% sloped respectively. Also the direct runoff volume from straw covered surface boxes were much lower than bared surface boxes. It's deemed as that the infiltration capacity of straw covered surface boxes were increased, because the surface sealing by fine material of soil surface didn't occurred due to the straw covering. Under the same rainfall intensity and slope condition, 2.4 ~8.2 times of sediment yield were occurred from bared surface boxes more than straw covered surface boxes. The volume of infiltrated were increased due to straw cover, the direct runoff flow were decreased with decreasing of tractive force in surface. To understand of relationship the rate of direct runoff flow, groundwater runoff, and groundwater storage by the rainfall intensity, slope, and land cover, the statistical test was performed. It shows good relationship between most of factors, expect between the rate of groundwater storage and rainfall intensity.

Key words: Soil loss, Muddy water, NPS pollutant

1. 서론

점오염원은 하수도와 수처리 시설 등의 오염원 저감시설을 운영함으로써 목표로 하는 오염저감 대책이 가능하다(국립환경연구원, 1992). 그러나 비점오염원의 경우 처리방법이 어려워 비점오염부하의 상대적인 비중이 점오염원에 비해 점차 커져가고 있다. 이러한 비점오염부하를 저감시키기 위한 연구는 강우시 초기유출수(First flush)를 처리하기 위한 장치형 도시비점오염원 처리시설에 중심을 두고 수행되고 있다. 토양유실로 인해 하천을 흙탕물로 만들고, 수생태를 파괴하는 농업비점오염원에 관한 연구는 상대적으로 수행되지 않고 있다. 농업비점오염원의 큰 비중을 차지하

* 정회원 · 금강물환경연구소 · E-mail : uv2000wind@korea.kr
** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 대학원생 · E-mail : tlemjin@nate.com
*** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 대학원생 · E-mail : tjwdus01@nate.com
**** 비회원 · 금강물환경연구소 · E-mail : leejaew@korea.kr
***** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · E-mail : jdchoi@kangwon.ac.kr

고 있는 탁수는 집중 호우시 산지개간, 하천공사, 고랭지 경작지 등의 지표피복이 되어 있지 않은 지역에서 발생하는 토양유실에 의해 많이 발생하며, 이는 수도권 일대에 용수공급을 위한 상수원으로서 매우 중요한 역할을 하고 있는 소양강댐 상류에 심각한 문제를 안겨주고 있다(환경부, 2007). 탁수의 근본적인 원인인 경사농지에서 발생하는 토양유실을 방지하고 하천 및 호소의 수질 오염을 최소화하기 위해서는 토양유실에 영향을 미치는 인자를 정확히 파악하여, 토양유실에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 토양유실 저감대책방안이 개발되어야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 실내인공강우 시험기를 이용하여 강우강도, 경사도, 지표피복에 따른 직접유출량, 기저유출량, 토양저류량 그리고 유사부하의 배출을 측정하고 이를 분석하여 탁수를 유발하는 경사지 밭의 토양유실에 대한 기초 자료를 확보하는 데 있다.

2. 연구방법

실내인공강우 시험기와 토양상자를 이용하여 강우강도, 경사도 그리고 지표피복의 조건을 달리 하여 직접유출량, 기저유출량, 토양저류량을 측정하였다. 실험에 사용된 토양상자는 실험기간동안 토양상자가 부식되는 것을 막기 위해 아연도금 철판을 이용하여 1.00 m × 1.00 m × 0.65 m (L×W×H) 크기로 제작하였다. 토양상자의 상단부에 상단거터틀 제작하여 상단거터를 통하여 유출되는 유출수를 직접유출량으로 측정하였고, 토양상자의 하단부에 철판과 필터로 구성된 하단거터(집수시설)를 설치하여 경반 아래로 침투되어 유출되는 유출수를 기저유출량으로 측정하였다. 또한 경사도와 벚짚 피복을 처리하여 경사도와 지표피복(벚짚)에 따른 유출량과 오염부하 배출량을 측정하였다. 토양상자의 경사도는 5%, 10% 그리고 20%로 3처리를 하였으며, 벚짚거적은 시중에서 구입할 수 있는 제품을 구입하여, 토양상자의 규격에 맞게 1 m × 1 m의 크기로 토양상자를 덮을 수 있도록 일정하게 재단하였다. 또한 강우강도에 따른 직접유출량과 기저유출량의 변화를 측정하기 위하여 30 mm/hr와 60 mm/hr의 강우강도로 2처리를 하여 실험하였다. 유사량은 토양상자의 상단부 거터로부터 유출되는 직접유출량을 No. 200체(입경 0.074 mm)를 이용하여 체에 남은 유사의 무게를 측정하였고, 기저유출량의 경우 장기간에 걸쳐 이동되기 때문에 인공강우 실험이 종료된 후 24시간에서 1주일 정도의 충분한 시간을 두고 측정하였다. 처리조건에 따라 유출량 저감에 미치는 효과를 분석하기 위해 물수지 분석을 하였고, 처리조건들에 따른 상관성을 알아보기 위해 SAS Ver. 9.1을 이용하여 처리조건들 간의 Pearson 상관관계 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지표피복과 경사도에 따른 직접유출량

경사도에 따른 직접유출량을 비교하기 위하여 경사도 5%와 10% 그리고 20%의 시험포에 벚짚을 피복하고 직접유출량의 변화를 측정하였다. 토양상자의 피복율은 나지상태 일 때 0%이고, 벚짚을 1점으로 피복했을 때 인위적으로 피복율을 산정한 결과 평균 65.5% 이었다. 피복율이 0%이고 강우강도가 30 mm/hr일 때 토양상자의 경사도가 5%와 10% 그리고 20%로 증가할수록 직접유출량은 18.2 L(유출률 60.81%)와 23.0 L(유출률 77.07%) 그리고 25.7 L(유출률 85.65%)로 증가하였다. 그리고 피복율 0%이고 강우강도가 60 mm/hr일 때는 44.8 L(유출률 75.21%)와 47.8 L(유출률 80.07%) 그리고 52.0 L(유출률 87.40%)로 점차 증가하였다. 토양상자 위에 벚짚을 덮고 직접유출량을 측정하였을 때에는 토양상자의 경사가 5%와 10% 그리고 20%로 증가할수록 강우강도 30 mm/hr일 때 1.5 L(유출률 5.04%)와 9.0 L(유출률 30.21%) 그리고 14.3 L(유출률 47.56%)로 증

가하였다. 그리고 강우강도 60 mm/hr일 때 28.0 L(유출률 46.93%)와 36.5 L(유출률 61.19%) 그리고 42.0 L(유출률 70.61%)로 점차 증가하였다. 이는 평탄한 밭에서 보다 경사진 고랭지 밭 등에서 토양유실이 더 심각하고(Smith, 2007), 강우에 따라 발생하는 토양유실의 양이 더 많아 짐을 짐작할 수 있다. 또한 벚짚을 덮었을 경우에 직접유출량이 감소하는 것은 지표피복으로 인하여 토양표면이 미세립자로 인한 표면막힘현상(Surface sealing 또는 crust)이 발생하지 않아 침투능의 감소 폭이 작았기 때문으로 판단된다.

3.2 지표피복과 경사도에 따른 기저유출량과 토양저류량

피복율이 0%이고 강우강도가 30 mm/hr일 때 토양상자의 경사도가 5%와 10% 그리고 20%로 증가 할 때 기저유출량은 8.8 L(유출률 29.12%)와 4.0 L(유출률 13.36%) 그리고 2.1 L(유출률 7.09%)로 감소하였다. 그리고 피복율이 0%이고, 강우강도가 60 mm/hr일 때 7.8 L(유출률 13.07%)와 5.9 L(유출률 9.88%) 그리고 3.4 L(유출률 5.70%)로 점차 감소하였다. 토양상자 위에 벚짚을 덮고 기저유출량을 측정하였을 때에는 토양상자의 경사가 5%와 10% 그리고 20%로 증가할수록 강우강도 30 mm/hr일 때 24.5 L(유출률 82.16%)와 17.3 L(유출률 57.88%) 그리고 12.9 L(유출률 43.19%)로 감소하였다. 그리고 강우강도 60 mm/hr일 때 24.8 L(유출률 41.55%)와 16.8 L(유출률 28.13%) 그리고 10.8 L(유출률 18.13%)로 점차 감소하였다. 토양상자 위에 벚짚을 덮었을 때와 피복율이 0%일 때의 기저유출량을 비교한 결과 30 mm/hr 강우강도에서는 2.8~6배 정도 많이 발생하였고, 60 mm/hr 강우강도에서는 2.8~3.2배 정도 많이 발생한 것으로 나타났다. 이는 벚짚이 직접유출로 발생하려는 수분을 흡수 및 차단하고, 기저유출로 침투하는 시간을 증대시키며 또한 지표면의 공극막힘을 줄여 침투능이 상대적으로 많았기 때문에 직접유출량이 감소하고 기저유출량이 증가한 것으로 판단된다. 지표의 피복(벚짚) 여부에 따라 기저유출량이 큰 차이를 보였으나, 강우량이 30 mm/hr에서 60 mm/hr로 증가할 때 기저유출량에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러나 강우량 증가에 따른 기저유출률을 비교해 보면 30 mm/hr 강우강도가 60 mm/hr 강우강도 보다 약 2배 정도 높게 나타났다. 토양저류량은 강우강도와 경사도 그리고 지표피복 여부에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 토양으로 침투하는 양이 많아질수록 토양의 수분함량이 많아지면서 저류량이 증가하지만, 토층의 유효공극보다 많은 침투량이 발생하면 중력수에 의해 기저유출로 발생하여 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다.

3.3 지표피복과 경사도에 따른 유사량

피복율이 0%이고 강우강도가 30 mm/hr일 때 토양상자의 경사도가 5%와 10% 그리고 20%로 증가 할 때 유사량은 23.41 g과 45.21 g 그리고 62.73 g으로 증가하였다. 경사도 10%와 20%에서 발생한 유사량은 경사도 5%에서 발생한 유사량에 비해 93.12%와 167.96% 증가하였다. 60 mm/hr 강우강도에서는 92.46 g과 124.76 g 그리고 287.14 g으로 5%경사에서 발생한 유사량에 비해 34.93%와 210.56% 증가하였다. 토양상자 위에 벚짚을 덮고 유사량을 측정하였을 때에는 토양상자의 경사가 5%와 10% 그리고 20%로 증가할수록 강우강도 30 mm/hr일 때 2.88 g과 5.54 g 그리고 11.83 g으로 증가하였다. 60 mm/hr 강우강도에서는 28.09 g과 48.54 g 그리고 118.56 g으로 증가하였다. 강우강도와 토양상자의 경사가 동일한 조건에서 발생한 유사량은 피복율이 0%인 상태에서 발생한 유사량이 토양을 벚짚으로 피복하였을 때보다 2.4~8.2배까지 많이 발생하였다. 이는 벚짚으로 인하여 강우의 타격에너지에 의한 토립자의 이탈(detachment)이 감소하고, 토양으로 침투하는 양이 많아 직접유출량이 감소함으로써 직접유출량에 포함되어 유출되는 유사의 양이 감소하여 발생한 것으로 판단된다.

3.4 지표피복에 따른 물수지 분석 및 특성

Table 1은 지표를 피복하지 않은 나지상태와 벧짚을 이용하여 피복한 상태에서 강우강도 30 mm/hr과 60 mm/hr의 2처리로 직접유출량, 기저유출량 그리고 토양저류량을 실험하여 물수지 분석을 실시한 결과이다. 직접유출률은 토양상자를 벧짚으로 피복하였을 때 발생한 직접유출률이 나지상태에서 발생한 직접유출률에 비해 30 mm/hr와 60 mm/hr의 강우강도에서 모두 현저히 감소하였다. 이는 벧짚피복으로 인해 강우가 벧짚에 흡수되고, 표면으로 흐르는 직접유출수의 유속을 감소시키면서 토양에 저류하는 시간이 증가되어 토양으로 침투하는 침투량이 많아져 직접유출률이 감소한 것으로 판단된다. 기저유출률의 경우 벧짚을 피복하고 30 mm/hr 강우강도와 토양상자를 5%의 경사로 처리하였을 때 총 강우량의 82.16%로 가장 크게 나타났다. 또한 강우강도와 경사를 동일한 상태에서 비교를 하면 벧짚을 이용하여 지표를 피복한 경우가 나지상태에서 보다 직접유출률이 감소하고, 기저 유출률이 크게 증가하였다. 이러한 결과는 Benik et al(2003)의 벧짚거적을 이용한 유출량 실험과 유사하게 나타났고, 최용훈 등(2008)의 벧짚거적을 이용한 실험보다는 다소 유출량이 많았다. 이는 인공강우 시험에 사용된 벧짚의 상태와 피복율의 차이 때문으로 판단된다. 따라서, 30 mm/hr 이하의 강우강도와 5% 이하의 경사에서 벧짚을 이용하여 지표를 피복한 경우, 토양유실 저감에 큰 효과를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 각 토양상자에서 발생한 토양저류율은 강우강도와 토양상자의 경사도 그리고 지표피복에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 토양으로 침투하는 양이 많아질수록 토양의 수분함량이 많아지면서 토양이 포화되어 일정한 양 이상이 토양으로 침투되었을 때 토양이 더 이상 저류를 하지 못하고 기저유출로 발생하는 것으로 판단된다.

강우강도와 경사도 그리고 지표피복에 따른 직접유출률과 기저유출률 그리고 토양저류율에 대한 상관관계를 알아보기 위하여 상관도 분석을 실시하였으며 토양저류율과 강우강도의 상관관계를 제외하고, 모든 인자들 간 상관관계가 유의수준이 0.01 이하이므로 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다. 그리고 직접유출률과 기저유출률은 지표피복과 상관관계가 가장 크게 나타났고, 토양저류율은 경사도와 상관관계가 가장 크게 나타났다. 따라서 직접유출률과 기저유출률은 지표피복에 가장 큰 영향을 받고, 토양저류율은 경사도에 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Table 1. Analysis of water-balance in small scale plot(rainfall simulator)

Landcover		Bare						Straw					
		30 mm/hr			60 mm/hr			30 mm/hr			60 mm/hr		
Rainfall Intensity													
Slope(%)		5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10	20
Analysis of water-balance (%)	Precipitation	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	The rate of surface runoff	60.8	77.1	85.7	75.2	80.1	87.4	5.0	30.2	47.6	46.9	61.2	70.6
	The rate of groundwater discharge	29.1	13.4	7.1	13.1	9.9	5.7	82.2	57.9	43.2	41.6	28.1	18.1
	The rate of retention in soil	10.1	9.6	7.3	11.7	10.1	6.9	12.8	11.9	9.3	11.5	10.7	11.3

4. 결론

본 연구는 실내인공강우 시험기를 이용하여 탁수를 유발하는 경사지 밭의 토양유실에 대한 기초자료를 확보하기 위하여 강우강도, 경사도, 지표피복에 따른 직접유출량, 기저유출량, 토양저류량 그리고 유사부하의 배출을 측정하고 이를 분석하여 탁수를 유발하는 경사지 밭의 토양유실에 대한 기초 자료를 확보하는 데 있다.

1. 경사도가 클수록 직접유출수의 유속이 증가되어 유출량이 증가되고, 토양표면의 미세립자로 인해 토양 공극의 막힘 현상으로서 토양의 침투량이 감소되는 것으로 판단된다.
2. 평탄한 밭에서 보다 경사진 밭 등에서 토양유실이 더 심각하고, 강우에 따라 발생하는 토양유실의 양이 더 많아 짐을 짐작 할 수 있다. 그러나 벧짚으로 토양을 피복하였을 경우 직접유출량이 나지상태의 직접유출량보다 현저히 감소하였다. 이는 벧짚을 덮었을 경우에 지표피복으로 인하여 토양표면이 미세립자로 인한 표면막힘현상(Surface sealing 또는 crust)이 발생하지 않아 침투능이 증가하였기 때문으로 판단된다.
3. 피복율 0%인 상태에서 토양상자의 경사도가 5%에서 10% 그리고 20%로 증가 할수록 기저유출량은 감소하였다. 그리고 토양상자 위에 벧짚을 덮고 기저유출량을 측정하였을 때에도 유사하게 기저유출량이 감소하였으나, 나지상태에서 측정한 결과보다 30 mm/hr 강우강도에서는 2.8~6배 정도 많이 발생하였고, 60 mm/hr 강우강도에서는 2.8~3.2배 정도 많이 발생하였다.
4. 유사량은 피복율이 0%인 상태에서 발생한 유사량이 토양을 벧짚으로 피복하였을 때보다 2.4~8.2배까지 많이 발생하였다. 이는 벧짚으로 인하여 강우의 타격에너지에 의한 토립자의 이탈(detachment)이 감소하고, 토양으로 침투하는 양이 많아 직접유출량이 감소함으로써 직접유출량에 포함되어 유출되는 유사의 양이 감소하여 발생한 것으로 판단된다.
5. 벧짚으로 인해 토양으로 침투하는 양이 많아지고, 표면으로 발생하는 직접유출량의 소류력을 감소시킴으로 인해 직접유출물은 현저히 감소하였다. 따라서 벧짚을 이용하여 지표를 피복할 경우, 토양유실 저감에 큰 효과를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 직접유출물과 기저유출물은 지표피복과 상관관계가 가장 크게 나타났고, 토양저류율은 경사도와 상관관계가 가장 크게 나타났다. 따라서 고랭지 경사밭의 토양유실을 저감하기 위해서는 벧짚과 같은 피복재를 이용하여 표면으로 유출되는 직접유출량과 유사량을 줄여야 할 것으로 판단된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

- 국립환경연구원(1992). *비점오염원 유출부하량 조사지침*
- 환경부(2007). *소양강댐 유역 고랭지 경작지 관리방안*
- 최용훈, 신민환, 김기철, 서지연, 박병준, 임경재, 최종대(2008). 피복도와 경사도에 따른 유사 및 SS농도 분석, *한국물환경학회 학술발표회논문집*, pp.277-278.
- Benik, S. R., Wilson, B. N., Biesboer, D. D., Hansen, B. and Stenlund, D.(2003). Evaluation of erosion control products using natural rainfall events, *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(2), 98~105.