

북한강 중류 산간농업 소하천에서의 오염부하특성분석

Pollutant Load Characteristics from a Small Mountainous Agricultural Watershed in the North Han River Basin

신용철* · 최중대** · 임경재*** · 심혁호* · 류창원* · 양재의**** · 유경열****

Shin, Yongchul · Choi, Joongdae · Lim, KyoungJae
Shim, Hyeokho · Lyou, Changwon · Yang, Jae E. · Yoo, Kyung-Yoal

Abstract

Natural environment of the Wolgokri stream watershed, located in Chuncheon, Gangwon province, Korea, has been well preserved as a traditional agricultural watershed. To analyze characteristics of NPS pollution generated from an mountainous agricultural watershed, the flow and water qualities of the study watershed were monitored and were analyzed to estimate pollution loads. Annual runoff volume ratio was 70.4%. Concentrations of T-N, T-P, COD, and TOC were higher when monthly rainfall was between 0~30 mm than those when monthly rainfall was higher than 100 mm. However, the concentrations varied considerably when monthly rainfall was higher than 100 mm. The flow weighted mean concentrations(mg/L) of BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N, T-P and SS were 1.96, 2.72, 3.32, 1.41, 4.70, 0.187 and 13.36, respectively. The BOD, SS, T-N and T-P loads of July, 2004 were 48%, 17%, 51% and 32% of annual load, respectively. The BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N, T-P, and SS loads (kg/ha) from Mar. 2004 to Apr. 2005 were 19.09, 26.55, 32.39, 13.85, 45.92, 1.887 and 130.18, respectively. The highest concentrations of BOD, NO₃-N, T-N, T-P, SS, COD and TOC were found before the flow reached the peak runoff, possibly due to the first flushing effect. Generally, pollution loads of the Wolgokri watershed were not that significant. Phosphorus load, however, was higher enough to cause eutrophication in the receiving water body. It was recommended that best management practices need to be implemented to reduce phosphorus sources.

Keywords : Nonpoint source, Pollution load, Rainfall, Water Quality, Rural watershed

* 강원대학교 대학원 지역기반공학과
 ** 강원대학교 농업공학부
 *** 강원대학교 환경연구소
 **** 강원대학교 자원생물환경학과
 ** Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6464
 Fax: +82-33-251-1518
 E-mail address: jdchoi@kangwon.ac.kr

I. 서 론

최근에 이르기까지 급속한 산업발달로 인하여 발생하는 각종 오염물질은 하천 및 호소의 수질오염을 야기시키고 있다. 풍부한 수자원을 가지고 있는 북한강 수계는 서울 수도권의 상수원 공급에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 한강을 비롯한 하천 대부분이 점원 및 비점원오염 물질의 지속적인 유입으로 인하여 수질이 계속 악화되고 있다(Choi, 1999). 점원오염은 환경기초시설의 설치 및 운영, 수처리 기술의 개발과 법적인 제재 등을 통하여 규제할 수 있으며, 환경법규가 강화됨에 따라 점원오염의 발생량이 감소하는 추세를 보이고 있다. 그러나 비점원오염에 의한 수질오염은 점원오염이 감소하는 것과는 반대로 점차 증가하고 있다. 점원오염은 그 발생원에 따라 오염물이 미치는 영향 등을 비교적 간단하고 명확하게 나타낼 수 있으며 처리할 수 있는 기술도 새로운 이론과 방법을 도입하여 개발이 가능하다. 하지만 비점원오염은 오염물의 종류, 독성, 발생량 그리고 오염물이 인간 및 동식물에 미치는 영향을 명확하게 나타내기가 어렵다(Choi, 1997). Magette (1990)는 비점원오염의 관리는 가장 어려울 뿐만 아니라 가장 이해하기 어려운 오염원이며, 또한 어느 특정한 지점에서 오염원이 배출되지 않고 광범위한 지역에서 발생하는 오염원으로 정의하였다(Magette et al., 1989). Pimental (1993)은 수자원 및 환경에 미치는 영향중 지구 표면의 30~50%가 비점원오염에 의해 영향을 받으며, Humenik et al. (1987)은 농업부문에서 비점오염이 가장 많이 발생한다고 하였다. 비점원오염은 지역의 토질, 토성, 문화, 주거 형태, 강우형태, 하천의 이용 및 형상 등 많은 인자들에 의해 영향을 받고 있으며 이중 강우시 강우유출수에 의해 발생하는 비점원오염은 하천오염의 주원인이 되고 있다(Choi et al., 1999). 특히 강원도 내린천 상류 유역의 경우에는 고랭지 밭에서 발생하는 토양유실이 내린천 하류 및 한강수계의 수

질악화에 가장 큰 요인으로 꼽힌다. 유역에서 발생하는 유출량은 유역특성에 따라 차이를 보인다. 유역면적이 작고 경사가 급한 유역에서는 지속적으로 일정한 강우가 유지될 경우, 30분~1시간 이내에 유출이 발생하게 된다(Han River Basin Environmental Office, 2003). 일반적으로 강우유출수에 함유된 오염물질 농도는 최대유출량이 발생하기 전에 매우 높고 최대유출발생 이후에는 점점 낮아지는 특성을 보인다. 농촌지역의 비점원오염물질은 평시에는 주로 지하수를 통하여 유입되기 때문에 오염부하가 낮게 나타나며, 강우시에는 지표유출과 함께 많은 비점원오염물질이 발생하기 때문에 강우 초기에 오염부하가 크게 나타난다(Choi et al., 1997; Choi et al., 1999). 최근들어 환경부에서는 비점원오염에 의한 영향을 저감시키기 위해 많은 투자와 연구를 하고 있다. 특히 한강 수계에서 농업활동으로 인해 발생하는 비점원오염을 줄이기 위해 다양한 방안이 제시되고 있으나, 이러한 정책이 시행되더라도 농업활동에 의한 오염부하량의 정량적 평가가 없으면 정책의 효율성과 지속적 시행 여부를 판단하기 어렵게 된다. 농업에 의한 비점원오염의 수계 유입은 토지이용(논, 밭, 산림 등), 영농관리(작부체계, 지표 피복, 경운방법, 농자재 사용 종류와 양 등) 그리고 환경조건(강수량, 경사도, 가축사육, 인구수 등)에 따라 매우 달라지게 된다(Park, 1999; Sharpley and Halvorson, 1994; Bower et al., 1982). 따라서 수계에서 이러한 조건에 따른 오염원 이동기작, 부하량을 평가하고 오염부하량을 경감시킬 수 있는 관리방안과 제도개발에 대한 연구가 매우 시급한 실정이다. 합리적인 관리방안과 제도개발을 위해서는 중·소유역의 오염부하 배출에 관한 많은 자료와 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 농업 유역에서 발생하는 비점원오염의 특성을 조사하기 위하여 북한강 중류 수계에 대표지점을 선정하여 유량 및 수질을 모니터링 하였으며, 강우시 발생하는 오염부하량을 산정하였다. 본 연구에서 조사된 북한강 중류 농업유역

의 비점원오염부하 관측자료는 소유역의 오염배출 특성을 이해하고 유역관리방법의 개발과 적용에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구방법

1. 연구대상 유역

연구유역은 북한강 유역의 강원도 춘천시 동면 월곡리 소하천유역을 선정하였다. 유역면적은 3.41 km²이고, 하천 총연장은 12.56 km로 2003년까지 그린벨트의 규제를 받아 자연환경이 매우 잘 보전되고 있는 농업소유역이다. 월곡리 유역은 2003년도에 그린벨트에서 해제되었으나 춘천시의 인구와 산업이 취약하여 개발보다는 농업유역으로 잘 보전되어 있다. 월곡리 유역의 대표 산업으로는 춘천 옥광산이 있다. 옥광산으로부터의 오염부하량은 크지 않은 것으로 조사되고 있으나 옥광산을 방문하는 관광객의 숫자는 매년 증가하는 것으로 나타났다. 또한 무의탁 노인 약 70~100명을 수용하고 있는 무지개 마을이 옥광산과 더불어 가장 큰 오염원으로 평가되고 있다. 월곡리 소하천 유역은 유역경사가 급하고 농지 규모가 작으며, 집약적으로 이용되는 토지가 많지 않아 오염배출이 큰 토지구모는 많지 않은 것으로 조사되었다. 월곡리 소하천 유역의 유량과 수질은 관측지점(S)에서 측정하였으며, 옥광산과 무지개 마을의 위치는 S1과 S2로 나타내었다(Fig. 1).

2. 유량 및 수질특성

월곡리 소하천의 유량 산정을 위하여 압력식 수위계를 설치하여 2004년 4월부터 2005년 3월까지 수위를 측정하였다. 수위는 강우시에는 5분 간격으로 그리고 비강우시에는 30분 간격으로 측정하여 유량으로 환산하였다. 오염농도 및 오염부하량 산정을 위해 월곡리 모니터링 지점에 자동수질

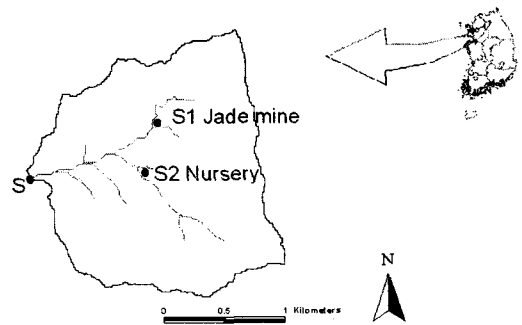


Fig. 1 Schematic sketch of the study watershed

시료 채취시설을 설치하였으며 수위계를 이용하여 수위를 측정된 4월 6일부터 10월 28일까지는 수위계 수위자료 및 수위-유량관계식을 이용하여 유량으로 환산하였다. 수위-유량 관계식으로 환산된 일별 유량을 사용하여 월별 유량을 산정하였으며, 2004년 11월부터 2005년 3월까지는 2주에 한번씩 실측된 유량을 이용하여 월별유량을 산정하였다. 강우량에 따른 오염농도특성을 분석하기 위해, 월강우량에 따라 0~30 mm, 30~100 mm 및 100 mm 이상으로 분류하여 오염물질의 유출특성과 농도특성을 분석하였다. 비강우시 유역내에 축적되는 비점원오염물질의 오염부하는 비점원오염의 불확실성 때문에 정량화하기가 어렵다. 따라서 강우시 및 시기별 오염부하 특성분석을 위해 월별 유량가중평균농도와 강우사상평균농도(Event Mean Concentration-EMC)를 산정하였다. 수질시료는 평시에는 2주일에 1회, 그리고 강우시에는 1일 4회 이상 채취하여 생물학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC), 질산 성질소(NO₃-N), 총질소(T-N), 총인(T-P) 및 부유물질(SS)을 환경부 제정 수질공정시험법의 제반규정에 따라 분석하였으며, 소하천의 오염부하량은 유량에 측정항목별 수질농도를 곱하여 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 월곡리 소하천 유역의 유량 특성

월곡리 유역에서 약 10 km 떨어진 춘천기상대의 2004년 4월부터 2005년 3월까지의 강우량은 1,365.9 mm 로 우리나라의 연평균강우량보다 많았다. 연구유역의 연유출량은 3,322,192 m³이 발생하였으며, 6월부터 9월까지 연유출량의 78% 인 2,500,000 m³ 이상이 발생하였다. 특히 530 mm 이상의 많은 강우가 발생한 7월의 유출비는 연유출의 44.4%로 매우 높게 나타났다. 월곡리의 연유출률은 연강우량의 약 70.4%로 상당히 높은 유출특성을 보였다. 연유출비 대비 5월과 6월의 유출비는 100 mm 이상의 강우가 발생했음에도 2.2%와 8.2%로 작았으나, 8월과 9월의 유출비는 약 200 mm 정도의 강우에 15.4%와 10.0%로 나타나 5월과 6월에 비해 상대적으로 높은 유출비를 보였다. 5월과 6월에는 강우량에 비하여 비강우기간이 장기간 지속되어 토양내 함수비가 낮아 강우량의 상당수가 토양에 저류되었던 반면에, 8월과 9월에는 6월부터 7월 동안 장기간 지속된 강우로 인하여 토양의 함수비 증가로 침투율이 감소했기 때문에 많은 양의 강우가 지표로 유출된 것으로 판단되었다. 월곡리의 강우량, 월유출량과 유출비는 Table 1과 같다.

2. 월곡리 소하천 유역의 수질특성

월강우량이 0~30 mm일 때의 BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N 및 T-P의 농도(mg/L)는 0.7~2.8, 1.8~6.4, 2.1~7.2, 0.16~1.23, 1.54~6.98와 0.031~0.250로 나타났으며, 30~100 mm 강우일 때 0.9~4.2, 1.5~2.6, 2.02~4.42, 0.77~1.68, 2.56~6.69와 0.002~0.060로 0~30 mm 강우일 때보다 농도변동이 높은 것으로 나타났다(Table 2). 반면에 SS의 농도변동은 30~

Table 1 Monthly rainfall, streamflow, and streamflow ratio of the study watershed

Month	Precipitation (mm)	Streamflow (m ³)	Streamflow ratio (%)
Apr. 2004	59.7	45,639	1.4
May 2004	135.0	73,044	2.2
Jun. 2004	105.7	267,663	8.2
Jul. 2004	532.3	1,457,272	44.4
Aug. 2004	215.6	503,953	15.4
Sep. 2004	193.6	326,817	10.0
Oct. 2004	1.8	307,170	9.4
Nov. 2004	43.0	66,342	2.0
Dec. 2004	27.2	58,983	1.8
Jan. 2005	3.7	45,533	1.4
Feb. 2005	30.8	65,318	1.8
Mar. 2005	17.5	104,458	2.0
Total	1,365.9	3,322,192	100

100 mm일 때의 0~192 mg/L로 0~30 mm의 2~20 mg/L에 비해 매우 크게 나타났다. 0~30 mm의 경우 무강우일수가 지속됨에 따라 농촌지역의 배수로와 도로 등에 퇴적된 먼지와 유기물 등의 오염물질이 30 mm 미만의 강우와 함께 하천으로 유입되어 하천수질이 급격히 악화되는 것으로 나타났다. 30~100 mm의 많은 강우발생시에는 오염물질이 유출보다는 희석에 기여하여 농도를 낮추는 것으로 판단되었다. 월 강우량이 100 mm 이상일 때는 강우량과 유출량에 따라 오염물질 농도의 변화가 매우 크게 나타났다. 특히 입자상태로 발생하는 SS의 농도는 강우량과 유출량의 크기에 따라 농도가 급격하게 변하는 것으로 나타났다. 0~30 mm의 강우발생 기간에는 평균값이 중앙값보다 다소 높게 나타났으나, 30~100 mm와 100 mm 이상 강우에서는 평균값과 중앙값 사이의 차이가 크지 않았으며 뚜렷한 성향이 나타나지 않았다.

월곡리 하천의 수질조사항목별 최대값, 최소값 및 유량가중평균농도는 Table 3과 같다. BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N, T-P 및 SS의 수질

Table 2 Variation of Concentration with respect to the size of monthly rainfall

(Unit: mg/L)

Monthly rainfall		Index	BOD	COD	TOC	NO ₃ -N	T-N	T-P	SS
0~30 mm	Range		0.70~2.80	1.80~6.4	2.10~7.21	0.15~1.23	1.54~6.98	0.031~0.250	2~20
	Mean		2.08	3.26	3.91	0.65	3.05	0.090	6.43
	Median		2.34	2.50	3.29	0.59	2.59	0.047	5.5
30~100 mm	Range		0.90~4.20	1.56~2.60	2.02~4.42	0.77~1.68	2.56~6.69	0.002~0.060	0~192
	Mean		2.08	2.17	3.14	1.28	4.63	0.035	30.34
	Median		1.54	2.20	2.90	1.35	4.95	0.040	4
100 mm and more	Range		0.06~8.92	0.81~11.58	1.04~14.61	0.40~4.97	1.35~16.56	0.013~1.280	0.50~170
	Mean		2.43	3.40	4.05	1.65	5.34	0.231	21
	Median		2.12	2.90	3.60	1.74	5.66	0.175	5

Table 3 Selected statistics of the measured concentration of the watershed

(Unit: mg/L)

Statistics	Index	BOD	COD	TOC	NO ₃ -N	T-N	T-P	SS
Maximum		8.92	11.58	14.61	4.97	16.56	1.280	192.0
Minimum		0.06	0.81	1.04	0.15	1.35	0.002	0.0
Flow weighted mean		1.96	2.72	3.32	1.41	4.70	0.187	13.36

농도(mg/L)는 0.06~8.92, 0.81~11.58, 1.04~14.61, 0.15~4.97, 1.35~16.56, 0.002~1.280, 0~192.0의 농도특성을 보였으며, 유량가중평균농도(mg/L)는 각각 1.96, 2.72, 3.32, 1.41, 4.70, 0.187와 13.36로 나타났다.

유기물의 함량을 측정하는 지표인 BOD, COD 및 TOC의 월별유량가중농도(mg/L)는 0.73~3.56, 1.01~4.69와 1.3~5.63로 나타났으며, 물속의 영양물질 양을 측정하는 NO₃-N, T-N 및 T-P의 월별유량가중농도(mg/L)는 각각 0.04~1.96, 2.26~6.98와 0.019~0.516의 범위로 나타났다(Table 4). 많은 강우가 발생한 6월~9월에 하천, 호소 등의 부영양화를 나타내는 T-N, T-P, COD 와 TOC의 농도가 높게 나타나 수계에 유입되는 오염원이 강우강도에 큰 영향을 받는 것으로 판단되었다. SS의 월별 유량가중평균농도는 3.0

2~63.94 mg/L로 다른 측정항목보다 변화가 큰 것으로 나타났으며, 최대농도가 4월에 발생하였다. 이는 초봄의 영농활동으로 교란된 농경지에서 약 60 mm 정도의 강우에도 많은 양의 토양유실이 발생된 것으로 판단되었다. 7월의 SS의 유량가중평균농도는 5.14 mg/L로 6월, 8월에 비해 낮은 값을 보였다. 7월에는 20 mm/h 미만의 강우강도로 20일 이상 강우가 지속적으로 발생하여 많은 유출량이 발생하여 농도가 상대적으로 유량에 의해 희석되었기 때문으로 판단되었다. BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N, T-P 및 SS의 연평균 유량가중평균농도(mg/L)는 1.88, 2.43, 3.09, 1.19, 4.47, 0.134 및 17.04로 나타났다. 비교적 자연이 잘 보호되고 있는 농촌유역이지만 수질지표의 값이 비교적 높게 나타나는 이유는 월곡리 유역의 논과 밭의 토양에 함유되어있던 유기물들이 많은 강우로 인해

Table 4 Monthly flow weighted mean concentration of the watershed

(Unit: mg/L)

Month	Index	BOD	COD	TOC	NO ₃ -N	T-N	T-P	SS
Apr. 2004		1.10	1.84	2.39	1.18	3.70	0.042	63.94
May 2004		1.19	1.65	2.11	1.51	5.02	0.215	24.62
Jun. 2004		0.73	1.01	1.30	1.96	6.41	0.256	31.33
Jul. 2004		2.13	3.01	3.74	1.71	5.40	0.136	5.14
Aug. 2004		2.31	3.29	3.70	1.37	4.53	0.516	21.99
Sep. 2004		2.01	2.81	3.32	0.80	2.85	0.101	19.06
Oct. 2004		1.37	1.94	2.30	0.68	2.26	0.074	14.16
Nov. 2004		1.72	2.40	3.20	1.27	4.23	0.040	6.00
Dec. 2004		1.53	2.16	2.50	1.17	3.84	0.046	3.02
Jan. 2005		2.10	2.20	3.12	1.21	6.98	0.031	6.12
Feb. 2005		3.56	2.16	3.76	1.36	6.03	0.019	3.76
Mar. 2005		2.83	4.69	5.63	0.04	2.41	0.136	5.35
Annual average		1.88	2.43	3.09	1.19	4.47	0.134	17.04

직접유출과 함께 하천에 유입되어 하천오염을 증가시키는 것으로 판단되었으며, 특히 하천의 부영양화에 중요한 영향을 미치는 인의 농도가 호소수질 기준 V등급 수준(0.150mg/L 이하, 농업용수2급수)인 0.134 mg/L로 높게 나타나 인 부하를 저감시키기 위한 노력이 필요할 것으로 판단되었다.

월별 유량가중평균농도의 산정은 강우시와 비강우시의 수질농도의 평균값만을 나타내므로, 강우시에 발생하는 직접유출에 의한 비점원오염의 측정이 필요하다. 강우사상평균농도를 정확하게 산정하기 위해서는 수문곡선(Hydrograph)과 오염도곡선(Pollutograph)를 정확히 나타낼 수 있도록 충분한 수의 유출량과 오염농도의 측정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 강우발생시 유출량은 5분 단위로 측정하였고 수질시료는 시간별로 채취하여 수질의 변화가 크게 변할 수 있도록 샘플을 4개 이상 분석하였

다. 강우사상별 EMC 중 2004년 9월 11일 단일강우사상에 대한 EMC는 Table 5와 같다. BOD, COD, TOC, T-P 및 SS의 EMC(mg/L)는 3.15, 4.47, 4.81, 0.170, 28.21로 9월 24일 비강우시에 측정된 수질항목별농도(mg/L)인 1.72, 2.40, 3.10, 0.034, 16보다 2~5배 이상 높게 나타났다. BOD, COD 및 TOC는 유기물함량과 관련이 높기 때문에 강우기간동안 직접유출에 의해 지표의 유기물 유실이 많이 발생하여 하천에 유입되는 것으로 판단되었다. T-P 및 SS의 경우 강우에 따른 직접유출로 인해 발생한 토양유실과 이와 함께 토양에 흡착된 인 성분이 유출되었기 때문으로 판단된다. 반면에 NO₃-N와 T-N의 EMC(mg/L)는 0.48와 1.96로 9월 24일 비강우시에 측정된 수질농도(mg/L)인 0.74와 2.47보다 다소 낮게 나타났으며, 특히 NO₃-N에 비해 T-N 상당히 높게 나타나 하

Table 5 EMCs of September 11, 2004, rainfall event.

(Unit: mg/L)

Index	BOD	COD	TOC	NO ₃ -N	T-N	T-P	SS
EMC	3.15	4.47	4.81	0.48	1.96	0.170	28.21

천수의 유기질소(Org-N) 함량이 높은 것으로 나타났다.

강우시 하천의 최대 유출량은 강우량, 강우지속 시간 및 강우강도에 따라 많은 차이를 보인다. 월곡리 유역에서는 강우시작 시점부터 약 1시간에서 2시간 사이에 최대 유출이 발생하였다. 그러나 유역면적이 작고 경사가 급한 월곡리 유역에서 지속적으로 일정한 강우가 유지될 경우, 최대유출량은 1시간 이내에 발생할 것으로 예상되었다. 강우시 하천유량과 농도의 변화 예는 Fig. 2, 3, 4와 같다. T-N은 유출량의 변화에 따라 농도변화가 크게 나타났으나, NO₃-N의 농도는 유출량의 변화에 따라 크게 변하지 않았으며, 침두유출 이후 점진적으로

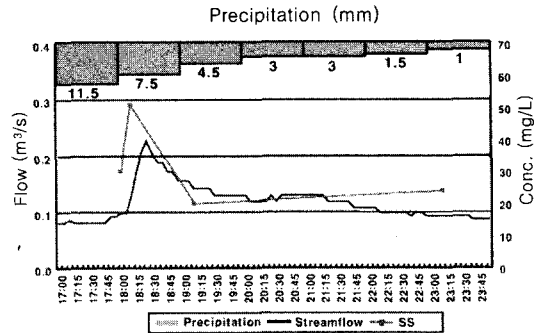


Fig. 4 Relationship among precipitation, runoff, and selected water quality index of September 11 rainfall event

감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. BOD, COD, TOC 및 SS의 농도변화는 침두유출 전에 높게 나타나 T-N과 유사한 경향을 보였으며, T-P와 NO₃-N를 제외한 전체수질항목의 농도가 침두유출이 발생하기 전에 최고치가 나타나 초기유출로 인한 초기 세척효과가 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 하천수의 부영양화에 영향을 미치는 T-P는 토양에 흡착되어 있기 때문에 비강우기간동안에는 하천으로의 유입이 거의 발생하지 않는 반면에 강우시에는 직접유출수에 의한 토양유실이 발생하여 토양에 흡착되어 있던 T-P가 유실된 토양과 함께 하천으로 유입되어 강우시에 T-P의 농도가 높은 경향을 보인다. 하지만 9월 11일의 T-P 농도는 유량 변화에 의한 뚜렷한 경향이 나타나지 않았으며, 이는 수질시료의 채취 혹은 수질분석에서 발생한 실험오차에 의한 것으로 판단되었다.

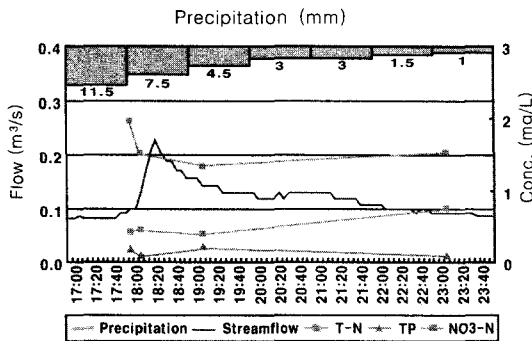


Fig. 2 Relationship among precipitation, streamflow, and selected water quality index of September 11 rainfall event

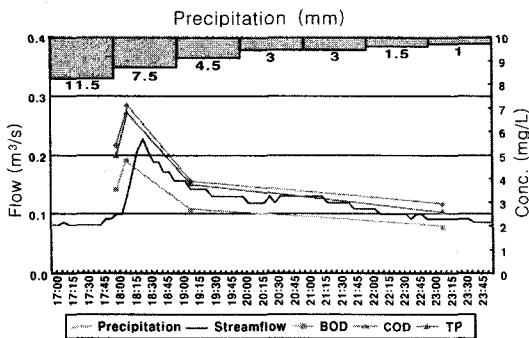


Fig. 3 Relationship among precipitation, runoff, and selected water quality index of September 11 rainfall event

3. 월곡리 소하천의 오염부하특성

측정한 수질자료와 유량 자료를 이용하여 월곡리 소하천의 수질항목별 월별 오염부하를 산정하였다 (Table 6). BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N, T-P 및 SS의 월별 오염부하(kg/ha)는 0.15~9.11, 0.25~12.85, 0.32~15.96, 0.11~7.29, 0.5~23.07, 0.004~0.762와 0.63~32.50로 나타났다. 2004년 4월부터 2005년 3월까지의 총오

Table 6 Monthly and annual pollution load of the watershed

(Unit: kg/ha)

Index Month	BOD	COD	TOC	NO ₃ -N	T-N	T-P	SS
Apr. 2004	0.15	0.25	0.32	0.16	0.50	0.074	8.56
May 2004	0.26	0.35	0.45	0.33	1.07	0.050	5.27
Jun. 2004	0.55	0.76	0.97	1.60	5.28	0.201	25.95
Jul. 2004	9.11	12.85	15.96	7.29	23.07	0.579	21.97
Aug. 2004	3.41	4.86	5.47	2.03	6.70	0.762	32.50
Sep. 2004	1.92	2.70	3.19	0.77	2.73	0.097	18.27
Oct. 2004	1.23	1.74	2.07	0.61	2.04	0.066	12.76
Nov. 2004	0.31	0.45	0.57	0.26	0.86	0.007	1.09
Dec. 2004	0.32	0.45	0.52	0.24	0.79	0.008	0.63
Jan. 2005	0.28	0.29	0.42	0.16	0.93	0.004	0.82
Feb. 2005	0.68	0.41	0.72	0.29	1.28	0.004	0.72
Mar. 2005	0.87	1.44	1.73	0.11	0.67	0.035	1.64
Annual load	19.09	26.55	32.39	13.85	45.92	1.887	130.18

염부하(kg/ha)는 BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N, T-P 및 SS가 각각 19.09, 26.55, 32.39, 13.85, 45.92, 1.887와 130.18로 나타났다. 월곡리 소하천 인근에 위치한 수동리유역의 오염부하량과 비교한 결과 수동리 유역의 98년도 T-N과 T-P의 오염부하(kg/ha)는 각각 56.16과 0.446로 월곡리 소하천의 T-N 오염부하와 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 T-P의 경우 월곡리 소하천에서 약 4배 이상의 매우 높은 오염부하가 발생한 것으로 나타났다(Choi et al., 2001). 오염부하는 많은 강우가 발생한 7월, 8월에 매우 높게 나타났으며, 9월 이후 점진적으로 감소하다가 2005년 3월부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 7월, 8월에는 740 mm 이상의 많은 강우가 발생하여 강우의 상당부분이 직접유출로 유출되었으며, 오염물질이 직접유출수와 함께 하천으로 유입되어 높은 오염부하특성을 보였다. 특히 SS와 T-P 부하가 높게 나타났으며, 7월 1~7일, 11~17일의 집중호우로 큰 장마가 발생하였던 7월에 BOD, SS 및 T-N의 오염부하는 각각 연부하량의 48%, 17%와 51%가 배출

되었고, T-P의 오염부하는 32%가 배출되어 연구유역의 오염부하특성은 강우사상과 밀접한 관계가 있음을 입증하고 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 농업 소하천에서의 오염부하량을 분석하기 위해 강원도 춘천시에 위치한 유역면적 3.41 km²의 월곡리 소유역을 대상으로 유량·수질 자료를 수집하여 월별 유량·수질 특성을 분석하였으며, 2004년 4월부터 2005년 3월까지의 오염부하량을 산정하였다.

1. 월곡리 소하천은 2004년 4월부터 2005년 3월까지 3,322,192 m³의 유출이 발생하였으며, 6월부터 9월까지 연유출량의 78%인 2,500,000 m³ 이상이 발생하였다. 특히 7월에는 530 mm 이상의 집중호우로 인하여 유출비가 44.4%로 높게 나타났다. 연구유역의 강우에 따른 연유출률은 70.4%로 상당히 높은 유출특성을 보였다.

2. 월강우량이 0~30 mm일 때의 BOD, COD,

TOC, NO₃-N, T-N 및 T-P의 농도변동이 30~100 mm 강우의 농도변동보다 다소 높게 나타났으나, SS의 농도변동은 30~100 mm일 강우에서 더 높게 나타났다. 월 강우량이 100 mm 이상의 강우에서는 오염물질의 농도변동이 100 mm 미만의 강우에 비해 매우 크게 나타났으며, 강우량이 오염물질의 농도변동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3. BOD, COD, TOC, NO₃-N, T-N, T-P 및 SS의 월별 유량가중평균농도(mg/L)는 0.73~3.56, 1.01~4.69, 1.3~5.63, 0.04~1.96, 2.26~6.98와 0.019~0.516 및 3.02~63.94로 나타났으며 많은 강우가 내린 6월~9월에 높게 나타나 수계에 유입되는 오염원이 강우강도에 큰 영향을 받는 것으로 판단되었다. 반면에 SS의 월별유량가중평균농도는 최고농도가 4월에 63.94 mg/L로 나타났으며, 이는 초봄의 영농활동으로 교란된 농경지에서 약 60 mm 정도의 강우에도 많은 양의 토양유실이 발생한 것으로 판단되었다.

4. 9월 11일 단일강우사상에 대한 T-N, BOD, COD, TOC 및 SS의 농도는 침투유출 이전에 최고 농도를 나타내 초기유출로 인한 초기세척효과가 있는 것으로 나타났으며, 최고오염농도를 나타낸 이후 오염물질농도는 유출량이 증가하여도 점진적으로 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 수중의 영양물질량을 나타내는 T-P와 NO₃-N의 농도는 유출량의 변화에 따라 크게 변하지 않았으며, 침투유출 이후 점진적으로 감소하다가 증가하는 경향을 보였다.

5. 월곡리 소하천의 오염부하는 2004년 6~9월에 매우 높게 나타났으며, 9월이후 점진적으로 감소하다가 2005년 3월부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 특히 7월 한달 동안에 BOD, SS 및 T-N은 각각 연부하량의 48%, 17%와 51%가 배출되었으며, T-P의 오염부하량은 32%가 배출되어 연구역의 오염부하 배출은 강우사상과 밀접한 관계가 있음을 입증하고 있다.

사 사

본 연구는 2004년도 한강수계관리위원회(한강유역환경청)에서 시행한 환경기초조사사업 연구결과 의 일부로 연구지원에 감사한다.

References

1. Bouwer, M., M. G. Elferink, and G. T. Robillard, 1982, Phosphoenolpyruvate-dependent fructose phosphotransferase system of *Rhodospseudomonas sphaeroides*: Purification and physicochemical and immunochemical characterization of a membrane-associated enzyme I. *Biochemistry* 21: 82-8.
2. Choi, J. D., 1997, Effect of Rural Watershed management on the discharge of NPS pollutants to streams. *Journal of Rural Development*, 1, pp. 91-107.
3. Choi, J. D., Kim, J. J., and Cheong, J. C., 1997, Soil quality assessment for environmentally sound agriculture in the mountainous soils. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 39(2), pp. 113-123.
4. Choi, J. D., Lee, C. M., and Choi, Y. H., 1999, Effect of land use on the water quality of small agricultural watersheds in Gangwon-do. *Korea Water Resources Association*, 32(4), pp. 501-510.
5. Choi, J. K., Lee, K. J., Gwon, K. S., and Koo, B. J., 2001, Rural water quality and NPS pollutant loadings in Gangwon-do. *Korean Society on Water Quality*, pp. 85-88.
6. Choi, J. D. 2003, Pollutant load reduction effect analysis by environmentally sound agricultural managements. 40-91, Hanam, Gyeonggi: Han River Basin Environmental Office.
7. Humenik, F. J., M. D. Smolen, and S. A. Dressing, 1987, Pollution from nonpoint sources: Where we are and where we should

- go. Environ. Sci. Technol., 21: 737-742.
8. Magette, W. L., T. H., Wood, J. D., Weismiller, R. A., and Lessley, B. V., 1989, Indian town best management practices demonstration farm: Summary of hydrologic and water quality monitoring, 1986-1988. Unpublished report to the Maryland Department of Agriculture, Agricultural Engineering Department, University of Maryland, Maryland.
 9. Magette, W. L., 1990, Water quality/land use: Water issues in the Middle Atlantic States, AES and CES of the University of Maryland system and USDA ARS Beltsville, Maryland." A Symposium paper held in Nov. 1, 1990, Calvery Holiday Inn, Beltsvills, Maryland.
 10. Pimental, D., 1993, World soil erosion and conservation. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England.
 11. Park, C. S., 1999, Monitoring of non-point pollutants from the different land use in the Yulmuncheon tributary watershed. Ph.D. diss. Kangwon University.
 12. Sharpley, A. N., and A. D. Halvorson, 1994, The Management of soil phosphorus 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, Advances in Soil Science). Boca Raton, FL: Lewis Publishers.