

# 농업소유역에서 직접유출과 기저유출에 의한 오염부하특성

Pollutant Load Characteristics by Direct Runoff and Baseflow from  
Small Scale Agricultural Watershed

신용철\*, 류창원\*, 최예환\*, 임경재\*, 최종대\*

Yong-Cheol Shin·Chang-Won Lyou·Ye Hwan Choi·Kyoung Jae Lim·Joongdae Choi

\*강원대학교 지역기반공학과

**Abstract:** Natural environment of Weolgok-ri watershed has been well preserved as a traditional agricultural watershed. A year record of streamflow, NO<sub>3</sub>-N, T-N and T-P concentrations data(Apr, 2004-Mar. 2005) was examined to estimate annual and seasonal patterns of pollutant loads in streamflow and baseflow from the agriculture watershed. To estimate pollutant loads from baseflow, baseflow component from total stream flow was separated using digital filter method in the Web-based Hydrograph Analysis Tool system. Loads of NO<sub>3</sub>-N, T-N and T-P from streamflow and baseflow were evaluated to investigate pollutant loads contribution by baseflow. The NO<sub>3</sub>-N, T-N, and T-P loads from streamflow were 13.85 kg/ha, 45.92 kg/ha and 1.887 kg/ha, respectively. NO<sub>3</sub>-N, T-N and T-P loads from baseflow were 7.43 kg/ha, 24.70 kg/ha, 0.582 kg/ha, respectively. It was found that NO<sub>3</sub>-N and T-N loads were contributed by the baseflow(53% and 53% of Total-loads) than the direct runoff (47% and 47% of Total loads). However, only 30% of total T-P was contributed by the baseflow. It is recommended that one needs to assess pollutant load contribution by the baseflow to identify appropriate control strategies for effective watershed management.

**keywords:** Concentration, Hydrograph separation, Baseflow, Runoff volume, loads

## I. 서론

최근에 이르기까지 급속한 산업발달로 인하여 발생하는 각종 오염물질은 하천 및 호소의 수질 오염을 야기키치고 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(최 등, 1999). 비점원 오염물질은 하천의 부영양화의 주원인으로서 이를 막기 위한 관심이 점차 증가되고 다. 비점원 오염물질중 질소의 오염부하는 하천의 부영양화에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 비점원오염은 주로 농업활동에 의해 발생하며, 이는 농경지를 기반으로한 오염원(land-based pollutants)과 영농관리방법을 기반으로 한 오염원(management-based pollutants)으로 구분할 수 있다. 농경지를 기반으로 하는 오염원은 토양유실에 의해 토양입자가 수계로 유입되면서 오염이 초래된다. 영농관리방법을 기반으로 하는 오염원은 생산성 향상과 병해충 방제를 위해 작물이나 토양에 투입된 비료와 농약 등 화학물질의 일부가 물에 녹아서 유출수와 함께 수체로 배출되거나 토양입자에 흡착되어 발생하게 된다(한강수계관리위원회, 2003). Hallberg (1987)는 비강우시 하천으로 유입되는 질소는 중간유출 혹은 기저유출을 통해 하천에 유입된다고 하였으며, Schilling(2002)은 질소부하가 여름과 늦가을동안 기저유출을 통해 가장 크게 발생한다고 하였다. 특히 농업소유역 하천의 질산성 질소와 총질소의 농도는 주변 지하수의 질산성 질소와 총질소의 농도와 매우 유사한 것으로 조사되었다(최 등, 1999).

농업 유역에서 발생하는 질소오염부하를 저감시키기 위해서는 오염부하가 하천으로 유입되는 공간적인 변동특성과 이동경로에 대한 이해가 요구된다. 기저유출이 하천의 질소부하의 이동기작 메카니즘으로(Hallberg, 1987), 질소가 하천에 유입되기 전에 그것을 차단하고 줄이기 위해서는 기저유출에 의한 질소부하의 시간에 따른 변동과 양의 정량화가 필요하다(schilling and Zhang, 2004). 그러나, 지금까지 우리나라에서는 하천의 오염부하특성에 국한되어 연구가 수행되어 왔으며, 기저유출에 의한 하천의 오염부하특성에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 한강 상류 농업유역에서 측정된 하천유량에서 기저유출을 분리하여 기저유출에 의한 오염부하특성을 분석하였다. 이는 소유역의 오염배출특성을 이해하고 유역의 관리방법의 개발과 적용에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

## II. 연구방법

### 2.1 연구유역

연구유역은 북한강 유역의 강원도 춘천시 동면 월곡리 소하천 유역을 선정하였다. 유역면적은 3.41 km<sup>2</sup>이고, 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 소하천 유역은 유역경사가 급하고 농지 규모가 작으며, 집약적으로 이용되는 토지가 많지 않아 오염배출이 큰 토지 규모는 많지 않은 것으로 조사되었다. 월곡리 소하천의 유량 및 수질 관측지점(S)의 위치는 Fig 1 과 같다.

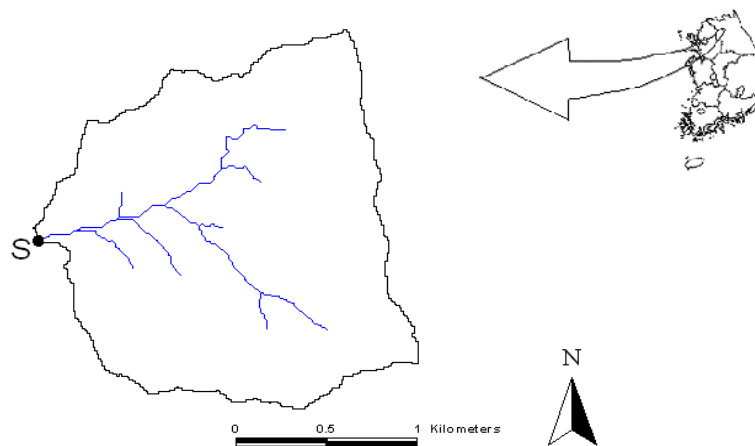


Fig 1. Location of the Weolgokri watershed

### 2.2 유량 및 수질분석

월곡리 소하천의 유량 산정을 위하여 압력식 수위계를 설치하여 2004년 04월부터 2005년 3월 까지 수위를 측정하였다. 수위는 강우시에는 5분 간격으로 그리고 비강우시에는 30분 간격으로 측정하여 유량을 산정하였다. 월곡리 소하천의 기저유출에 의한 오염부하특성을 구명하기 위해서는 하천유량에서 기저유출을 분리해야 한다. 기저유출을 분리하는 방법에는 1) 지하수 감수곡선법, 2) 직선 분리법, 3) N-day 법 등이 이용되고 있으나 장기간의 유량자료에 적용하기에는 시간이 많이 소요되며 주관적인 면이 강하기 때문에 최근에는 Digital filtering 방법이 많이 이용되고 있다(Lyne and Hollick, 1979; Nathan and McMahon, 1990; Arnold and Allen, 1999; Eckhardt, 2005;

Lim et al., 2005). Digital filtering 방법은 고주파 신호에서 저주파신호를 분리하는 일련의 과정을 말한다(Lyne and Hollick, 1979). 하천유량에서 직접유출을 분리하는 것은 저주파(기저유출) 신호에서 고주파(직접유출) 신호를 분리하는 일련의 과정과 유사하기 때문에(Eckhardt, 2005), Digital filtering 방법이 기저유출을 분리하기 위해 사용되고 있다(Eckhardt, 2005). 기저유출은 유역의 지형학적 특성, 지질학적 특성, 토양성질, 토지이용도, 및 기후학적 특성 등과 같은 많은 인자들에 영향을 받는다(Zecharias and Brutsaert, 1988). 하지만 Lyne and Hollick (1979)에 의해 개발된 Digital filtering 방법은 유역의 특성이 반영되지 않았기 때문에, Eckhardt(2005)는 Lyne and Hollick (2004)에 의한 Digital filtering 방법에 대수층의 특성을 반영할 수 있는  $BFI_{max}$  변수를 적용하여 기저유출을 산정하였다. 월곡리 유역의 경우 하천이 항상 흐르기 때문에 Eckhardt(2005)가 제시한  $BFI_{max}$  계수 0.80을 사용하여 기저유출을 분리하였다. 공식 (1)은 Eckhardt(2005)가 제시한 Digital filter를 나타낸다.

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max}) \times \alpha \times b_{t-1} + BFI_{max} \times Q_t}{1 - \alpha \times BFI_{max}} \quad (1)$$

여기서  $b_t$ 는 시간  $t$ 일 때의 기저유출,  $b_{t-1}$ 은 시간  $t-1$ 일 때의 기저유출,  $BFI_{max}$ 는 장기간의 하천유량에 대한 최대기저유출률,  $\alpha$ 는 필터계수,  $Q_t$ 는 시간  $t$ 일 때의 하천유량을 나타낸다.

본 연구에서는 Lim et al. (2005)에 의해 개발된 Web-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT) 시스템의 기저유출 분리 모듈 중에서 Eckhardt(2005)가 제시한 Digital filtering 방법을 이용하여 하천유량에서 기저유출을 분리하였다. 하천유량과 기저유출에 의한 농도특성을 분석하기 위하여 총 81개의 수질시료를 채취하였으며, 수질시료분석은  $NO_3-N$ , T-N 및 T-P를 환경부 제정 수질공정시험법의 제반규정에 따라 분석하였다(환경부 수질오염공정시험법, 1996). 하천유량과 기저유출에 의한 오염농도와 오염부하특성을 분석하였으며, 오염부하량은 하천유량 및 기저유출량에 각각의 수질농도를 곱하여 산정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유출특성분석 및 기저유량 산정 결과

월곡리 유역의 2004년 4월부터 2005년 3월까지의 총강우량은 1,365.9 mm 로 우리나라의 연평균 강우량보다 많았다. 비가 많지 않은 평시의 유출량은 연유출량의 30.2%인데 비하여 홍수기간인 7~9월의 유량이 69.8%이었다. 특히 7월의 강우량은 연강우량의 약 39% 정도이었으나 유출량은 연유출량의 44.4%로 높게 나타났다. 월곡리의 연유출률은 연강우량의 약 70.4%로 상당히 높은 유출특성을 보였다(Table 1). 5월과 6월의 유출비는 100 mm 이상의 강우가 발생했음에도 2.2%와 8.2%로 작았으나, 8월과 9월의 유출비는 약 200 mm 정도의 강우량에 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 감소하여 많은 양의 강우가 지표로 유출되는 것으로 판단되었다. 월곡리 수위 관측지점에서 측정된 실측유출량의 약 63%가 기저유출로 측정되었다. 월별 기저유출률은 월유출량이 가장 높은 7월에 35% 로 가장 낮게 나타났으며, 월유출비가 10% 미만일 때에 월별 기저유출률은 84~99% 로 매우 높게 나타나 건기시의 하천유량은 기저유출로 형성되는 것으로 나타났다. 전반적으로, 비강우기간인 봄, 늦가을, 겨울철에 기저유출률이 80% 이상 높게 나타나 기저유출률은 비강우기간에 증가하는 것으로 나타났으며, 7월을 제외한 전체 연구기간동안 기저유출률은 72~99%로 매우 높게 나타났다. 월

곡리 수위 관측지점의 2004년 4월부터 2005년 3월까지 측정된 실측유량의 63%가 기저유출에 의한 것으로 나타나 월곡리 유역의 수문특성이 직접유출보다 기저유출에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Table 1. Summary of Monthly Precipitation, Runoff Volume, Runoff Volume Ratio, Baseflow and Baseflow Ratio in the Weogokri watershed

Month	Monthly Precipitation (mm)	Monthly Runoff Volume(m <sup>3</sup> )	Monthly Runoff Volume Ratio(%)	Monthly Baseflow (m <sup>3</sup> )	Monthly Baseflow Ratio(%)
Apr. 2004	59.7	45,639	1.4	40,545	89
May 2004	135	73,044	2.2	61,704	84
Jun. 2004	105.7	267,663	8.2	237,614	89
Jul. 2004	532.3	1,457,272	44.4	508,670	35
Aug. 2004	215.6	503,953	15.4	362,511	72
Sep. 2004	193.6	326,817	10.0	256,122	78
Oct. 2004	1.8	307,170	9.4	291,989	95
Nov. 2004	43	66,342	2.0	66,255	97
Dec. 2004	27.2	58,983	1.8	56,772	96
Jan. 2005	3.7	45,533	1.4	44,969	99
Feb. 2005	30.8	65,318	1.8	62,189	95
Mar. 2005	17.5	104,458	2.0	95,466	91
Annual Total	1365.9	3,322,192	100	2,082,806	63

### 3.2 오염부하산정

월곡리 소하천의 하천유량 및 기저유출에 따른 NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 오염부하특성을 분석하였다(Table 3). NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 월별 하천오염부하는 0.11~7.29 kg/ha, 0.5~23.07 kg/ha, 0.004~0.579 kg/ha로 나타났다. NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 최대농도는 530 mm 이상의 강우가 발생한 7월에 각각 7.29 kg/ha, 23.07 kg/ha, 0.579 kg/ha로 가장 높게 나타났으며, 100 mm 이상의 강우가 발생한 5월부터 9월까지 4개월 동안 NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 연부하량의 84% 82%, 86%의 오염부하가 발생하여 오염부하특성이 강우와 유출량에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 비강우 기간동안 농업유역에 퇴적된 오염물질이 강우기간동안 직접유출수에 의해 하천에 유입된 것으로 판단되었다. 월별 오염부하는 2004년 4월부터 7월까지 증가하였으나 이후 감소하는 경향을 보였다.

7월의 기저유출에 의한 NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 오염부하는 2.82 kg/ha, 8.97 kg/ha, 0.164 kg/ha로 높게 나타났으며, 5월부터 9월까지 4개월동안 NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 연부하량의 72%, 76% 72%가 발생하는 것으로 나타났다. 하천유량의 NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 오염부하는 13.85 kg/ha, 45.92 kg/ha, 1.887 kg/ha로 나타났으며, 기저유출에 의한 오염부하는 7.43 kg/ha, 24.70 kg/ha, 0.582 kg/ha로 나타났다.

Table 3. Pollutant Loads driven by the Total flow and the Baseflow

<단위: kg/ha>

DATE	Total load			Baseflow load		
	NO <sub>3</sub> -N	T-N	T-P	NO <sub>3</sub> -N	T-N	T-P
Apr. 2004	0.16	0.50	0.074	0.12	0.38	0.060
May 2004	0.33	1.07	0.050	0.11	0.36	0.016
Jun. 2004	1.60	5.28	0.201	1.29	4.04	0.160
Jul. 2004	7.29	23.07	0.579	2.82	8.97	0.164
Aug. 2004	2.03	6.7	0.762	1.01	2.79	0.066
Sep. 2004	0.77	2.73	0.097	0.56	1.87	0.028
Oct. 2004	0.61	2.04	0.066	0.53	1.75	0.031
Nov. 2004	0.26	0.86	0.007	0.25	0.84	0.007
Dec. 2004	0.24	0.79	0.008	0.20	0.65	0.007
Jan. 2005	0.16	0.93	0.004	0.16	0.92	0.004
Feb. 2005	0.29	1.28	0.004	0.28	1.22	0.004
Mar. 2005	0.11	0.67	0.035	0.10	0.61	0.035
Total	13.85	45.92	1.887	7.43	24.70	0.582

NO<sub>3</sub>-N과 T-N의 기저유출에 의한 오염부하는 각각 총오염부하의 약 53%로 직접유출에 의한 오염부하(47%)보다 다소 높게 나타났다. 기저유출에 의한 T-P의 오염부하는 총오염부하의 30%로 기저유출보다는 직접유출에 의해 더 큰 영향(70%)을 받는 것으로 나타났다(Table 4). T-N의 오염부하는 홍수기간인 7월~8월의 특히 많이 발생하였으나 NO<sub>3</sub>-N의 오염부하는 비강우기간동안에도 일정량 이상의 오염부하가 꾸준히 발생하기 때문에 하천의 수질개선을 위해서는 홍수기간 뿐만 아니라 비강우기간에 기저유출 형태로 하천에 유입되는 NO<sub>3</sub>-N 오염부하를 저감시키기 위한 노력이 필요할 것으로 판단되었다. 하천의 부영양화에 큰 영향을 미치는 T-P의 경우에는 7월~8월의 홍수기간에 집중되어 발생하므로 여름철 집중호우기간동안의 토양유실과 같은 T-P가 발생할 수 있는 원인을 분석하여 T-P의 하천유입을 최소화 할 수 있는 최적관리방안의 수립이 필요할 것으로 판단되었다.

Table 4. Comparison of Pollutant Loads by the direct runoff and the baseflow

	% of Direct Runoff Loads	% of Baseflow Loads
NO <sub>3</sub> -N	47	53
T-N	47	53
T-P	70	30

#### 4. 결론

본 연구에서는 한강 상류 농업유역 소하천에 수위 관측지점을 선정하여 2004년 4월부터 2005년 3월까지의 하천유량에서 기저유출을 분리하여 오염부하특성을 분석하였다.

1. 월곡리 하천의 기저유출률은 연 63%로 직접유출보다 높은 것으로 나타났다. 기저유출률은 7월에 35%로 가장 낮게 나타났으며, 월유출이 연유출의 10% 미만일 때에 기저유출률이 84~99%로 매우 높게 나타나 월곡리 유역의 수문특성이 직접유출보다 기저유출에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

2. 연구유역의 NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 오염부하는 13.85 kg/ha, 45.92 kg/ha, 1.887 kg/ha로 나타났으며, 기저유출에 의한 NO<sub>3</sub>-N, T-N 및 T-P의 오염부하는 7.43 kg/ha, 24.70 kg/ha, 0.582 kg/ha로 나타났다.

3. NO<sub>3</sub>-N과 T-N의 기저유출에 의한 오염부하는 전체오염부하의 각각 53%로 직접유출에 의한 오염부하(각각 47%)보다 다소 높게 나타났으며, T-P의 경우 기저유출에 의한 오염부하가 30% 로 T-P의 오염부하는 직접유출에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

### 사사

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

### 참고문헌

- 최중대, 이찬만, 최예환, 1999. 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향, 한국수자원학회논문집, 32(4): 501-510.
- 최중대, 2001. 농업소유역의 지하수 수질과 하천수질 평가, 강원대학교 환경연구소 중점연구소 지원 연구결과 및 연례학술발표회 논문집, pp5-9
- 환경부, 1996. 수질오염공정시험법.
- 한강수계관리위원회, 2003. 친환경적 농업관리에 의한 오염부하의 저감효과 분석.
- Arnold, J. G. and P. M., Allen, 1999. Validation of automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. *Journal of American Water Resources Association* 35(2):411-424.
- Eckhardt, K., 2004. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Accepted for *Hydrological Processes*.
- Hallberg, G. R., 1987. Nitrates in ground water in Iowa. In: D'Itri, F.M., Wolfson, L.G. (Eds.), *Rural Ground Water Contamination*, Lewis, Chelsea Michigan.
- Lyne, V. D. and M., Hollick, 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. *Hydro. And Water Resour. Symp. Institution of Engineers Australia, Perth*. Pp. 89-92.
- Nahatan, R. J. and T. A., McMahon, 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis. *Wat. Resour. Res.* 26(7):1465-1473.
- Schilling, K. E., 2002. Chemical transport from paired agricultural and restored prairie watersheds. *J. Environ. Qual.* 31: 1846-1851.
- Schilling K. and Y. Zhang, 2004. Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA. *Journal of Hydrology* 295(2004) 305-316.
- Zecharias, Y. B. and W. Brutsaert, 1988. Recession Characteristics of groundwater outflow and baseflow mountainous watersheds. *Water Resour. Res.* 24(10): 1651-1658.