

채수빈도를 고려한 소하천의 수질오염부하량 특성 연구

Variations of Estimated Pollutant Loading from Rural Streams with Sampling Intervals

강 문 성* (서울대) · 박 승 우 (서울대) · 윤 광 식 (공주대)
Kang, Moon Seong · Park, Seung Woo · Yoon, Kwang Sik

Abstract

Sampling schemes are intended for use in situations where stream-flow data are collected regularly, but concentration data are collected during only a limited number of time periods. Estimating water pollutant loading considering sampling intervals is presented, and for illustrative purposes the criterion is applied to the sampling station HS#3 of the Balan-reservoir watershed which is located at the southwest of Suwon. The stratification is employed uniformly for all sampling strategies in that the strata boundaries are defined using the actual distribution of flow values and the selected nonexceedence probabilities to minimize inaccuracy. Ratio estimator for SS, T-N, and T-P were used in order to calculate the water pollutant loading. A sampling scheme incorporating stratified sampling with real-time of the sampling characteristics is found to give the appropriate estimate of the mass load.

I. 서론

농업유역의 주요 오염 물질은 유사량과 비료물질, 농약성분 등이며, 그밖에도 생물학적 산소 요구량 등 수질 기준에 적용하는 물질도 중요하다. 그런데, 기존 수질 측정에서 다양한 수질 성분자료를 분석하고 있으므로, 농업유역의 특성에 부합되는 영양물질을 위주로 조사하는 것이 보통이다.

농업유역과 같은 소규모 하천은 대규모 하천에 비해 기상변화에 따라서 유량과 수질이 변화 형태가 다양하기 때문에 채수빈도를 적절하게 설정하여야 올바른 수질상태를 파악할 수 있다 (Sanders and Adrian, 1978). 또한, 오염부하량의 정량적인 해석에 있어서, 채수빈도는 매우 중요한 고려사항으로서, 수질 모니터링의 운용 비용중에 많은 비율이 채수빈도와 직접적으로 관련이 있으며, 오염물질은 수체로 유입되는 경로가 다양하고, 수체 내에서의 오염물질의 거동이 매우 복잡한 요인들로부터 지속적으로 영향을 받으므로, 대상 수체의 특징을 적절히 나타내 주지 못하는 수질항목들에 대한 자료라면 유역의 수질에 대한 잘못된 정보를 제공하게 된다. 따라서, 신뢰성 있는 수질자료의 제공을 위해서 수질 측정위치의 선정, 측정횟수, 측정되는 수질 변수의 요인들을 고려하여야 할 것이다 (남궁규철, 1992).

본 연구의 목적은 소하천에서의 수질오염부하량을 정량적으로 해석하기 위하여, 수문, 수질 자료를 수집·분석하고, 채수빈도를 고려한 오염부하량과 유출량을 고려한 평균농도를 산정하고, 발생원단위와 배출원단위에 의한 오염부하량을 계산하여 그 결과를 고찰하는 데 있다.

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

II. 연구방법

1. 시험구역의 개요

본 연구의 시험구역으로 경기도 화성군 발안 및 팔탄면 소재 발안저수지와 기천저수지 구역의 소유역중에 HS#3을 선정하였다 (그림1). 발안지 구역은 1996년부터 서울대 농공학과에서 수문/수질관측을 실시하고 있으며 구역면적 26.5km² 로 산간지, 중산간지, 평탄지, 취락지 등 다양한 토지이용상태를 보이고 있으며, 본 연구의 시험 소유역인 HS#3은 구역면적 4.1 km² 로 발안저수지 상류에 위치하는 중산간지로서 농경지와 취락지를 포함하고 있다.

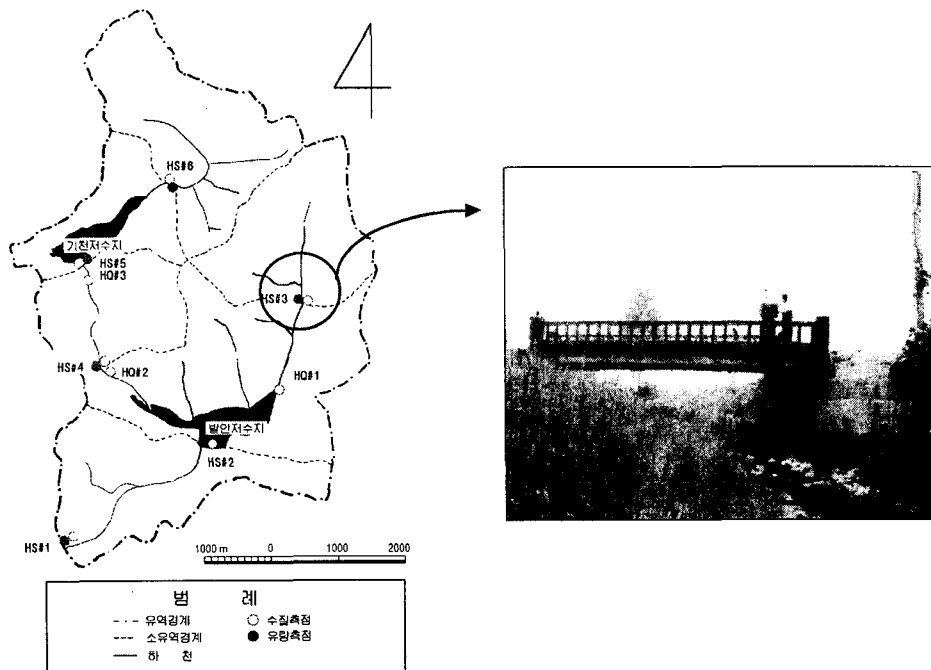
시험구역의 강수-유출 특성 분석과 오염원의 정량적 해석을 위해 HS#3 소유역의 물리적특성, 토양, 토지이용상태 등의 수문특성을 조사하였다.

HS#3 소유역의 수문특성으로서 형상계수는 1.55, 유로장은 1.63m, 최대기복량은 246m, 기복량비는 0.15, 하천평균경사는 0.018, 하천빈도는 0.97 개/km² 등의 값을 나타냈다.

구역의 토양조사는 1/25,000 정밀토양도와 1/50,000 개략토양도를 이용하여 소유역별 토양분류를 실시하고, 그 배수특성의 속성에 따라 수문학적 토양군으로 분류하였다. HS#3 소유역은 A, B군이 각각 49.7%, 14.6% 등으로 전체의 약 64%를 차지하였고, C, D군이 각각 31.8%, 3.9%의 값을 보였다.

시험구역의 토지이용상태를 토지이용도와 행정조사 결과를 이용하여 산림, 논, 밭, 기타 등으로 구분하였으며, 산림의 면적이 전체 면적의 58.1%, 논이 26.3%, 밭이 9.6%, 기타가 6.1%로서 산림의 비율이 상대적으로 높아 중산간지의 특징을 나타냈다.

시험구역의 인문사회환경으로서 인구가 1,991명, 한우 8두, 유우 352두, 돼지 285두, 기타 가축이 44마리 등으로 조사되었다.



(그림1) 시험구역의 광경

2. 수문/수질 조사

시험유역의 수문계측은 <그림 1>에서와 같이, 수문자료를 조사하기 위해 자기수위계를 설치하였으며, 자기수위계의 수위기록지를 판독하여 시간별 수위를 구하고, 이를 평균하여 일수위를 구하였다. 수위관측시 자기수위지의 보정을 위해 기록지 설치와 수거시 수위를 표척을 이용하여 읽고, 이 값과 수위기록지의 값을 비교, 보정하였다. 수문 관측점의 수위-유량관계는 수위에 따른 유속을 측정하여, 그 결과로부터 수위-유량관계를 얻었고, 일유량은 일수위를 수위-유량관계에 적용하여 구하였다.

HS#3 측정점의 수위-유량관계식은 식 (1)과 같다.

$$Q = 7.795 H^{3.9516} \quad (1)$$

여기서, Q는 유량 (m³/s), H는 수위 (m)이다.

수질조사는 수질분석을 통하여 얻은 정성적인 자료를 바탕으로 해당 유역의 오염 부하량을 결정할 수 있도록 하였다. 수질 표본의 채수는 결빙기를 제외한 기간동안 2주마다 1회 실시하였으며, 수질표본의 분석은 pH, DO, 온도 등은 현장에서 직접 측정하였고, 부유물과 총인 및 총질소 항목은 공정시험법에 의해 실험실 분석을 실시하였다.

3. 오염부하량 및 평균농도

시료채취방법에는 일정기간에 현장을 방문하여 채수를 하는 고정빈도채수 (Fixed-Frequency Sampling, FFS)와 자동채수기를 이용하여 하천수위변화를 고려하여 연속적으로 채수하는 실시간채수 (Real-Time Sampling) 등이 있다. 본 연구에서는 고정빈도채수에 의한 자료를 중심으로 실시간 연속채취 자료를 이용하여 오염부하량 및 평균농도를 산정하였다.

유사량은 수위와 부유물 농도를 회귀분석하여 구하였으며, 오염부하량은 식 (2)에 나타난 비율추정법 (Ratio estimator)을 이용하여 산정하였다.

$$\bar{L} = \bar{Q} \frac{\bar{l}}{\bar{q}} = \bar{Q} \frac{\sum_{i=1}^n c_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (2)$$

여기서, \bar{L} 은 평균오염부하량, \bar{Q} 는 평균유출량, \bar{l} 은 평균채수부하량, 그리고 c_i 와 q_i 는 각 i 기간의 수질농도와 유출량이다.

유출량을 고려한 평균농도는 식 (3)와 같다.

$$C_f = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m q_j t_j \right]_i} \quad (3)$$

여기서, C_f 는 평균농도이다.

가. 유사량

시험유역의 유량과 부유물 농도의 관계는 회귀분석을 시도하였다. 유량-부유물 농도의 관계를 전대수지에 표시하여 본 결과, 부유물 농도는 유량과 지수적 증가를 나타내고 있었기 때문에 식 (4)을 기본 모델로 하여 측정별 상수와 지수를 구하였다.

$$S = c Q^{e_1} \quad (4)$$

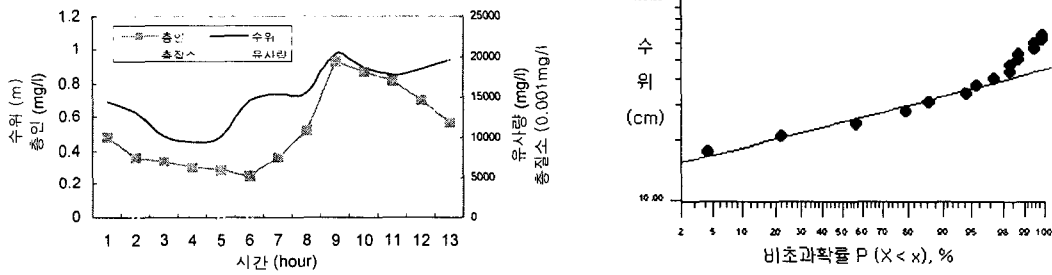
여기서, S = 부유물 농도 (mg/l), Q = 유량 (m³/s), 그리고 c와 e₁ = 상수와 지수이다.

나. 총질소

시험유역의 유량과 총질소와의 변화를 도시한 결과, 유량의 변화와 총질소와의 농도는 뚜렷한 경향이 없었으며, 선형과 지수함수로써 표시하도록 하는 회귀분석을 시도하였으나, 상관성이 나타나지 않았다. 또한, (그림2)에서와 같이, 자동시료채수기에 의한 실시간 채수를 실시하여 유량의 변화에 따른 총질소 농도를 고찰하였으나 경향성이 나타나지 않았다. 따라서, 오염부하량의 산정은 시료의 채수간격을 고려하여 시료가 대표하는 시간간격을 결정하고, 그 시간간격동안의 유출량과 측정농도를 이용하여 산정하였다.

다. 총인

시험유역의 유량과 총인의 변화에 대해 회귀분석을 실시한 결과, 상관성이 나타나지 않았으나, (그림2)에서와 같이 1998년 6월 25일 10시 30분 부터 30분 간격으로 실시간 채수를 한 결과, 유량과 총인의 농도가 유사한 경향을 보였다. 따라서, (그림3)에서와 같이, 수위에 대한 비초과 확률을 계산한 후, 유출량을 계급으로 구분하여 계층화하였으며, 실시간 채수에 의해 분석된 농도를 근간으로 계층화된 유량의 대표농도를 결정하여 오염부하량을 계산하였다.



(그림2) HS#3 측정점의 수위와 실시간 오염부하 관계 (그림3) HS#3 측정점 유량의 비초과 확률

4. 오염발생부하량

유역에서의 오염발생부하량은 오염원별로 발생원단위를 적용하여 산출하였다. <표1>은 생활하수 발생원단위, 축산분뇨 발생원단위, 토지이용에 대한 발생원단위를 나타내고 있다.

<표1> 발생원단위

| 구 분 | 생활하수(g/day-인) | | 축산분뇨(g/day-두) | | | | 토지이용 오염원(kg/day/km ²) | | | | |
|------|----------------|-----|---------------|-------|------|------|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|
| | 생활잡배수 (비시가) | 분뇨 | 한우 | 젓소 | 돼지 | 가금 | 논 | 밭 | 산림 | 대지 | 기타 |
| 부유물질 | | | 3800 | 4345 | 356 | 18 | 4.41 | 7.59 | 1.26 | 227.7 | 1.26 |
| 총질소 | 1.0 | 9.0 | 128 | 126.5 | 20.4 | 0.96 | 2.33 | 2.33 | 0.55 | 0.769 | 0.759 |
| 총인 | 0.4 | 1.0 | 72 | 187 | 16.8 | 0.78 | 0.17 | 0.17 | 0.013 | 0.027 | 0.027 |

참고자료 : 농어촌용수 환경관리에 관한 연구 (Ⅱ), 농어촌진흥공사. 1993. p. 91.
환경정책자료집 (Ⅱ), 환경부. 1994.

5. 오염배출부하량

유역의 오염배출부하량을 산정하기 위해서 오염원 배출 특성을 조사하고, 배출원단위 자료를 이용하였다.

생활잡배수의 배출부하량은 생활하수 처리시설이 없는 것으로 보고, 발생부하량 전량이 하천으로 배출되는 것으로 산정하였고, 분뇨의 경우는 가정용 단독정화조의 부하제거율인 총질소 7%, 총인 15%을 고려하여 계산하였다.

가축에 의한 배출부하량은 <표2>에서 제시된 환경부 자료를 이용하여 계산하였으며, 토지이용에 따른 배출부하량은 발생부하량 전량이 배출되는 것으로 가정하여 계산하였다.

<표2> 가축에 의한 배출원단위

| 구 분 | 한우 | 젓소 | 돼지 | 가금 |
|------|------|------|------|-------|
| 부유물질 | 40.6 | 50.8 | 20.8 | 0.36 |
| 총질소 | 14.7 | 17.8 | 5.6 | 0.019 |
| 총인 | 2.0 | 2.4 | 1.9 | 0.016 |

주) 환경정책자료집 (II), 환경부, 1994.

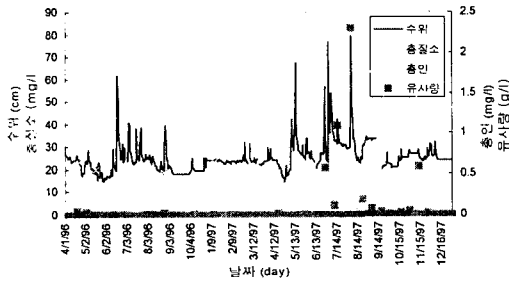
III. 결과 및 고찰

1. 수문, 수질 자료

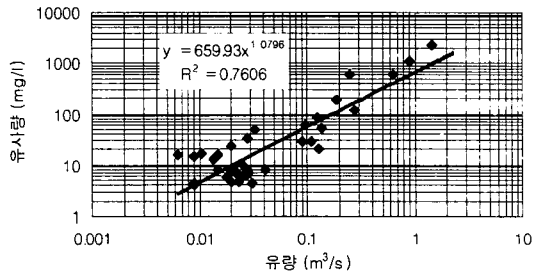
본 연구의 수문, 수질 자료는 (그림4)에서와 같이 1996년도 4월 1일부터 10월 26일까지 자료와 1997년도 전 기간에 대한 HS#3 측점의 자료를 이용하였다.

수문분석을 실시한 결과, 1996년도의 자료기간에 대한 강수량은 734 mm, 유출율은 33 %였고, 1997년의 자료기간에 대해서는 강수량이 1228 mm, 유출율이 44 %였다.

수질분석은 수질공정시험법에 제시된 방법에 의해 실시하였다. 시기별 유사량은 강우시에 높게 나타났으며, 최대값은 2307 mg/l, 최소값은 1.0 mg/l, 평균은 190.5 mg/l, 표준편차는 519.5 mg/l의 값을 나타냈다. 총질소와 총인은 각각 최대값이 14.87 mg/l, 1.55 mg/l, 최소값은 1.16 mg/l, 0.09 mg/l, 평균은 7.54 mg/l, 0.43 mg/l였고, 표준편차는 3.32 mg/l, 0.30 mg/l의 값을 나타내었다.



(그림4) 시기별 수위-수질 변화



(그림5) HS#3 측점의 유량-유사량 관계

2. 오염부하량, 평균농도

시험유역의 유량과 부유물 농도의 회귀분석을 수행한 결과는 (그림5)에 나타난 바와 같으며, 유량과 부유물 농도와의 관계식은 식 (5)와 같고, 상관계수는 0.76이었다.

$$S = 695.93 Q^{1.0796} \quad (5)$$

시험유역의 유사량, 총질소, 그리고 총인의 연도별 오염부하량과 오염원단위에 의해 계산된 배출부하량과 발생부하량은 <표3>에서와 같다.

<표3> 오염배출부하량과 발생부하량의 비교

단위; kg/day

| 구 분 | 1996년 | 1997년 | 발생부하량 | 배출부하량 |
|-----|---------|---------|---------|-------|
| 유사량 | 1385.45 | 4556.82 | 1673.15 | 35.20 |
| 총질소 | 35.44 | 38.30 | 60.71 | 32.16 |
| 총 인 | 1.75 | 2.39 | 74.30 | 4.18 |

유출량을 고려한 평균농도는 <표4>에서와 같았으며, 유사량의 경우는 비교적 큰 값을 보였고, 총질소와 총인은 대상기간에 측정된 농도의 평균값과 비슷한 값을 보였다.

<표4> 유출량을 고려한 평균농도, 단위; mg/l

| 구 분 | 유사량 | 총질소 | 총 인 |
|-------|--------|------|------|
| 1996년 | 379.10 | 7.32 | 0.36 |
| 1997년 | 709.42 | 5.96 | 0.37 |

IV. 요약 및 결론

농업유역 소하천에서의 수질오염부하량을 정량적으로 해석하기 위하여, 시험유역인 발안저수지 유역의 HS#3 소유역을 대상으로 1996년과 1997년의 자료기간에 대해 수문, 수질자료를 수집·분석하고, 채수빈도를 고려한 오염부하 특성을 분석하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 발안저수지 유역의 HS#3 소유역을 시험유역으로 선정하여, 유역수문특성 및 사회인문환경을 조사하였고, 연속적인 수문자료의 구축과 주기적인 수질 자료를 수집 분석하였다.
- 2) 수문/수질분석을 실시한 결과, 1996년의 자료기간에 대한 유출율은 33 %였고, 1997년에는 44 %였으며, 전 자료기간에 대한 유사량, 총질소, 그리고 총인의 평균값은 각각 190.5 mg/l, 7.54 mg/l, 0.43 mg/l의 값을 보였다.
- 3) 채수빈도와 유출량을 계층화하여 부유물과 총질소, 총인 등의 오염부하량을 추정된 결과 유사량은 1996년도에 1385.45 kg/day, 1997년에는 4556.82 kg/day의 값을 보였고, 원단위에 의한 배출부하량은 35.20 kg/day의 값을 나타냈으며, 총질소와 총인은 각각 1996년도에 35.44 kg/day, 1.75 kg/day, 1997년도에는 38.30 kg/day, 2.39 kg/day, 그리고 원단위에 의한 배출부하량은 각각 32.16 kg/day 와 4.18 kg/day의 값을 나타냈다.
- 4) 유출량을 고려한 평균농도는 1996년도의 자료기간에 대한 유사량이 379.1 mg/l, 총질소가 7.32 mg/l, 총인이 0.36의 값을 보였고, 1997년도의 자료기간에 대해서는 각각 709.42 mg/l, 5.96 mg/l, 0.37 mg/l의 값을 보임으로서 측정농도의 평균값과 유사한 경향을 보였다.

V. 참고문헌

1. 남궁규철, 1992. 우리나라 수질오염 측정망의 문제점 및 개선방안에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
2. Burn, D. H., 1990. Real-Time Sampling Strategies for Estimating Nutrient Loadings, Journal of Resources Planning and Management, 116 (6), pp. 727-741.
3. Sanders, T. G., and D. D. Adrian, 1978. Sampling frequency for river quality monitoring, Water Resource Research, 14 (4), pp. 569-576.