

미호천 유역의 유출량과 오염부하량의 상관관계 분석

○정상만*, 최정현**

1. 서론

우리나라는 토지이용이 고밀도로 이루어지고 있기 때문에 유역에서 발생하는 오염물질 중 비점오염원의 비율이 매우 높고 발생량의 대부분이 하천으로 유입되고 있다. 4대강의 하나인 금강도 우리나라의 다른 주요하천과 마찬가지로 하류쪽으로 갈수록 점점 물오염이 심각해지고 있다. 이에 따라 평·갈수시 및 홍수시의 물오염원과 물오염현황을 파악하여 대상유역으로 흘러 들어오는 유출량과 오염부하량을 동시에 조사하고 이를 통해 현실적인 수질관리 대책을 제시할 필요가 커지고 있다. 따라서 하천에 대한 현실적인 수질관리를 위해 유역별 전체 오염부하량 파악이 필요하다.

본 연구는 하천의 물리적, 생화학적 주요 수질항목을 중심으로 이들간의 상관성 분석을 통해 하천수질관리 대책을 위한 기초자료를 제공함과 더불어 효율적인 유역관리를 위해 필요한 기초조사 및 해석을 수행하는데 그 목적이 있다.

이를 위해 금강수계의 지류인 미호천유역을 대상으로 평·갈수시 및 홍수시에 발생하는 유량 및 수질을 분석하였고, 유량변화곡선과 유출특성치를 통해 유역의 유출특성을 살펴보았다. 또한 오염원이 집중되는 대표지점을 선정하여 유출량과 수질항목간의 상관관계를 분석하였으며 이를 바탕으로 대상지점별 단위면적당 유출량 변화에 따른 단위면적당 오염부하량과의 상관관계를 도출하고자 하였다.

2. 유량과 수질의 상관관계에 대한 연구동향 및 사례

강우시 소유역에서 유출되는 오염물질의 특성 및 해석에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었는데, 국내에서 이관영(1995)은 강우강도, 유출량, 부하량과 농도와의 4가지 함수를 이용하여 구성된 여러 모델을 실측값과 비교한 결과 유출량과 오염부하량의 지수함수로 구성된 모델이 실측농도에 가장 잘 일치된다고 보고하였다. 권순국(1998)은 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안 연구를 통해 우리나라에서 관심을 보이지 않고 있지만 가까운 미래에 중요성이 부각될 잠재적 오염원인 비점오염원에 대하여 우리나라에서의 실태와 문제점을 살펴보고 개선방안을 제시하였다.

외국에서 Sartor 등(1974)은 인공적으로 거리에 살수를 하여 노면의 상태, 토지이용별 오염물질의 유출 특성에 대해 연구하였는데, 오염물질의 유출량은 강우강도에 비례하며, 노면에 축적된 오염부하량에 비례한다는 관계를 제시하였다. 현재까지 개발된 많은 유출모델들이 Sartor등의 연구를 기초로 하여 제시되었다. Colston(1974)은 도시지역의 여러 토지이용별 소유역에 대해 2년간 강우시 유출수질 및 유출량을 분석하여 수질농도 C를 예측하는 함수로 유출량 Q, 강우지속시간 T, 그리고 회귀계수 a, b, c를 이용하여 $C=a \cdot Q^b \cdot T^c$ 란 관계식을 제안하였다. Loehr(1974)는 도시지역과 비도시지역, 산림지역 등 토지이용에 따라 강우시 단위면적당 연간 오염물질 발생부하량을 제시하였고, 발생원단위를 수질성분별, 계절별로 제시하였다. Klemetson(1985)은 SS에 대해 Colston이 제시한 유출량과 강우지속시간과의 함수식을 적용한 결과, 강우강도, 강우지속시간과 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. 和田(1990)는 강우시 합류식하수관 월류수의 수질변동을 조사한 결과 건기시 농도변화보다 2~3배의 범위이고, 유역에 따라서 최대농도는 평균농도의 10배를 초과한다고 하였다. 또한 단위면적당, 단위강우량당 강우시 유출되는 오염부하량은 BOD₅, COD, SS에 대해 각각 0.898 kg/ha/mm, 0.553 kg/ha/mm, 1.897 kg/ha/mm를 제시하였는데, SS의 경우 건기시와 비교하여 강우시에 3배 이상의 부하량을 나타내는 것으로 밝히고 있다.

* 공주대학교 토목환경공학과 부교수

** 공주대학교 대학원 토목공학과 석사

3. 대상구역의 선정 및 분석항목

3.1 대상구역의 선정

본 연구의 대상구역인 미호천유역은 금강분류의 물오염에 중요한 영향을 미치는 지점으로 충남 북부지역의 강우유출수가 집수되고, 유출량과 수질의 동시측정이 용이한 지점이다. 유출량 산정을 위한 유량측정은 접근이 용이한 석화, 북일, 옥산, 청주 텔레미터 수위관측소 지점을 선정하였고, 오염부하량 산정을 위한 수질조사지점은 유량측정지점과 가장 근접해 있는 미호천(미호천교), 미호천(신팔결교), 병천천(쌍신교), 무심천(문암동 철교)을 각각 선정하였다. 선정된 미호천 유역의 주요 유량측정 지점과 수질조사지점을 나타내면 그림 1과 같다.

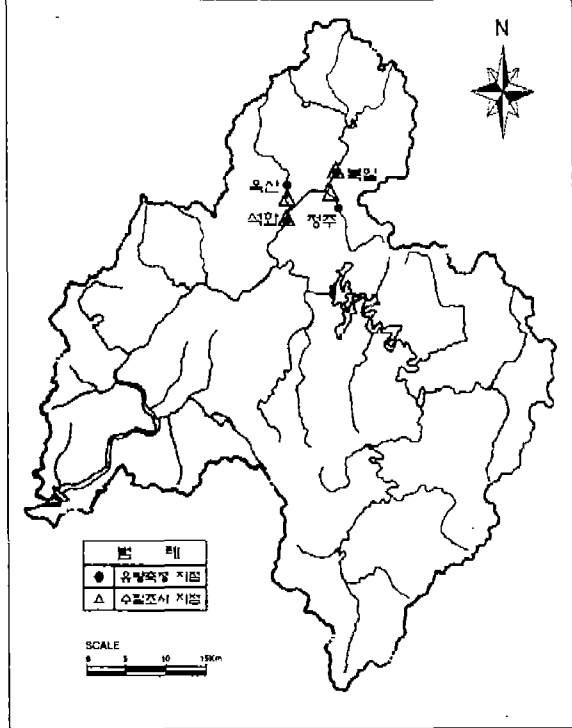


그림 1. 유량측정 및 수질조사지점 위치도

3.2 유량과 수질 분석

미호천 유역에 대한 유량과 수질을 조사하기 위해 1998년과 1999년에 걸쳐 현장답사 및 단면측량, 유량측정, 수질조사를 실시하였다. 월평균유출량 산정을 위해 조사기간동안의 유량측정 결과 주요지점의 수위-유량관계곡선(Rating Curve)을 개발하였고, 수질분석방법은 Standard Method에 준하여 실시하였다. 수질분석결과 DO는 계절에 따라 6~15 mg/L의 범위를 나타내었으나 오염원이 집중되는 하류지역인 석화에서 비교적 낮게 나타났다.

BOD₅의 분석결과 옥산과 청주에서는 대부분의 기간동안 2등급의 수질(1~3 mg/L)을 나타내는 반면 하류지역인 석화와 북일에서는 비교적 큰 폭의 변화를 보이면서 오염강도가 큰 것으로 나타났으며 COD와 SS는 BOD₅와 비슷한 변화추세를 보이고 있다. 한편, 영양염류의 경우도 양호한 수질을 보이는 옥산과 청주의 경우 2.0~4.0 mgT-N/L 와 10~200 µgT-P/L를 보이고 있는 반면 석화와 북일에서는 2.0~9.5 mgT-N/L 및 100~400 µgT-P/L 로 큰 폭의 변화를 보이고 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 미호천 유역의 유출특성 및 오염물질 이동특성

본 연구에서는 미호천 유역의 유출특성을 파악하기 위하여 '99년 7월 27일 ~ '99년 8월 5일의 호우사상을 선정하여 시간별 수위를 수위-유량관계곡선에 적용하여 유량으로 환산한 뒤 유량수문곡선을 작성하고, 주요 지점에서 측정된 유출량 및 수질에 대한 통계특성치(왜곡도계수, 첨도계수)를 살펴본 결과 불투수층 면적비율이 크고 유역면적이 작은 옥산과 청주는 강우초기에 유출량의 증가와 함께 급격한 농도증가현상으로 정규분포형태보다 분포중심이 좌측으로 치우치는 경향을 가지며, 예리한 첨두값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 대체로 유역면적이 크고, 투수층 면적비율이 큰 석화, 북일의 경우는 유출량의 증가에 따라 수질농도도 증가하지만 같은 유량증가에서의 농도변화폭은 옥산, 청주보다 작은 특성을 나타내었다.

미호천 유역의 오염물질 이동특성을 살펴보기 위하여 '98년 ~ '99년에 걸쳐 조사된 수질농도의 변화양상을 정리하였는데, 주요 지점별로 홍수기와 비홍수기로 나누어 수질농도의 변화특성을 살펴본 결과 전반적으로 비홍수기보다 홍수기에 유출량과 수질농도변화가 크게 나타났으며, 또한 강우강도와 유역경사, 유역면적을 고려하여 수질농도변화를 살펴본 결과 유역경사가 작고 유역면적이 큰 지점일수록 수질농도의 변화는 작게 나타났다. 결국 홍수기와 비홍수기의 유출수질농도의 변화는 강우강도와 유역경사, 유역면적 등에 따라 변화폭이 다른 양상을 보임을 알 수 있었다.

4.2 유출량과 오염부하량의 상관관계 분석

4.2.1 유출량과 수질농도간의 상관관계 분석

주요지점에서 조사한 유출량과 수질농도간의 상관관계를 분석한 결과 수질항목별로 0.051~0.673으로 낮은 상관계수값을 보였지만 유출량과 가장 유의한 상관성이 있는 항목으로는 DO, SS로 나타났다. 주요 지점의 토지이용상태가 청주 이외에는 주로 농업지역이므로 SS에 흡착되어 거동을 같이한다고 볼 수 있는 T-P도 강우시 함께 유출되어 비교적 상관성이 큰 것으로 나타났다(日本下水道協會, 1982).

4.2.2 유출량과 오염부하량의 상관관계 분석

강우시의 오염부하량은 기저유출성분인 자연부하와 가정 및 상공업지역에서 배출되는 오수, 그리고 지표면 세척에 의한 오염부하량의 합이다. 강우시 오염부하량은 강우지속시간에 따라 오염물질의 농도는 감소하여도 유출량 증가로 인하여 오염부하량은 증가하므로 비점오염원 해석에 있어서 중요한 인자이다(Wanielista M. P., 1978).

오염부하량과 유출량과의 관계는 식 (1)과 같이 지수함수로 표현할 수 있다(Huber W. C., 1988).

$$L = a Q^b \quad (1)$$

여기서, L = 오염부하량(kg/day), Q = 유출량(m³/day) 그리고 a, b = 회귀계수이다.

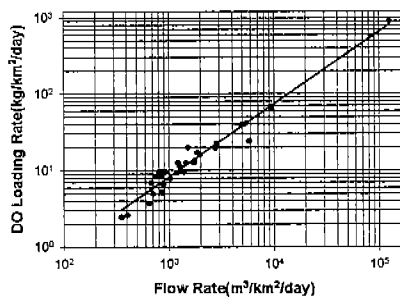
본 연구에서는 주요지점의 유역면적 A를 고려하여 식 (1)을 일반화시켜 다음 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\frac{L}{A} = a \left(\frac{Q}{A} \right)^b \quad (2)$$

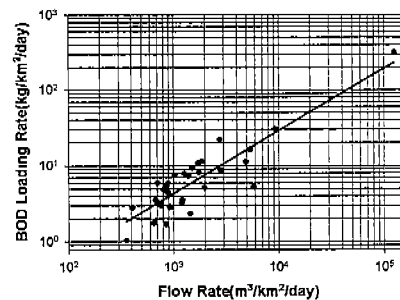
여기서, L/A = 단위면적당 오염부하량(kg/km²/day), Q/A = 단위면적당 유출량(m³/km²/day)이다.

식 (2)의 양변에 로그를 취하고 그래프에 도시하면 직선의 기울기와 절편을 통해 회귀계수 a, b를 구할 수 있다. 이때 a값은 기저유출 부하량과 관련이 있는 계수이다. b값은 회귀식의 기울기를 의미하므로 b값이 1보다 크면 유출량 증가에 대해 오염부하량이 급격히 증가하는 특성을 나타내는데 일반적으로 SS와 같은 입자성 물질은 b값이 큰 경향을 나타내는 반면, 용존성 물질은 b값이 1 근처이거나 그보다 작아 유출량 변화에 비해 수질농도변화가 적은 경우도 있다.

식 (2)를 적용하여 주요지점의 수질항목별 단위면적당 유출량에 대한 오염부하량과의 관계를 그림으로 나타내었는데 오염원이 집중되는 석화지점을 선정하여 그림 2에 제시하였다.

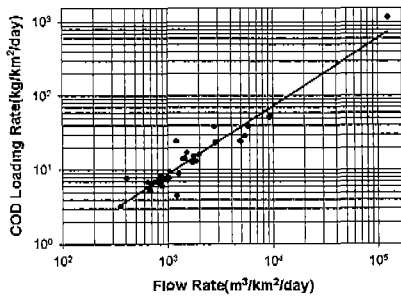


(a) DO

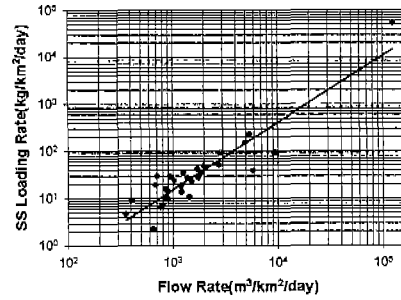


(b) BOD₅

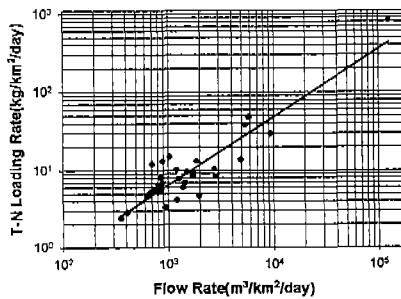
그림 2. 석화지점의 유출량과 오염부하량의 상관관계(계속)



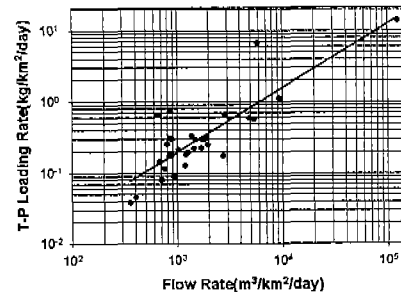
(c) COD



(d) SS



(e) T-N



(f) T-P

그림 2. 석화지점의 유출량과 오염부하량의 상관관계

단위면적당 유출량과 오염부하량의 관계에서 분석된 회귀계수 및 상관계수를 표 1에 제시하였고, 유출량과 오염부하량의 상관계수 분석결과를 정리하여 표 2에 나타내었다. 표 1에서 석화지점의 경우 단위면적당 유출량과 오염부하량의 상관계수가 0.762~0.976으로 나타났고, 복일지점은 0.969~0.997로 높게 나타났다. 그리고 옥산지점의 경우도 상관계수값이 0.935~0.994로 높게 나타났으며, 청주지점도 0.967~0.998로 매우 높게 나타나 식 (2)에 의한 단위면적당 유출량과 단위면적당 오염부하량의 관계를 이용한 해석이 매우 타당하리라 판단된다. 또한, 항목별 계수값의 크기를 비교하면 BOD₅의 경우 b값이 0.824~1.024의 범위를 보이는데, 비교적 유역면적이 작은 지점으로 갈수록 b값이 크게 나타나 옥산지점의 경우는 유출량 증가에 비해 BOD부하량이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. COD는 BOD₅에 비해 b값이 크게 나타나 단위면적당 유출량 변화에 보다 민감하며, 그 범위는 0.919~1.019로 나타났다. 단위면적당 유출량에 가장 민감하게 반응하는 SS의 경우는 1.014~1.426으로 모든 수질성분 중에 가장 큰 값을 나타내었다. T-N과 T-P의 b값의 범위는 각각 0.869~0.971 및 0.902~1.315로 나타났고, 그 크기는 석화지점이 가장 작고 복일, 옥산, 청주의 순으로 점점 크게 나타나 유역면적이 작은 지점일수록 유출량 변화에 민감한 반응을 보였다.

표 2에서 보는 바와 같이 오염물질별 유출특성에 대해 상관계수를 기준으로 분석하면, BOD₅와 T-N의 상관계수 평균값이 0.962를 보임으로써 이들 물질들의 유출특성에 대한 유사성이 매우 큰 것으로 추정된다. T-P의 경우 복일, 옥산, 청주의 경우 유출량에 대한 상관계수값이 각각 0.969, 0.935, 0.967로 높은 상관성을 보였지만, 석화지점은 상관계수값이 0.830으로 다소 낮게 나타났다. 그러나 b값의 범위가 0.902~1.315로 매우 높게 나타났는데, 석화지점 SS의 상관계수가 0.762인 점과 지점별로 b값의 크기도 1보다 큰 것으로 볼 때, T-P는 SS의 유출경로와 유사한 것으로 판단된다.

표 1. 유출량과 오염부하량사이의 회귀계수 및 상관계수

Site	Coefficient	Constituents					
		DO	BOD ₅	COD	SS	T-N	T-P
석 화	a	1.16×10^{-2}	1.46×10^{-2}	1.53×10^{-2}	7.85×10^{-4}	1.60×10^{-2}	3.88×10^{-4}
	b	0.950	0.824	0.919	1.426	0.869	0.902
	r	0.976	0.881	0.953	0.762	0.905	0.830
북 일	a	1.15×10^{-2}	4.58×10^{-3}	5.87×10^{-3}	8.39×10^{-3}	6.31×10^{-3}	2.28×10^{-4}
	b	0.952	0.941	1.006	1.106	0.971	0.965
	r	0.997	0.985	0.993	0.996	0.975	0.969
옥 산	a	1.58×10^{-2}	1.10×10^{-3}	1.29×10^{-3}	6.85×10^{-4}	3.73×10^{-3}	7.64×10^{-6}
	b	0.937	1.024	1.109	1.278	0.938	1.248
	r	0.994	0.987	0.987	0.935	0.976	0.935
청 주	a	1.47×10^{-2}	3.40×10^{-3}	4.15×10^{-3}	5.05×10^{-3}	2.87×10^{-3}	1.11×10^{-5}
	b	0.953	0.956	1.016	1.014	0.961	1.315
	r	0.998	0.994	0.995	0.967	0.991	0.967

표 2. 유출량과 오염부하량의 상관계수 분석결과

구 분	DO	BOD ₅	COD	SS	T-N	T-P
석 화	0.976	0.881	0.953	0.762	0.905	0.830
북 일	0.997	0.985	0.993	0.996	0.975	0.969
옥 산	0.994	0.987	0.987	0.935	0.976	0.935
청 주	0.998	0.994	0.995	0.967	0.991	0.967
평균값	0.991	0.962	0.982	0.915	0.962	0.925
최소값	0.976	0.881	0.953	0.762	0.905	0.830
최대값	0.998	0.994	0.995	0.996	0.991	0.969

5. 결 론

미호천유역의 유출량과 오염부하량의 상관관계 분석결과를 요약하면 수질항목별 단위면적당 유출량에 대한 단위면적당 오염부하량의 상관관계 분석 결과, pH, DO, BOD₅, COD, SS, T-N, T-P의 상관계수의 범위는 0.762~0.998로 비교적 높은 값을 얻었고, 수질항목별 단위면적당 유출량에 대한 오염부하량과의 관계에서 수질항목별 회귀식의 기울기를 나타내는 b값의 크기를 비교하면, BOD₅의 경우는 0.824~1.024, COD는 0.919~1.019로 나타났다. SS의 경우는 1.014~1.426으로 모든 수질성분 중에 가장 큰 값을 나타내었다. T-N과 T-P의 경우는 각각 0.869~0.971 및 0.902~1.315로 나타났고, 그 크기는 석화가 가장 작고 북일, 옥산, 청주의 순으로 점점 크게 나타나 유역면적이 작은 지점일수록 유출량 변화에 민감한 반응을 보였다. 또한 오염물질별 유출특성을 상관계수를 기준으로 분석한 결과, BOD₅와 T-N의 상관계수의 평균값이 0.962로 유사한 값을 보였고, T-P의 경우 SS와 유사하게 석화지점의 상관계수가 유난히 타 지점보다 낮고 유역별로 b값의 크기순서도 유사한 것으로 볼 때, T-P는 SS의 유출경로와 유사한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 권순국 (1998), “우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안”, 대한환경공학회지, 20(11), pp. 1497~1510.
- 이관영 (1995), “소도시 배수구의 오탁부하량 추정에 관한 연구”, 대한상하수도학회지, 1, pp. 89~95.
- Colston N. V. (1974), “Characterization and treatment of urban land runoff”, U.S. EPA-670/2-74-096.
- Huber W. C. and Barnwell T. O. (1988), Stormwater management model, Version 4 : user’s manual, US. EPA, Athens, Georgia, pp. 59~282.
- Klemetson S. L. (1985), “Factors affecting stream transport of combined sewer overflow sediments”, Journal of Water Poll. Control Fed., 57(5), pp. 390~397.
- Loehr R. C. (1974), “Characteristics and comparative magnitude of non-point sources”, Journal of Water Poll. Control Fed., 46(5), pp. 873~885.
- Sartor J. D., Boyd G. B. and Agardy F. J. (1974), “Water pollution aspects of street surface contaminants”, Journal of Water Poll. Control Fed., 46(3), pp. 458~467.
- Wanielista M. P. (1978), “Stormwater management quantity and quality”, Ann Arbor Science, Mich, pp. 187~220.
- 日本下水道協會 (1982), 合流式下水管越流水對策と 暫定指針, pp. 1~95.
- 和田安彦 (1990), ノンポイント汚染源のモデル解析, 枝報堂出版, pp. 11~73.