

연구논문

유량-부하량 관계식을 이용한 용담호 유입하천의 영양염류 유입량 변동특성

김 태 근

청주대학교 환경공학전공

(2006년 1월 18일 접수, 2006년 4월 13일 승인)

Variational Characteristics of Nutrient Loading in Inflow Streams of the Yongdam Reservoir Using Flow-Loading Equation

Kim, Tae Geun

Department of Environmental Engineering, Cheongju University

(Manuscript received 18 January 2006; accepted 13 April 2006)

Abstract

The measurements of nutrient and runoff in 4 streams have been performed before and after the rainfall in order to estimate nutrient loads in the Yongdam reservoir. The equations for the relationship between the flow and the loads in each stream could be estimated by the regression analysis. R^2 of TN showed the range from 0.95 to 0.99 and the range of R^2 for TP was 0.90~0.95 based on the results of the regression analyses. In 2002, total loadings from the upstream to the Yongdam reservoir were TN 1,175 ton/year, TP 69 ton/year. There were 64.9% of TN and 72.3% of TP during 4 months as the flood season. Due to the rainfall, the load of TP was higher than one of TN in Yongdam reservoir.

Key words : Flow-Loading Equation, Nutrient, Yongdam Reservoir

1. 서론

전주권의 안정적인 생활용수 공급과 홍수조절 및 에너지 공급을 목적으로 금강상류에 건설된 용담댐은 2001년도 상반기부터 담수가 시작되었으나 담수 초기부터 호소수의 수질이 악화되어 부영양화 현상이 발생하였다. 호소의 부영양화는 일반적으로 영양

염류의 유입량 증가에 의해 호소내 식물의 생산력 또는 현존량이 증가하는 현상을 일컫는 것으로서 (Welch, E.B. and T. Lindell, 1992), 호소의 과학적인 수질관리를 위해서는 우선적으로 부영양화 원인 물질인 영양염류의 배출원과 유입량을 정확히 파악하여야 한다.

영양염류의 배출원은 점오염원과 비점오염원으로

분류할 수 있다. 용담호와 같이 유역의 대부분이 산지나 농경지로 조성되어 있고 유역내에 대형 점오염원이 없지만 담수 초기부터 부영양화 현상이 발생하는 이유는 강우시 비점오염원으로부터 영양물질이 다량 공급된 것으로 판단되며, 비점오염원에 의한 호소의 부영양화는 우리나라 대부분의 인공호가 공통적으로 안고 있는 가장 큰 문제이기도 하다(충북지역환경기술개발센터, 2002). 비점오염원을 관리하기 위해서는 무엇보다도 비점오염물질의 유출해석이 선행되어야 하지만 비점오염물질은 대부분 강우시 유출되기 때문에 일간, 계절간 배출량 변화가 크고, 기후, 지형, 토지이용형태 및 토양 등 지역적인 특성과 유역의 형상에 따라 변화하게 된다(전형섭 등, 1996). 따라서 오염물질 배출량의 정량화를 위해서는 강우지속시간 동안의 정확한 유량과 수질에 대한 실측이 필요하나 실측이 어렵고 많은 경비와 인력이 필요하기 때문에 비효율적이므로 수회의 실측자료로부터 유량-부하량 관계식을 만들어 유량에 따른 부하량의 변화를 추정하거나 또는 비점오염모델을 이용하여 비점오염물질의 유출해석이 이용하고 있다(Young, R.A. et al, 1989). 비점오염 부하량 예측 모형에는 단순히 유역내 토지이용 면적에 따라 비점오염원의 부하량을 산정할 수 있는 단순부하함수와 수문인자 등의 영향인자를 포함하여 회귀식으로 표현할 수 있는 데스크탑 모형으로 나눌 수 있으며(Novotny, V. V., and G. Chesters, 1981), 예측 결과의 정확도 및 모형의 활용성은 데스크탑 모형이 나은 것으로 알려져 있다.

유량과 부하량의 관계식을 개발한 선행연구를 보면 Dolan et al.(1981)은 미국의 Grand 강에서 유량과 인 농도를 측정하여 유량과 인에 대한 관계식을 개발하여 지류 및 본류에서 인에 대한 부하량 산정에 활용하였으며, 유량의 규모를 구분하여 규모별 관계식을 개발하면 정확도가 향상된다고 보고하였다. 이혜숙·박상영(2005)은 용담호 유역의 지류에서 강우시 유량과 수질을 측정하여 SS, COD, TN, TP에 대한 유량기중평균농도를 산정한 결과 유사한 토지피복 특성을 가지는 유역일지라도 강우사상에 따라 유출부하량의 차이가 발생한다고 하였다. 김성수 등(2002)은 경안천 유역에

서 유량기중평균농도를 산정하여 오염물질별 원단위를 산정하였고, 박연희·박석순(2004)은 유역모형인 SWMM(Storm Water Management Model)을 남한강 수계의 지류에 적용하여 모델 결과로부터 토지이용형태와 강우량에 따른 단위면적당 부하량 회귀식을 유도하였다. 또한 한재석 등(2000)은 섬진강 상류 수계에서 유량과 수질자료로부터 선형회귀식을 개발하여 비점오염원의 부하량을 산정한 사례가 있다.

본 연구에서는 용담호 유역내의 상류 하천에 대하여 강우개시 전·후에 측정된 유량과 수질자료로부터 영양염류에 대한 유량-부하량 관계식을 유도하고, 용담호에 유입되는 총질소와 총인의 부하량을 산정하여 향후 용담호의 과학적인 수질관리에 활용하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상 지역

용담호 유역은 전라북도 진안군, 장수군 및 무주군 등 3개 군 14개 읍·면이 포함되어 있고, 주요 수계는 금강본류, 구량천, 진안천, 정자천, 주자천 등 5개 하천이 유입되고 있다. 용담호의 전체 유역면적은 930 km²로서 이 중 임야가 723 km²로 가장 높은 점유율을 보이고, 다음으로 논과 밭이 각각 75 km²와 57 km²를 차지하고 있어 임야와 농경지가 유역 전체의 92%를 차지하는 전형적인 농촌·산간지역이다.

환경부의 수질측정망 운영자료에 의하면 용담댐1 지점의 경우 2002년부터 2005년까지 연평균 수질변

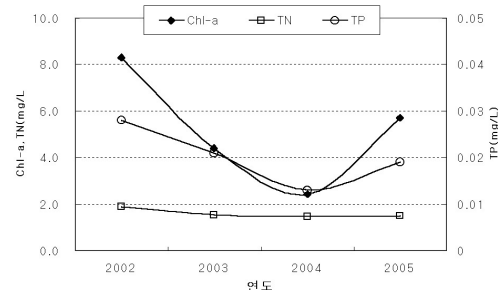


그림 1. 용담댐1 지점의 연평균 수질변화

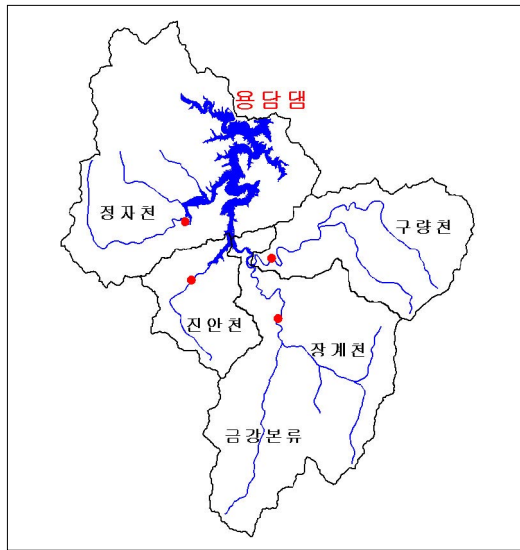


그림 2. 유량 및 수질 조사지점

화는 그림1과 같이 담수가 시작된 2002년에 가장 높은 수질농도를 보이다가 2004년까지 점차 낮아진 후 2005년도에 소폭 증가하는 추세를 보였다. 한편 Carlson(1977)은 투명도, 총인 및 클로로필 a를 기준으로 호수의 영양상태를 구분하였는데 부영양상태는 투명도 2m 이하, 총인 0.02 mg/L 이상, 클로로필 a 7.0 mg/m³ 이상으로 제시하였으며, Carlson이 제

시한 항목 중 총인과 클로로필 a를 기준으로 보면 용담호는 담수 초기인 2002년에 부영양상태, 2003년 이후는 대부분 중영양상태로 나타났다.

2. 유량 및 수질 자료

본 연구에서는 용담호 유역의 유량-부하량 관계식을 유도하기 위하여 수자원공사의 유량자료와 실측된 수질자료를 이용하였다. 유량 및 수질에 대한 조사시기는 2002년 5월부터 2002년 9월까지이며, 조사지점은 그림 2와 같이 용담호로 유입되는 금강본류 1개 지점과 구량천, 진안천 및 정자천 등 3개 지점의 하구부이다. 이 하천들은 용담호 유역의 대표 하천들로서 유역내에서 발생하는 오염물질의 대부분이 이 하천들을 통하여 용담호로 유입되며, 각 하천의 하구부에는 수위관측소가 위치하고 있어 유량산정이 가능하다는 점을 고려하여 수질조사 지점으로 선정하였다.

수질 조사항목은 호수의 부영양화와 관련된 TN과 TP로 하였으며, 유량은 수자원공사에서 운영하는 수위관측소의 수위자료와 각 관측소의 수위-유량곡선(rating curve)으로부터 측정일자의 시간별 유량을 산정하였다. 조사지점에 위치한 수위관측소 현황은

표 1. 수위관측소 현황

관측소 명	위 치	유역면적(km ²)	비 고
천 천	용담호 유입 전 금강본류	290.9	TM
동 향	구량천 하류	164.4	TM
상도치교	진안천 하류	89.0	자 기
석정교	정자천 하류	144.1	자 기

표 2. 조사기간의 지점별 강우사상

조사기간	강우사상	금강본류	구량천	진안천	정자천
6/10~6/11	강우량(mm)	38.8	29.0	30.0	26.0
	선행무강우일수(day)	7	10	6	10
7/19~7/23	강우량(mm)	48.5	36.0	38.0	46.0
	선행무강우일수(day)	3	4	3	4
8/6~8/8	강우량(mm)	329.5	379.0	298.0	245.0
	선행무강우일수(day)	10	1	10	10
8/31~9/3	강우량(mm)	174.0	215.0	189.0	186.0
	선행무강우일수(day)	0	0	0	0

표 1과 같다.

강우시 수질조사는 각 측정지점에서 강우 개시 전부터 수질을 측정하여 비강우시 측정자료로 사용하였고, 강우 시작부터는 1~3시간 간격으로 연속 측정하여 강우시의 자료로 이용하였으며, 관측시간은 강우개시 전부터 강우 종료 후 수위가 강우 전의 수위로 되돌아 올 때까지를 기준으로 하였다. 강우량은 1일 20mm 이상의 강우가 예상되는 일자를 선정하여 총 14일간 조사를 하였으며, 표 2는 수질 조사기간의 각 지점별 강우사상이다. 본 연구에 사용한 강우량 자료는 용담호 유역내에 위치하고 있는 장수, 진안, 안성장 및 대불관측소의 2002년 자료를 이용하였다.

III. 연구결과

1. 유량-수질 조사결과

본 연구에서 조사한 14일 동안의 유량과 수질자료를 날짜의 구분없이 연속해서 시료채취 시간별로 도

시한 결과는 그림 3~그림 6과 같다. 조사지점의 유량과 수질변화를 종합적으로 살펴보면 강우시 토지로부터 유출되는 영양염류의 최대 농도는 유량의 침투피크와 약간의 시차를 두며 발생하는 것으로 나타났다으며, 이는 유역면적, 유하거리, 토지피복, 토지이용형태, 강우강도 및 선행 무강우일수 등에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Decoursey, G. Donna, 1985). 수질항목별 유출특성은 TP의 경우 유량증가와 함께 급격한 증가형태를 보이지만 TN은 상대적으로 유량변화에 민감한 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다.

조사지점중 상도치교 관측소는 상류 7 km 지점에 인구밀집지역인 진안읍이 위치하고 있어 유역 내 불투수층 점유율이 가장 높은 유역으로써 강우시 유출특성이 매우 빠르고 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있었다. 특히 다른 지역에 비해 유달시간이 매우 짧고, 2002년도에는 진안읍에 하수종말처리장이 설치되어 있지 않아 미처리 하수가 지속적으로 유입되고

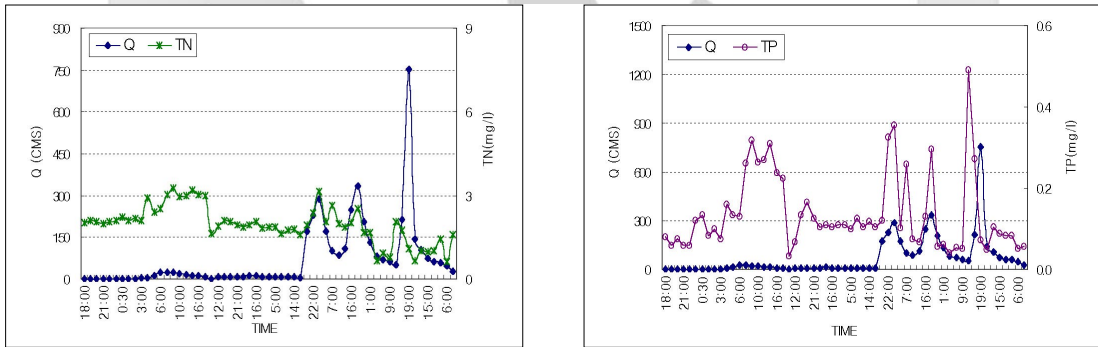


그림 3. 금강본류의 유량-수질 경시변화

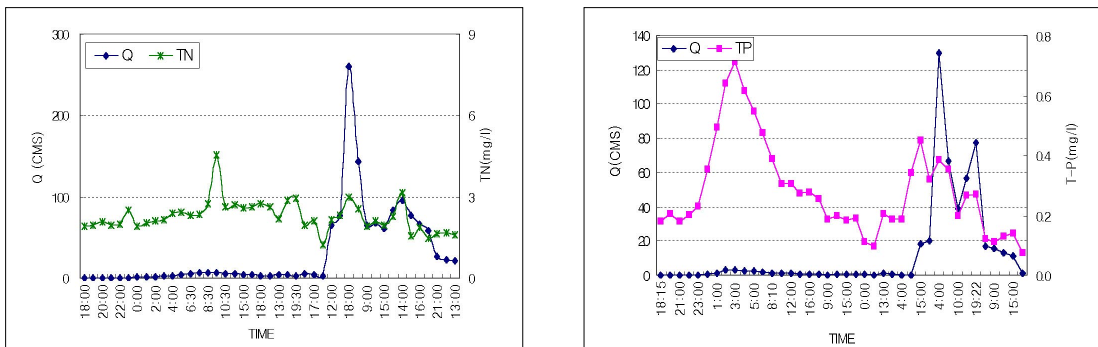


그림 4. 구량천의 유량-수질 경시변화

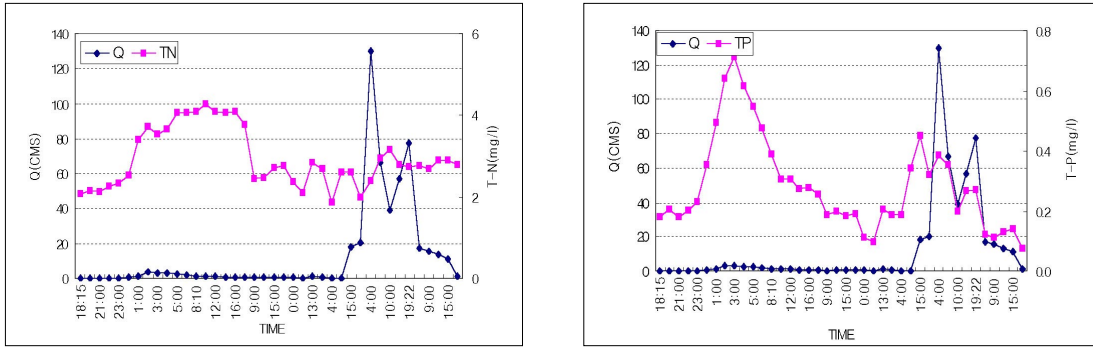


그림 5. 진안천의 유량-수질 경시변화

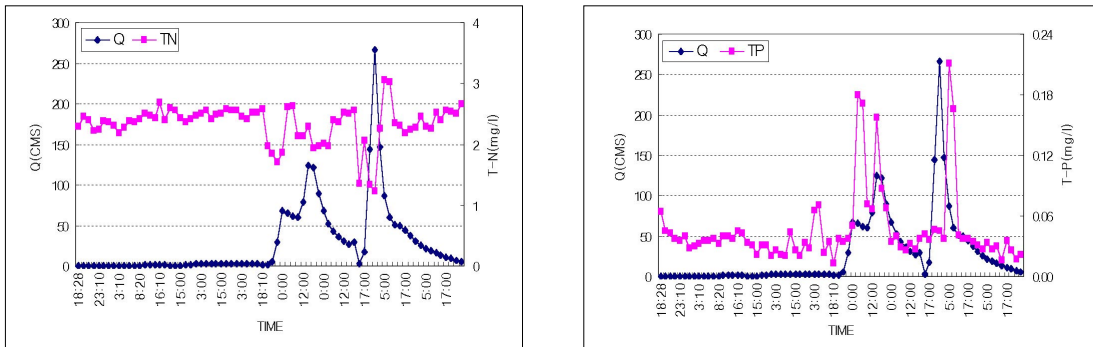


그림 6. 정자천의 유량-수질 경시변화

있었으며, 불투수층이 많아 적은 강우에도 노면과 하수관거의 퇴적물이 유출되어 오염물질의 농도변화가 큰 폭으로 나타났다. 진안천과 대비되는 유역특성을 가진 정자천의 경우 유역 내 산지가 많은 관계로 강우 개시 후 지체시간이 다른 유역에 비하여 상대적으로 길어 강우량이 적을 때에는 유출이 일어나지 않다가 강우량의 증가나 집중호우시 첨두피크가 급격히 나타나는 것으로 조사되었다. 이러한 이유 때문에 1

차 조사 시에 진안천에서 가장 높은 농도를 보인 반면 정자천은 이 시기에 수질의 변화가 거의 없는 것으로 나타나 유역내의 토지이용 형태가 오염물질의 유출에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다.

2. 하천별 유량-부하량 관계식

본 연구는 유역내에서 발생하는 영양염류가 용담호로 유입되는 양을 정량화 하는 것으로서 유량과 수

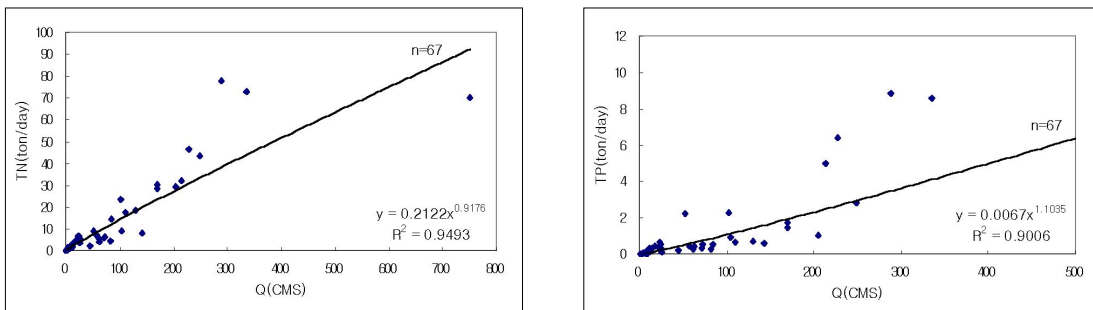


그림 7. 금강분류의 유량-부하량 산포도 및 관계식

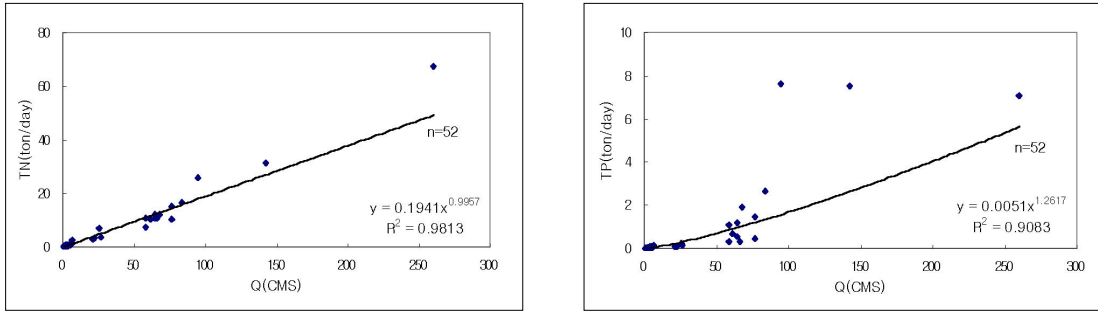


그림 8. 구량천의 유량-부하량 산포도 및 관계식

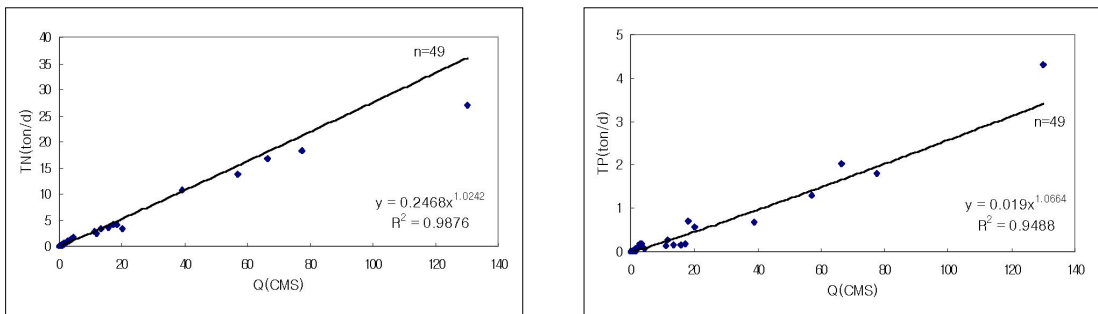


그림 9. 진안천의 유량-부하량 산포도 및 관계식

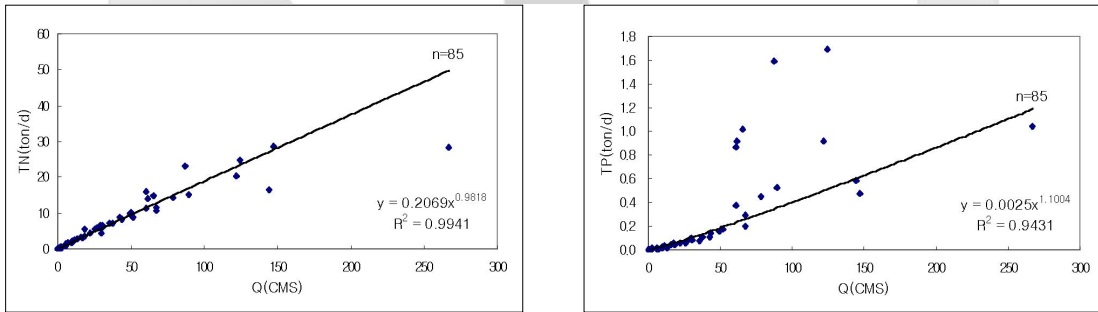


그림 10. 정자천의 유량-부하량 산포도 및 관계식

질의 실측자료를 이용하여 TN, TP에 대하여 유량-부하량 관계식을 유도하였다. 수질항목별 부하량은 관측된 유량과 수질자료를 곱하여 산정하였으며, 각 하천별 관계식은 그림 7~그림 10과 같다.

유량-부하량 관계식은 수질인자와 유량자료를 회귀분석하여 유도하였으며, 회귀식의 유용성을 평가할 수 있는 지표 중의 하나인 상관결정계수(R²)를 보면 TN의 경우 0.95~0.99 그리고 TP는 0.90~0.95의 범위로 두 항목 모두 매우 높게 산정되었다.

3. 하천별 부하량 산정

위에서 유도한 유량-부하량 관계식에 수자원공사에서 제공하는 일별 평균수위와 수위-유량곡선으로부터 산정된 조사지점별 일유량을 대입하여 2002년 1월 1일~12월 31일까지의 부하량을 산정하였다. 두 지점의 항목별 일부부하량 변화는 그림 11 ~그림 14와 같다.

유량-부하량 관계식에 의한 각 하천별 부하량을 보면 금강본류는 TN 482톤, TP 28톤이고, 구량천은 TN 413톤, TP 26톤이며, 진안천은 TN 148톤, TP

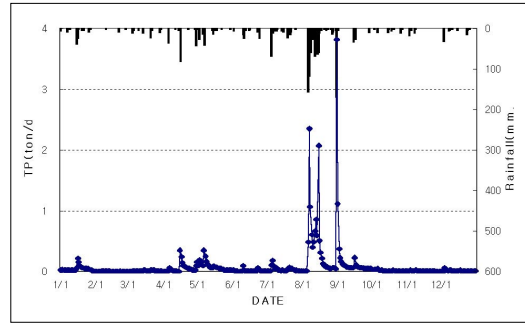
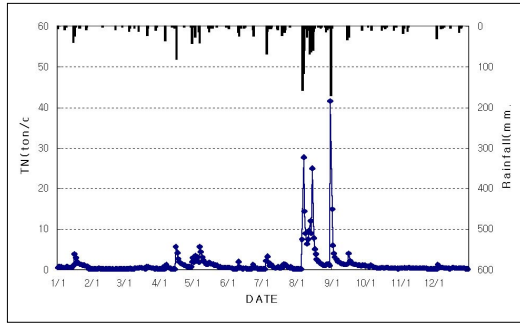


그림 11. 금강본류의 일별 부하량 변화

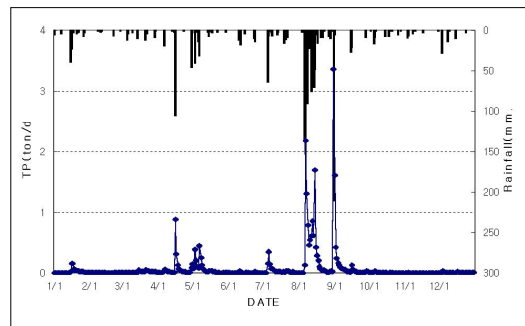
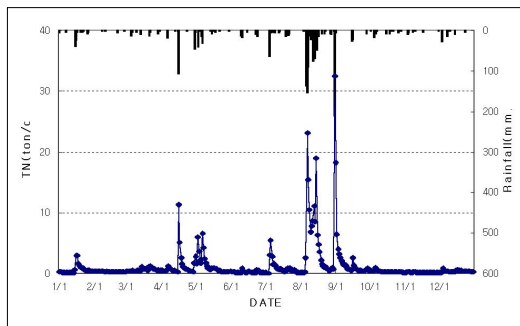


그림 12. 구량천의 일별 부하량 변화

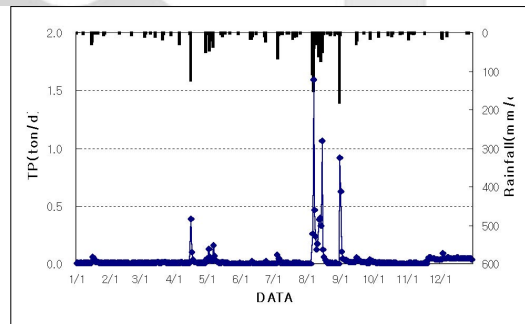
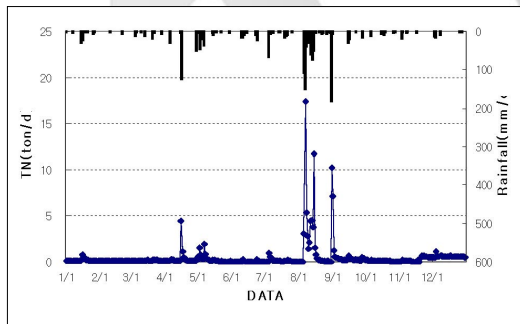


그림 13. 진안천의 일별 부하량 변화

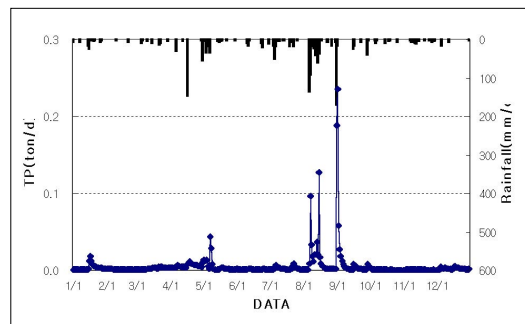
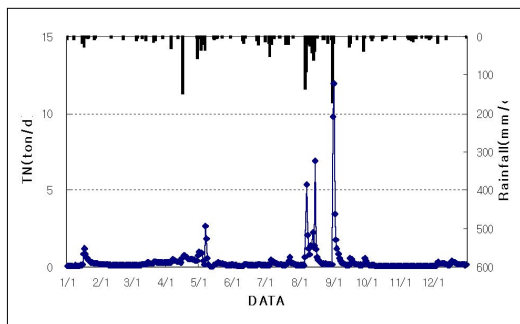


그림 14. 정자천의 일별 부하량 변화

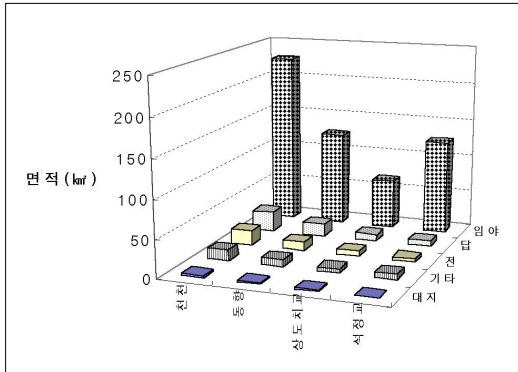


그림 15. 관측소별 토지이용 형태

12톤 그리고 정자천은 TN 131톤, TP 2톤으로서 2002년도 1년간 용담호 상류하천에서 유입된 영양염류의 총부하량은 TN 1,175톤, TP 69톤으로 산정되었다.

4. 토지이용형태와 영양염류 부하량

본 연구에서는 각 하천별 영양염류 부하량과 유역 내 토지이용 형태와의 관계를 살펴보았다. 유량과 수질관측지점의 유역면적 크기는 표 1에서와 같이 천천, 동향, 석정교, 상도치교관측소 순이었으며, 각 관측소 유역내 토지이용 형태는 그림 15와 같다. 그림에서 보듯이 연구지역의 약 78%가 임야지역이고 농경지는 14%이며, 대지는 1.1%에 불과한 전형적인 농촌·산간지역의 토지이용 특성을 가지고 있다.

영양염류의 연간 부하량과 유역면적 크기와의 관계는 그림 16과 같다. 일반적으로 비점오염물질의 부하량은 하천의 유역면적과 비례하지만 정자천 수계

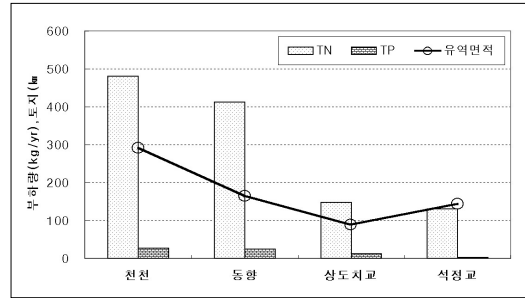


그림 16. 영양염류 부하량과 관측소 유역면적

에 위치한 석정교 관측소의 유역면적이 진안천 수계의 상도치교 관측소보다 약 1.6배 넓음에도 불구하고 상도치교 지점이 석정교 지점보다 TN, TP의 부하량이 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 석정교 관측소 유역 내의 임야 점유율이 87%로서 4개 하천 중 가장 크기 때문에 비점오염물질의 유출이 제어되었고, 반면에 상도치교 관측소 유역 내에는 진안읍이 위치하고 있어 타 수계보다 높은 불투수층 점유율과 함께 강우시 유출된 하수관거의 퇴적물이 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 결과는 비점오염원으로 부터의 오염물질 유출은 유역면적의 크기뿐 아니라 유역 내 토지이용형태가 중요한 변수로 작용한다는 것을 시사하고 있다.

5. 강수조건별 영양염류 부하 점유율

비점오염원으로부터 오염물질의 유출량과 유역 내 강수량과의 관계를 파악하기 위하여 본 연구에서는 2002년도의 월별 강수량을 기준으로 하위 4개월을 갈수기, 상위 4개월을 홍수기 그리고 나머지 4개

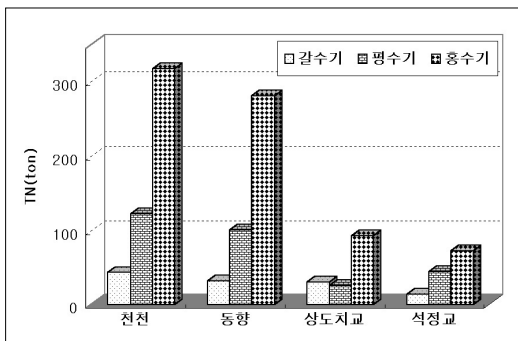


그림 17. 강수조건별 TN 부하량

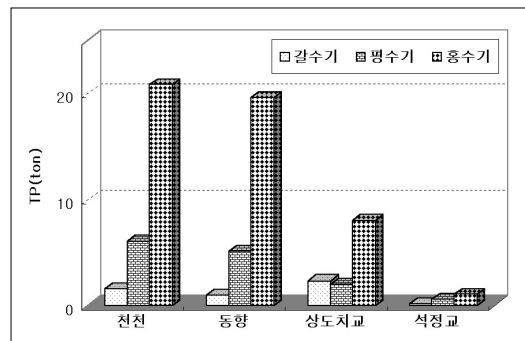


그림 18. 강수조건별 TP 부하량

월을 평수기로 구분하였다. 본 연구를 진행한 2002년도의 유역 내 연간 총강수량은 1,657 mm로서 갈수기 4개월의 월평균 강수량은 35.2 mm, 평수기 73.9 mm 그리고 홍수기는 305.3 mm로 산정되었다. 강수조건별 오염부하량은 그림 11~그림 14에 도시된 일별 영양염류 부하량으로부터 산정하였으며, 그 결과를 그림 17과 그림 18에 나타내었다.

그림에 의하면 상류하천에서 용담호로 유입되는 영양염류의 연간 총 부하량에 대하여 갈수기의 부하량은 TN 10.2%, TP 7.4%였고, 평수기에는 TN 24.9%, TP 20.4%였으며, 홍수기에는 TN 64.9%, TP 72.3%로 산정되어 강수량과 비점오염부하량은 비례관계에 있음을 알 수 있었다. 본 연구지역과 유사한 유역특성을 가지고 있는 대청댐 유역내의 지천에서 강우시와 비강우시에 유량과 수질을 측정하여 비점오염부하율을 산정한 연구결과(이대근 등, 2004)를 보면 7개 지천 중 6개 지천에서 강우시에 TN은 69% 이상, TP는 84% 이상으로 조사되어 본 연구의 결과보다 높은 수치를 보였으며, 두 지역 모두 TN보다 TP가 강우에 의한 유출율이 더 큰 것으로 나타났다. 용담댐과 대청댐 유역에서 비점오염원에 의한 부하율이 높게 산정된 이유는 이들 유역에는 대도시나 산업단지와 같이 대규모의 점오염원이 없기 때문에 비점오염원의 점유율이 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과로 볼 때 금강 상류에 위치한 용담호와 대청호의 효율적인 수질관리와 더불어 “제2차 수질오염총량관리”부터 대청호 상류지역에 대상물질로 추가될 TP의 목표수질을 달성하기 위해서는 비점오염원에 대한 관리방안이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

강수조건에 따른 지점별 오염물질 유출특성을 살펴보면 천천, 동향, 석정교 지점은 갈수기, 평수기, 홍수기 순으로 부하량이 증가하여 일반적인 경향과 일치하였으나 상도치고 지점의 경우 TN, TP 부하량 모두 갈수기가 저수기보다 더 큰 것으로 나타나 다른 지점과 상이한 결과를 보였다. 이러한 이유는 상도치고 지점으로부터 7 km 상류에 위치한 진안읍의 영향으로 비강우시에도 미처리 하수가 유입되어 영양

염류 농도가 TN 2~4 mg/L, TP 0.05~0.1 mg/L 범위로 매우 높았고, 불투수층 지역이 많아 적은 강수량에도 고농도의 오염물질을 함유한 초기우수가 유출되었기 때문으로 판단된다.

IV. 결 론

용담호 유역내 주요 하천에서 측정된 유량과 수질자료로부터 TN과 TP에 대한 유량-부하량 관계식을 유도하고, 용담호로 유입되는 영양염류 부하량을 산정하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용담호 유역내 4개 하천에서 강우 전후에 측정된 유량과 수질자료를 회귀분석하여 유량-부하량 관계식을 각 하천별로 유도하였으며, 각 회귀식의 상관결정계수는 TN의 경우 0.95~0.99, TP는 0.90~0.95의 범위로 두 항목 모두 매우 높게 산정되었다.
2. 2002년도에 용담호 상류하천에서 유입된 영양염류의 연간 총부하량은 TN 1,175톤, TP 69톤이고, 강수조건별 유입량은 홍수기, 평수기, 갈수기 순이었으나 불투수층이 많은 유역에서는 평수기보다 갈수기의 부하량이 크게 산정되어 비점오염물질은 유역내 토지이용형태와 밀접한 관계가 있는 것으로 평가되었다.
3. 비점오염원으로부터 유출되는 영양물질중 강우에 의한 영향은 TP가 TN보다 더 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진, 2002, 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사, 대한환경공학회지, 24(11), 2019-2027.
- 박연희, 박석순, 2004, 강우강도에 따른 토지이용별 비점오염원 부하량 산정 함수 연구, 대한환경공학회지, 26(10), 1070-1078.
- 이대근, 김장현, 전양근, 2004, 대청댐 유역 비점오염 저감방안 수립을 위한 연구, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동춘계학술발표

- 회 논문집, 423-426.
- 이혜숙, 박상영, 2005, 용담호 유역 산림지역으로부터 배출되는 오염부하량 특성 분석, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 2005공동추계학술발표회 논문집, 506-509.
- 전형섭, 김태근, 조기성, 김환기, 1996, GIS를 이용한 비점오염원의 원인지역 추출에 관한 연구, 대한환경공학회지, 18(4), 451-463.
- 충북지역환경기술개발센터, 2002, 대청호 유역의 비점오염물질 거동 규명 및 수변구역의 오염물질 제거능 평가, 3-6.
- 한재석, 김주훈, 김만식, 2000, 유역 비점오염부하량 산정에 관한 연구, 환경관리학회지, 6(1), 147-157.
- Carlson R. E., 1977, A Trophic State Index for Lakes, *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.
- Decoursey, G. Donna, 1985, Mathematical models for nonpoint water pollution control. *Journal of Soil and Water Conservation*. september-october, 408-413.
- Dolan, D. M., A. K. Yui, and R. D. Geist, 1981, Evaluation of River Load Estimation Methods for Total Phosphorus, *J. Great Lakes Res.* 7(3), 207-214.
- Novotny, V., and G. Chesters, 1981, *Handbook of Nonpoint Pollution*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 555.
- Welch, E. B. and T. Lindell, 1992, *Ecological effects of wastewater*, 2nd. Chapman & Hall, London.
- Young, R. A., Onstad, C. A., Basch, D. D., and Anderson, 1989, W. P. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds, *J. Soil and Water Conservation*, March-April, 168-173.