

삽교호의 오염물질 유달률 산정 조사 및 평가연구

Estimation and Investigation of the Pollutant Delivery Rate of Sapkyo Reservoir

이 영 신¹⁾ · 신 상 희[†] · 이 태 호²⁾

Youngshin Lee · Sanghee Shin · Taeho Lee

Received: December 22nd, 2013; Revised: January 16th, 2014; Accepted: February 10th, 2014

ABSTRACT : The purpose of this study investigates the delivery characteristics according to the load of pollutants by calculating the delivery rate of targeted areas on pollutants in Sapkyo reservoir. The main rivers of Sapkyo reservoir are Namwoncheon, Dogocheon, Sapkyocheon, Muhancheon and Gokgyocheon. The delivery rate and their characteristics of five major rivers during rainfall season are investigated. As the result, biochemical oxygen demand (BOD), total nitrogen (T-N) and total phosphorous (T-P) of total delivery rate are calculated by 0.40, 0.34 and 0.08, respectively. The delivery rate of T-P compares to other water quality is investigated relatively low. Looked at the overall characteristics of the watershed, the delivery rate of T-N and T-P is little change in the rate of the year, too. The delivery rate of T-N is calculated from 0.2 to 0.3 in the dry season, and from 0.31 to 0.39 in a flood, respectively. The delivery rate of T-P is calculated to more than 0.3 in the dry season, and 0.11 in a flood. It is similar values which the average annual delivery rate of T-P is 0.08. Therefore, the measured delivery rate of Sapkyo reservoir can be applicable such as a delivery rate of similar features of the terrain and land use.

Keywords : Delivery rate, Nonpoint source pollutant, Pollution load, Reservoir management, Nutrient transport

요 지 : 본 연구의 목적은 삽교호 지역을 대상으로 오염물질에 따른 구역별 유달률을 산정하고 오염물질 부하량에 따른 유달특성을 조사하고자 한다. 삽교호 주변의 주요하천은 남원천, 도고천, 삽교천, 무한천, 곡교천이고 5개 주요하천의 강우 시 유달률과 그 특성을 조사되었다. 그 결과 삽교호 조사 유역 전체의 유달률 BOD는 0.40, 총질소(T-N)는 0.34, 총인(T-P)은 0.08이었고 T-P의 유달률은 다른 수질항목에 비교해서 상대적으로 낮게 조사되었다. 또한 유역 전반의 특성을 살펴보면 T-N과 T-P의 유달률은 연중 변화가 거의 없었다. T-N의 유달률은 갈수기 때에 0.2~0.3이었고 홍수기 때에는 0.31~0.39였다. T-P의 유달률은 갈수기에 0.3 이상, 홍수기 때에 0.11의 값을 나타내는데 이는 연평균 유달률인 0.08과 비슷한 값이다. 본 조사에서 측정한 각각의 유달률은 토지이용과 지형 특성이 유사한 지역의 유달률처럼 적용이 가능할 것이다.

주요어 : 유달률, 비점원오염원, 오염부하량, 저수지관리, 영양분 이동

1. 서 론

국내의 많은 지역에 국토의 확장과 농지의 확보를 위해 간척사업을 진행하여 간척지 내 용수공급을 위한 하구 담수호를 함께 조성하였다. 그러나 이러한 담수호 개발은 흐르는 하천의 흐름을 막아 정체된 수역을 형성함으로써 유입 하천과 연안의 물질순환시스템 변형을 가져와 바다에 열려있는 하구와 달리 상류 유역으로부터 유입된 유기물이 무기물로 분해되고 질소와 인 계열의 무기 영양염류가 누적되는 부영양화 현상이 나타나 수질을 악화시키는 요인으로 작용하고 있다(Khaleel et al., 1980; Gunes, 2008; Rao et al., 2009; Rast & Lee, 1983). 또한 우리나라의 강우특성은 연중

강우량의 약 70%가 하절기에 집중되기 때문에 농·산간지역의 비점원 오염원으로부터 유입되는 오염물질량 역시 강우기에 대량 유출되고 있다. 따라서 유입수계의 수질악화는 유역에서 호소에 유입되는 오염물질에 의해 발생하며, 그중에서도 우천 시의 유입이 상당한 영향을 미치는 것으로 지적되고 이에 대한 대책이 요구되고 있다(NIER, 2012; Lee & Shin, 2013).

농·산간지역에 위치한 호소의 경우 강우 시 유출되는 수량을 저수하여 관개 시에 사용하기 때문에 저류 시간이 긴 것이 특징이다. 이와 함께 강우 유출수와 함께 호소로 유입된 오염물질 역시 저수지 내에 축적되며, 유역에서 과도한 영양물질이 유입되게 되면 저수지의 부영양화 등 수질악화

1) Department of Environmental Engineering, Hanseo University

† Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction and Technology (Corresponding Author : scott@kict.re.kr)

2) Rural Research Institute

를 초래하게 된다. 그러나 호소로 유입되는 오염물질의 많은 부분은 강우 시 초기 유출수와 함께 일시에 유입되는 양이 대부분을 차지하기 때문에 호소의 수질관리를 위하여 강우 중의 오염물질을 효과적으로 배제 또는 처리할 수 있는 관리기법의 연구가 절실하다(Droc & Zagorc Koncan, 2002; Fulcher, 1994; Mostaghimi et al., 1997; Todd et al., 1989).

삼교호는 농업용수 공급과 어업자원으로써 매우 중요한 수자원이다. 그러나 담수 이후 부영양화가 지속되어 왔으며, 향후에도 적절한 수질관리 대책을 수립하여 이행하지 않을 경우 수자원의 효율적인 이용이 어려운 상태이다. 강우 시에는 유역으로부터 발생하는 생활, 농업, 축산 오염원 등이 처리되지 않은 상태로 유입되고 있어 유입하천과 호수의 수질이 더욱 악화될 가능성이 있다. 그리고 점오염부하량과 강우 시 오염부하량에 대한 체계적인 조사가 이루어지지 않아 수질관리 대책을 수립하는데도 어려움이 있었다.

따라서 이러한 초기강우 유출수의 처리 또는 배제를 통한 효율적인 호소 수질관리기법의 도입을 위해서는 오염물질 부하량에 대한 기본조사가 선행될 필요가 있다. 용수 이용목적에 적합한 삼교호의 수질 보전과 생태계 서식환경 개선을 위해서는 오염물질의 부하특성을 면밀히 조사하여야 하며, 조사결과를 바탕으로 유역과 호소의 종합적인 관리대책이 마련되어야 한다.

2. 연구방법

2.1 연구지역

삼교호 유역의 서측에 위치한 삼교천은 홍성군 장곡면에서 발원하여 주요 지류인 홍성천, 신경천, 덕산천, 대천천 등이 우안측에서 유입하고 대천천 합류 후부터는 좌안측에서

서 무한천, 곡교천 등이 차례로 합류하여 유하하면서 삼교호(삼교방조제)를 관류하고 최종적으로 서해로 유출된다 (Fig. 1 참조).

2.2 소유역별 환경특성을 고려한 유달부하량 및 유달률 산정방법

하천의 수질조사를 위해서는 수질조사 지점의 하천구간을 횡방향으로 3등분하여 각 구간의 중간부 수심 1/3지점에서 시료를 수집한 후 혼합시료를 만들어 냉장 보관하여 분석실로 이동하였다. 하천의 주요 수질분석항목은 BOD, COD_{Mn}, SS, N-계열, P-계열이며 분석방법은 수질오염공정시험법을 따랐다(MOE, 2004).

2.2.1 오염원 특성

공공수역으로 유입하는 오염물질은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분된다. 점오염원은 발생지점과 흐름 경로가 비교적 명확하고, 환경기초시설들의 확충과 법적 규제가 마련되어 오염부하량 산정과 오염원 관리가 용이하다. 비점오염원의 경우는 강우 현상, 토양 및 지형, 토지 이용도 등 다양한 수문학적 특성에 따라 오염물질 발생량과 이동 경로가 달라지기 때문에 오염부하량 산정에 큰 어려움이 있다. 특히 강우 시 지표면에 퇴적된 각종 오염물질이 우수 유출수와 함께 단시간에 하천으로 유입됨에 따라 수질오염에 미치는 영향을 정량적으로 파악하는 데에는 한계가 있다.

2.2.2 점오염부하량 산정

점오염부하량은 비강우 시 하천 유량과 수질농도의 곱으로 산정하였다. 과업기간이 6월부터 11월까지였기 때문에 갈수기 유량과 수질자료 확보에 어려움이 있어 이 기간 동안의 오염부하량 산정은 비강우 시 3회 측정된 유량 중 최

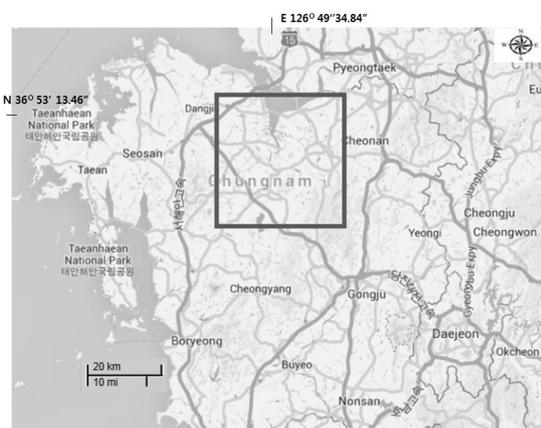


Fig. 1. Sampling points at Sapkyo Reservoir

소값을 대표 유량으로 선택하였다. Eq. (1), Eq. (2)와 같이 본 연구에서 적용한 점오염부하량 산정 관계식을 보여준다 (Lee & Shin, 2013).

$$\text{부하율(Mass flow rate)} : L(\text{kg/hr}) = Q \cdot C \quad (1)$$

$$\text{점오염부하량(PL)} : PL = (C \cdot Q) \times \Delta t \quad (2)$$

여기에서 L은 부하율, Q는 유량, C는 농도, PL은 점오염 부하량, Δt 는 시간이다.

2.2.3 비점오염원 단위유출량 산정

비점오염원 원단위는 적용이 쉬워 유역이나 배수구역의 오염도 평가에 널리 사용되고 있으나, 시간과 비용 측면의 한계로 정확한 산정이 어렵다. 비점오염원은 배출양상이 다양하므로 오염원에 대한 정확한 산정을 위해서는 장기간(최소한 5년 이상) 동안 연속 측정된 실측자료가 필요하다. 그러나 과업기간과 재원이 한정되어 있으므로 각 조사지점별 강우 시 측정된 한정된 실측자료를 사용하여 단위유출량을 산정하였다(Lee & Shin, 2013).

$$\text{단위유출부하량(kg/hr/ha)} = \frac{\text{강우 시 총 오염부하량}}{\text{배수구역 면적}} \quad (3)$$

비점오염원 단위유출 부하량은 단위토지면적에서 배출되는 오염물질량을 의미하며, 현재 사용되고 있는 원단위 산정 방법으로는 경험식에 의한 계산법과 유역에서 유량과 오염 부하량을 실측해서 산정하는 실측법이 있다.

오염물질 누출이 있을 때 비점오염원의 평균농도를 잘 나타내는 EMC에 강우 시간의 누적 유량을 곱한 것으로써 총 누가오염부하량(kg)을 산정하였다. EMC는 특정 강우사상 동안 발생한 총 오염물질량(kg)을 총 유출량(m^3)으로 나눈 유량기중평균농도값이며, Eq. (4)를 이용하여 산정한다.

$$EMC = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot Q_i \cdot t_i)}{\sum_{i=1}^n (Q_i \cdot t_i)} \quad (4)$$

여기서 C_i 와 Q_i 는 각각 실측농도(mg/L)와 유량(m^3/sec)이며, t_i 는 유출시간(sec)이다(Lee & Shin, 2013).

2.2.4 연간 오염부하량 산정

본 연구에서는 평상 시와 강우 시 유량, 수질 동시 조사

가 각각 3~4회 정도이므로 연간 오염물질 유달부하량을 산정하기 위해서는 단위유출부하를 환산하는 방법이 필요하다. 즉 일년 동안 연속해서 비점오염원을 실측 조사할 수 없기 때문에 실측 기간에 대해 계산한 값(kg/hr)을 연간으로 환산(tonf/yr)하여 사용하기 위해 유효우량비법을 적용하여 산정하였으며, 독립변수는 Eq. (5)와 같다.

$$L = (\text{tonf/yr}) = I_a \times \frac{P_a}{p_a} \quad (5)$$

여기서 I_a 는 측정기간 동안의 비점오염 총량(tonf), A는 배수구역면적(ha), P_a 는 10 mm 이상의 연간 총 강우량(mm/yr), p_a 는 실측기간 총 강우량(mm)이다(Lee & Shin, 2013).

유효우량비법은 삼교호 유역과 같이 유량측정망이 없는 미계측 유역에서 간편하게 적용할 수 있다는 장점은 있으나, 선행강우와 토양수분상태에 따라 유출율이 달라지는 것을 감안할 수 없어 유출량비법에 비해 정확도가 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 월별 유출율을 유효우량비법에 적용하여 월별 강우 시 비점오염부하량의 유출량을 보정하였다.

2.2.5 유달률 산정

유달률은 유역 내에서 발생한 오염부하가 인위적인 시설을 거쳐 저감 및 삭감된 후 발생하는 부하량을 원단위로 산정한 배출부하량과 이 배출부하가 여러 하천을 흘러 유달된 후 유역 출구점에서 측정된 유달부하량의 비로써 표현된다.

$$K = \frac{P_M}{P_T} \quad (6)$$

- K : 유달률(오염부하 유달계수, 상수)
- P_M : 수질측정지점에서의 실측 오염부하량(실측 유량 × 실측 농도)
- P_T : 유역에서 발생한 총 배출부하량(계산된 오염물질의 양)

3. 삼교호 오염부하특성 및 유달률 산정

3.1 강우 시 오염원 유출특성

3.1.1 강우사상에 따른 유출유량 특성

조사기간 동안 기상청의 방재 기상정보시스템과 레이더 영상 예보자료를 수시로 점검하며, 삼교호 유역의 강우 시기와 유량측정 여부를 판단하였다. Fig. 2에 4차 강우 시의 2008년 8월 18일 레이더 영상을 나타내었다. 18일 오후 4시

경의 레이더 영상을 나타낸 Fig. 2를 보면 지도상에 걸쳐져 있는 에코의 형상이 보이며, 최대 강우가 내린 18일 오전 7~8시의 레이더 영상을 보면 본 조사지역에 에코가 넓게 퍼져 있는 것을 볼 수 있다.

현장 실험기간 동안 삼교호 유역은 유역면적이 넓어 조사지점별로 시공간적인 강우 패턴이 약간씩 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 유량측정 성과분석을 위한 강우 기록은 충남재난안전대책본부와 아산시, 당진군의 각 면사무소에 위치한 AWS 자료를 사용하였기 때문에 유량자료와 강우 시점에 약간의 편차가 발생하였다.

강우사상별 강우량을 비교해 볼 경우 1차 강우가 남원천은 19 mm, 도고천은 11 mm, 2차 강우는 남원천이 54 mm, 도고천이 51 mm, 3차 강우는 남원천이 136 mm, 도고천이 21 mm, 4차 강우 시 남원천이 35 mm, 도고천이 37 mm로 3차 강우 때 가장 많은 비가 내렸고 1차 강우 때는 비교적 적은 강우량을 기록하였다.

1차 강우 시 조사는 2008년 6월 28일~6월 29일 동안 실시하였으며, 남원천의 경우 초기 강우는 28일 오후 7시를

기점으로 시간당 3 mm가 내렸다. 29일 오전 4시쯤 시간당 4.0 mm의 최고 강우량을 보이다가 오전 7시 정도 까지 강우가 지속되었다. 유량측정은 강우사상의 변화에 따라 1~2시간 간격으로 19~20회에 걸쳐 조사하였다. 도고천은 28일 오전 9시부터 다음날 9시까지 지속적으로 0~2 mm 정도로 간헐적으로 강우가 지속되는 특성을 보였다.

2차 강우 시 조사는 2008년 7월 16일~7월 17일 까지 2일에 걸쳐 수행되었으며, 7월 16일 오후 5시에 시간당 8 mm로 강우가 시작되다가 6시부터 9시까지 최고 27 mm의 폭우가 내렸다가 강우가 그쳤다. 도고천의 경우도 16일 오후 5시에 4 mm를 시작으로 9시에 최고 25 mm를 내리고 10시에 비가 그쳤다. 1차 때와 마찬가지로 측정은 1~2시간 간격으로 하였으며, 총 17~24회 유량측정과 수질 샘플링이 실시되었다.

3차 강우 시 조사는 2008년 7월 23일~7월 24일 이틀 동안 수행되었다. 남원천의 경우 23일 오후 5시부터 약한 비가 시작되었으며, 오후 7시에 시간당 10 mm의 강우가 내렸다가 24일 새벽 6시까지 0~2 mm의 강우로 간헐적으로 내

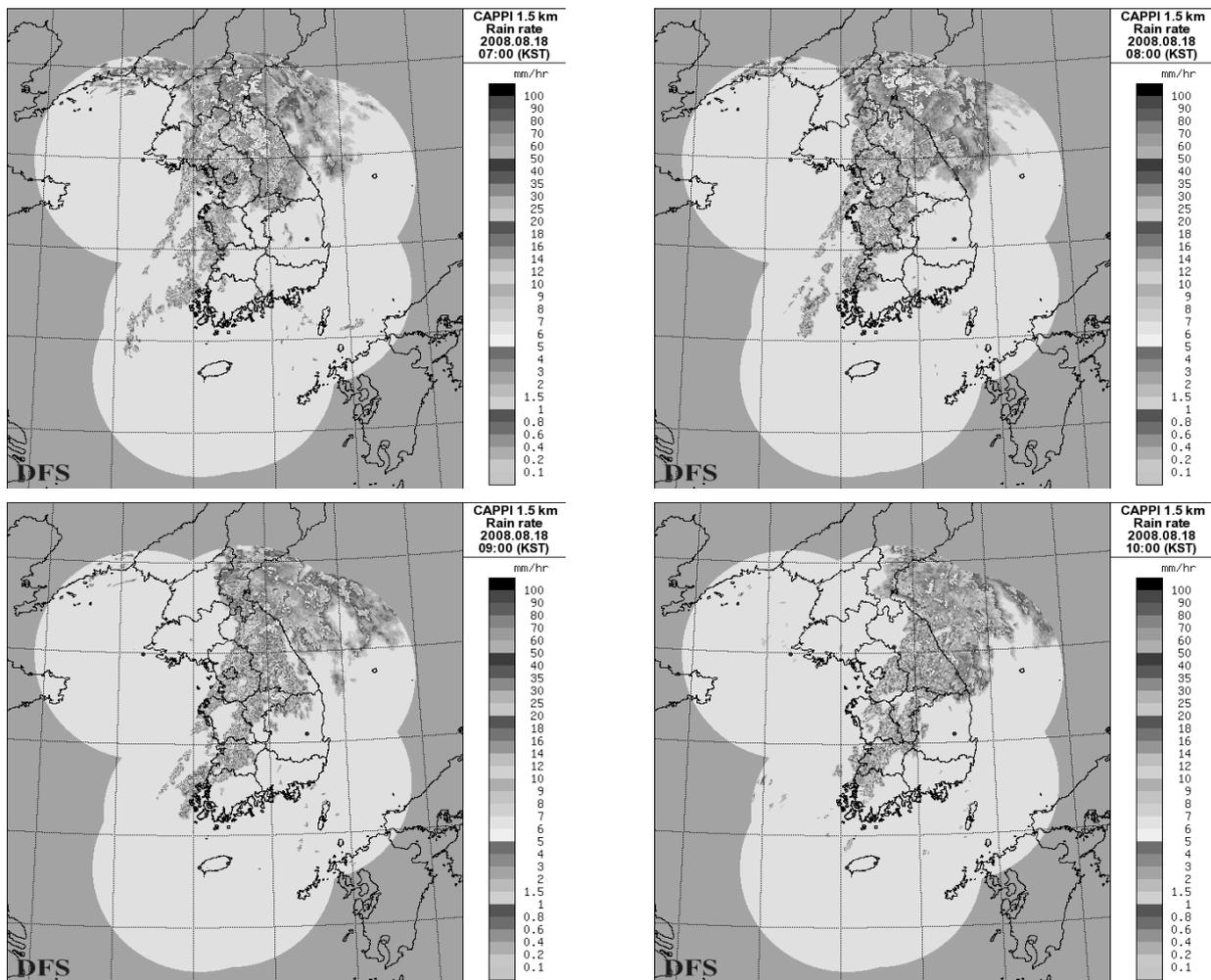


Fig. 2. 4th Rader image at rainfall season (Aug. 18th, 2008)

렸다. 오전 7시부터 최고 67 mm의 국지성 호우가 내리고 간헐적인 비가 시작되다가 오후 3시에 20 mm의 폭우가 내리고 4시에 비가 그쳤다. 도고천은 남원천의 폭우와 달리 간헐적으로 23일 오후 3시부터 0~5 mm로 다음날 오후 7시까지 강우가 내렸다.

4차 강우 시 조사는 2008년 8월 17일~8월 18일 동안 수행하였으며, 남원천의 경우 18일 오전 1시부터 간헐적인 강우 형태를 보이다 오전 8시에 시간당 25 mm의 폭우를 내리고 10시에 비가 그쳤다. 도고천의 경우는 18일 새벽 6시까지 강우량이 기록되지 않는 약한 비가 계속 내리다가 오전 7~9시 사이에 시간당 최고 21 mm의 폭우가 내리다가 10시까지 강우가 내렸다.

전반적으로 강우의 시간적 분포와 유출량의 관계는 매우 밀접한 상관관계를 보이고 있다. 강우 패턴을 보면 1차 강우에는 2번의 침투강우가 나타났고, 남원천(SK-1)은 2차와 3, 4차 강우에는 침투강우가 1번 나타났는데 반해, 도고천(SK-2)은 1차와 3차에서 2번의 침투강우가 나타났으나 2차와 4차에서 1번 나타났다. 이러한 강우패턴에 따라 유량의 변화도 침투강우빈도에 따라 침투유량이 나타났다. 또한 침투유량의 도달시간은 유역의 크기, 토지피복 및 토양수분 상태, 하도경사 등에 따라 달라진다.

3.1.2 강우 시 유량-농도변화

강우유출수의 농도는 기상조건이나 수리조건, 지형 및 토지이용특성에 영향을 받는다. 일반적으로 강우유출수에 함유된 오염물질의 농도는 강우 초기에 매우 높고 시간이 지날수록 낮아지는 특성을 보이는데, 이를 초기세척 효과(first-flushing effect)라 한다. 강우 초기에 고농도의 오염물질을 포함하는 초기우수는 단시간에 다량의 오염물질을 유출시켜 수계에 심각한 오염을 초래할 수 있다.

대표적으로 남원천(SK-1) 1차 강우사상에 대한 지점별 유량-농도 변화 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 변화폭은 다르지만 대부분의 항목에서 유출량에 비례하여 증가하는 경향을 나타냈다. N계열의 경우 유량에 큰 영향을 받지 않고, 산발적으로 나타나 경향을 파악하기는 어려웠으며, P계열은 유량에 비례하는 경향을 보여주었다. 반면 입자상 물질인 SS는 초기농도에 비해 농도가 떨어진 뒤 유량과 관계없이 일정한 경향을 보여주었으며, 대부분의 항목이 공통적으로 초기 세척 효과의 영향으로 강우초기에 농도가 일시적으로 높게 나타났다. 하지만 1차 강우사상이 약 20 mm/hr 이하로 크지 않고 강우 시간에 따른 농도값의 수치 폭이 크지 않은 것으로 볼 때, 비점오염원으로 인한 오염원 유출이 미미했다는 것을 알 수 있다.

2~4차 강우사상에 대한 2개 지점별 유량-농도 그래프를

나타내었다. 1차 강우사상과 비교하여 2차에는 유량에 의한 농도 변화가 그 추세를 더 잘 반영하는 것으로 나타났다. SS와 T-P뿐만이 아니라 BOD와 같은 용존 물질도 강우량에 따라 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 강우 강도나 선행강우와 관련이 있을 것으로 판단된다. 2차 강우 동안 SKR-1 지점의 T-P 농도는 일반 생활하수 수준에 가까운 2.5 mg/L까지 상승하였으며, 식물성 플랑크톤의 성장에 직접 사용될 수 있는 PO₄-P의 농도도 0.613 mg/L까지 상승하였다. 이러한 결과는 나머지 강우사상에서도 비슷한 농도로 관측되었으며, 유출량을 고려한다면 많은 양의 입자상과 용존상 인(Phosphorus)이 강우 시 삽교호로 비점오염원의 형태로 유입되고 있음을 알 수 있다.

3.1.3 강우 시 수질결과 통계분석

EMC(Event Mean Concentration)는 유량가중평균농도로서 총 유출부하량을 총 유출유량으로 나누어 산정하며, 강우강도와 총 강우량에 따라 다른 값을 나타낸다. 따라서 장기간 동안 다양한 조건의 강우-유출 사상에 대하여 EMC를 산정하면 그 유역의 빈도별 수문사상에 따른 유량가중평균 농도를 산정할 수 있게 되어 강우 시 오염부하량 산정에 쉽게 활용할 수 있다. EMC 농도 산정식은 Eq. (7)과 같다.

$$EMC = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i} \quad (7)$$

여기서 Q_i(유출량, m³/d), C_i(오염물질농도, mg/L)이다.

삽교호 유역에서 EMC는 강우사상에 따라 다르게 나타났으며, 강우강도와 총 강우량이 가장 컸던 2차 강우 시 측정 결과에서 EMC가 가장 높게 나타났다. 특히 SS는 그 성향이 가장 컸다. 총 부하량은 측정농도에 유량을 곱하고 측정시간까지의 지속시간을 곱한 값을 모두 합하여 산정하였다.

도고천은 삽교천, 무한천, 곡교천과 유사한 오염도를 보였으나, 유역면적과 유출량이 큰 남원천에서 총 부하량이 많았으며, EMC에서도 도고천에 비해 높게 나타났다. 또한 모든 항목에서 총 부하량이 높게 나타나 강우 시 오염부하량이 심각한 것으로 판단된다.

3.2 유달률 산정

3.2.1 유달률 산정 방법

유달률은 유역으로부터 처리시설을 거친 후 또는 미처리된 오염원의 배출부하량과 하천의 특정 구간에 도달한 유달부하량의 비를 나타낸다. 유달률은 유역의 지형적 조

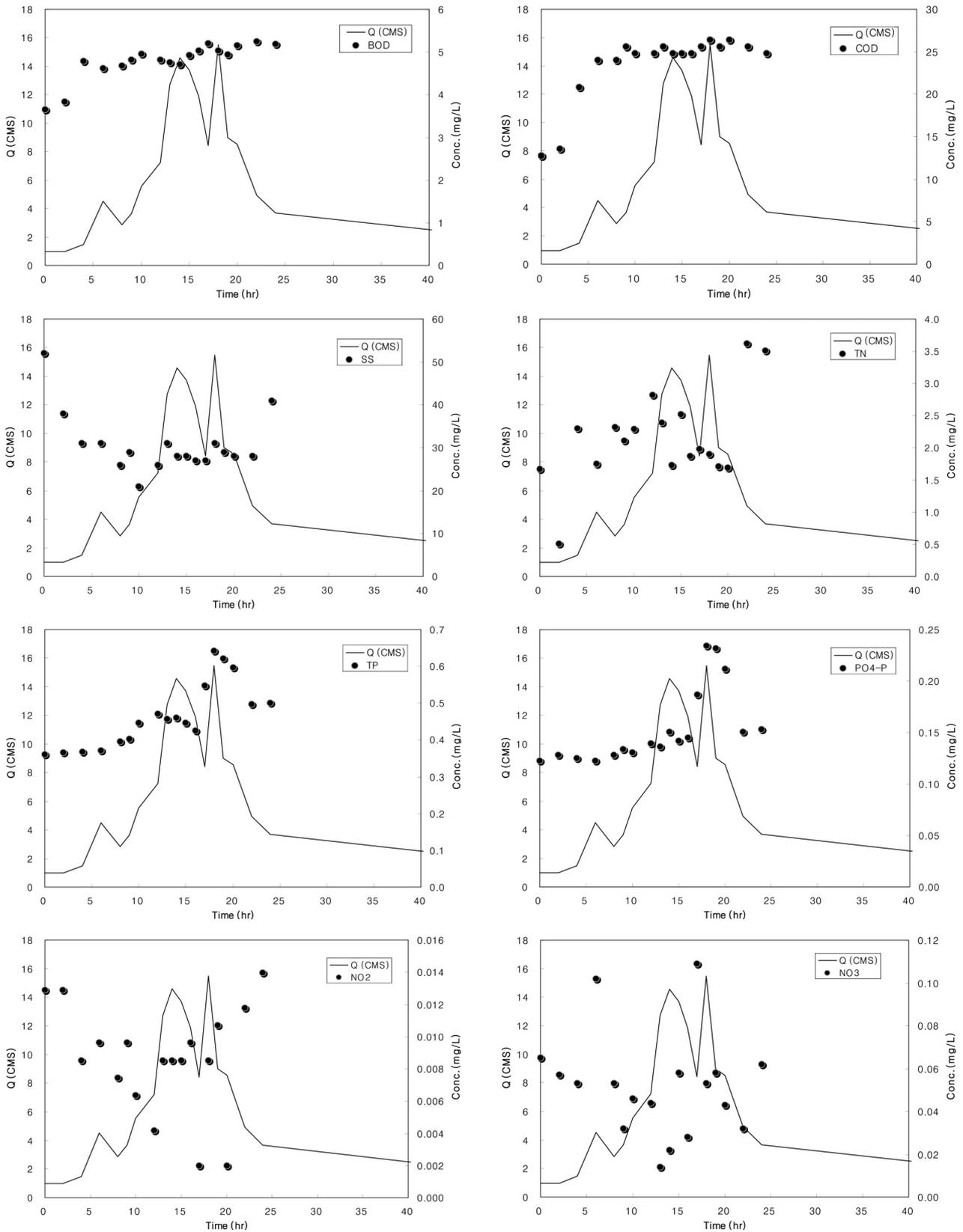


Fig. 3. Comparison flow rate vs. concentration at SKR-1 (1st)

건, 수리수문학적 조건, 기후, 계절 등 매우 다양하고 복잡한 변수들에 의해 결정되기 때문에 정확한 값을 산정하기는 어렵다. 본 연구에서는 실측을 통해 산정한 소유역 말단

부의 유달부하량을 해당 유역의 배출부하량으로 나누는 단순부하량비 기법을 사용하여 유달률을 산정하였다(Lee & Shin, 2013).

$$\text{유달률} = \frac{\text{유달부하량}}{\text{배출부하량}} \quad (8)$$

3.2.2 유달률 산정 결과

남원천, 도고천, 삼교천, 무한천, 곡교천의 지점별 월별 배출부하량과 유달부하량, 유달률을 산정하고 배출부하량과 유달부하량에 대해서 월별 강우유출률을 적용하여 월별 배출부하량과 유달부하량을 산정하였다.

각각의 지점별 유달률을 Table 1에 나타내었다. 유역 전체의 유달률을 보면 BOD는 0.40, T-N은 0.34, T-P는 0.08로 산정되었다. 다른 수질항목에 비해 T-P의 유달률이 상대적으로 낮게 산정되었다. 하지만 전체 유달률을 산정하기 위해서는 강우패턴이 다른 월별로 유달률을 산정하여 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

Table 2에 유역 전체에 대한 월별 유달률을 나타내었다. 유역 전반의 특성을 보면 T-N과 T-P의 유달률은 연중 변화가 거의 없다. T-N은 갈수기 때에 0.2~0.3의 유달률을 나타내었으며, 홍수기 때에는 0.31~0.39를 나타내었다. T-P는 갈수기에도 0.3 이상, 홍수기 때에는 0.11의 수치를 나타내

는데 이는 연평균 유달률인 0.08과 비슷한 수치이다.

4. 결 론

삼교호의 연간 오염부하량 중 비점오염원이 차지하는 비중은 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 호수의 부영양화 원인 물질이면서 제한영양염인 총인의 경우 90 % 이상이 비점오염원 형태로 유입한다. 조사기간 동안 BOD의 최대 단위유출부하량은 도고천유역에서 0.304 kg/hr/ha로써 가장 높게 나타났으며, 다음으로 남원천, 곡교천, 삼교천, 무한천 유역 순으로 높았다. COD의 단위유출부하량도 도고천 유역에서 2.053 kg/hr/ha로써 가장 높게 나타났다. SS의 단위유출부하량은 남원천 유역에서 33.697 kg/hr/ha로써 가장 높았으며, 다음으로 도고천, 곡교천, 삼교천, 무한천 유역 순으로 높게 나타났다. T-N의 단위유출부하량도 남원천 유역에서 0.283 kg/hr/ha로써 가장 높았으며, 다음으로 도고천, 곡교천, 삼교천, 무한천 유역 순으로 높게 나타났다. T-P의 단위유출부하량은 남원천 유역에서 0.062 kg/hr/ha로써 가장 높게 나타났다. 금회 조사 지점의 유역 점유면적은 총 1,649.39 km²로

Table 1. Delivery rate of the main rivers

Location	Pollutant load (tonf/month)			Delivery load (tonf/month)			Delivery rate		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Namwoncheon	9,054.59	8,828.81	606.04	904.88	975.12	166.57	0.10	0.11	0.27
Dogocheon	84.83	78.55	175.71	131.85	80.14	19.57	1.55	1.02	0.11
Sapkyocheon	1,064.21	960.57	2,435.14	1,422.21	1,569.45	181.21	1.34	1.63	0.07
Muhancheon	790.66	779.96	1,878.64	762.45	476.70	137.24	0.96	0.61	0.07
Gokgyocheon	1,618.42	1,066.49	3,004.87	1,851.50	921.16	161.28	1.14	0.86	0.05
Total	12,612.70	11,714.36	8,100.41	5,072.89	4,022.58	665.86	0.40	0.34	0.08

Table 2. Monthly delivery rate of targeted areas

Month	Pollutant load (tonf/month)			Delivery load (tonf/month)			Delivery rate		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
1	155.65	86.87	320.11	77.63	61.14	9.86	0.50	0.70	0.03
2	634.95	406.19	376.51	132.29	105.12	17.38	0.21	0.26	0.05
3	632.37	402.43	378.96	134.97	109.48	17.68	0.21	0.27	0.05
4	898.72	755.12	550.36	297.58	243.27	40.11	0.33	0.32	0.07
5	947.61	815.79	586.90	336.95	270.56	44.42	0.36	0.33	0.08
6	1,358.97	1,344.55	925.87	655.10	525.61	85.82	0.48	0.39	0.09
7	2,788.59	3,215.51	1,777.98	1514.72	1,176.32	195.50	0.54	0.37	0.11
8	1,649.59	1,756.26	918.85	679.65	544.15	90.90	0.41	0.31	0.10
9	1,801.57	1,920.70	1,238.62	949.74	750.31	124.81	0.53	0.39	0.10
10	587.60	343.72	339.14	99.00	75.21	12.67	0.17	0.22	0.04
11	636.42	412.01	378.62	129.56	110.44	18.18	0.20	0.27	0.05
12	520.67	255.22	308.49	65.70	50.98	8.53	0.13	0.20	0.03
Total	12,612.70	11,714.36	8,100.41	5,072.89	4,022.58	665.86	0.40	0.34	0.08

써, 각 유역으로부터 삼교호로 유입하는 연간 총 유달부하량은 BOD 5,072.89톤, T-N 4,022.58톤, T-P 665.86톤이었다. 강우 시 다량 유입하는 미처리 축산폐수는 삼교호 수질 오염의 주요한 원인으로 작용하고 있는 것으로 판단되며, 환경기초시설 투자와 아울러 철저한 단속이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

삼교호로 유입하는 주요 하천 5개 지점에서 유량과 수질의 실측을 통해 산정한 소유역 말단부의 유달부하량을 해당 유역의 배출부하량으로 나누는 부하량비 기법을 사용하여 유달률을 산정한 결과를 요약하면 남원천 유역의 BOD의 월별유달률은 0.10으로 갈수기에는 0.03~1.09를 유지하며 홍수기에는 0.13까지 유달률이 나타났다. T-N의 경우 연중 유달률이 0.07 이상으로 나타나고 있으며 홍수기 때에는 0.11~0.12의 유달률을 보이고 있다. 갈수기인 봄과 가을, 겨울철에 T-P는 약 0.12 정도의 유달률을 나타내고 있으며, 홍수기인 여름철에는 유달률이 0.30~0.36으로 나타났다.

도고천 유역의 유달률은 BOD와 T-N에서 1을 넘는 경우가 발생하였다. 그 원인은 원단위를 사용하여 산정된 배출부하량이 강우 시 유입하는 오염부하량을 과소평가하기 때문으로 판단된다. 강우 시 유역으로부터 배출되는 부하량은 임야와 농지와 같은 토지계의 부하량만 있는 것이 아니라, 합류식하수관거의 월류수와 축산폐수의 무단 방류 등 다양한 점오염원이 비점오염원화하여 유입되고 있는 실정이다. 삼교천 유역은 4월~9월에 BOD 유달률이 1이 넘게 나타나다 갈수기 때 0.4~0.83으로 산정되었다. 홍수기인 여름철에는 유달률이 높은 수치를 보이며, T-N의 경우에는 4~9월 유달률이 1을 넘게 나타났다. 반면 T-P의 경우는 홍수기 때에도 0.08~0.10의 낮은 수치를 나타내었다. 무한천 유역은 연간 총 유달률이 BOD는 0.96, T-N은 0.61, T-P는 0.07로 나타났으며 홍수기인 6, 7, 8, 9월의 BOD 유달률이 1이 넘게 나타났다. T-N은 0.68, T-P는 0.09가 최고로 나타나고 있다.

이 지역은 다른 지역과는 달리 축산 농가의 분포가 많고 농경지가 많이 포함되어 있다. 곡교천 유역은 다른 유역과 마찬가지로 갈수기 때는 유달률이 작게 나타나고 홍수기인 여름철에는 유달률이 크게 산정되었다. 그러나 항목별로 보면 T-P는 변동의 폭이 크지 않은 반면 BOD와 T-N은 유달률의 변동 폭이 매우 큰 것을 알 수 있다. 홍수기 때 BOD의 유달률은 1.62까지 올라가지만 갈수기 때는 0.38까지 내려갔다.

삼교호 조사 유역 전체의 유달률 BOD는 0.40, T-N은 0.34, T-P는 0.08로 산정되었다. 유역 전반의 특성을 보면 T-N과 T-P의 유달률은 연중 변화가 거의 없다. T-N은 갈수기 때에 0.2~0.3의 유달률을 나타내었으며, 홍수기 때에는

0.31~0.39를 나타내었다. T-P는 갈수기에도 0.3 이상, 홍수기 때에는 0.11의 수치를 나타내는데 이는 연평균 유달률인 0.08과 비슷한 수치이다. 향후 삼교호의 세부 소유역의 유달률 산정 시 본 조사에서 계측한 소유역의 유달률을 토지이용과 지형 특성을 고려하여 유사한 소유역 값을 적용하는데 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국농어촌공사의 지원 사업에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

1. Droc, A. and Zagrorc Koncan, J. (2002), Estimation source of total phosphorous in river basin and assessment of alternatives for river pollution reduction, *Environment International*, Vol. 28, No. 5, pp. 393~400.
2. Fulcher, G. A. (1994), Urban storm water quality from a residential catchment, *The Science of the Total Environment*, Vol. 146~147, pp. 535~542.
3. Gunes, K. (2008), Point and nonpoint sources of nutrients to lakes - ecotechnological measures and mitigation methodologies - case study, *Ecological Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 116~126.
4. Khaleel, R., Reddy, K. R. and Overcash, M. R. (1980), Transport of potential pollutants in runoff water from land areas receiving animal wastes: a review, *Water research*, Vol. 14, No. 5, pp. 421~436.
5. Lee, Y. S. and Shin, S. H. (2013), Effective reservoir management methods using nutrients leaching characteristic analysis: case study of the hongdong reservoir, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 23, No. 2, pp. 95~104 (in Korean).
6. Ministry of Environment (2004), Standard methods, No. 2004-188 of the Ministry of Environment, 1205 p.
7. Mostaghimi, S., Park, S. W., Cooke, R. A. and Wang, S. Y. (1997), Assessment of management alternatives on a small agricultural watershed, *Water Resource*, Vol. 31, No. 8, pp. 1867~1878.
8. National Institute of Environmental Research (2012), Technical note of total maximum daily load, No. 11-1480523-001967-01 of National Institute of Environmental Research, 106 p (in Korean).
9. Rao, N. S., Easton, Z. M., Schneiderman, E. M., Zion, M. S., Lee, D. R. and Steenhuis, T. S. (2009), Modeling watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading, *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, No. 3, pp. 1385~1395.
10. Rast, W. and Lee, G. F. (1983), Nutrient loading estimates for lakes, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 109, No. 2, pp. 502~517.
11. Todd, D. A., Bedient, P. B., Haasbeek, J. F. and Noel, J. (1989), Impact of land use and NPS loads on lake quality, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 115, No. 3, pp. 633~649.