

강우시 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구

-곡성천 상·하류를 대상으로-

양해근*

Runoff Characteristics of Non-Point Source Pollutants in Storm Event -Case Study on the Upstream and Downstream of Kokseong River, Korea-

Heakun Yang*

요약 : 본 연구에서는 곡성천을 대상으로 강우 유출수와 함께 배출되는 비점오염물질을 평가하기 위하여 산지 계류와 인위적인 영향이 큰 하류 지점의 유출특성을 조사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

먼저 곡성천 수질형성에 영향을 미치는 주요 요인은 농경지와 주거지 등에서 유출되는 비점오염원에 기인할 것으로 생각된다. 강우 유출수는 시가지의 직접 유출성분과 농경지의 월류수가 빠르게 개입한 하류부의 유량이 상류 계류부보다 신속하게 반응하였다. 비점오염원에 의한 오염물질의 발생은 강우강도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며 계류부의 SS, BOD, COD, T-P와 하류부의 BOD, COD, T-N이 초기 강우의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 하류부의 평균수질농도는 계류부에 비해 약 3~315배 증가하였으며, 특히 SS와 T-P의 배출이 극단적으로 증가하였다. 계류부의 강우 유출수 중 지표 유출수가 4.7%에 지나지 않는 반면에 하류부의 지표 유출수는 29%를 차지하고 있어 EMC증가의 중요한 요인으로 간주된다. 그리고 토지이용 형태에 따라 강우시 유출수의 증감의 변화에 따른 수질변화가 복잡하게 나타나고 있었으며, 비점오염원 관리에 있어서 무엇보다도 중요한 것은 초기 유출수의 저감방안의 해결이 가장 중요하다고 판단된다.

주요어 : 강우-유출, 비점오염물질, 수질평균농도, 토지이용, 곡성천

Abstract : The study was investigated to runoff characteristics of non-point pollutants according to rainfall in Kokseong river watershed. The result of which is as follows : First of all, major reason which affect the formation of water quality of Kokseong River is judged to be caused by non-point pollution source which flows out from farmland and residential area. Flow of rainfall effluent in the downstream in which direct flow components of urban district and combined sewer overflows of farmland was intervened faster than that in the upstream reacted more promptly. Generation of pollutants by non-point source shows increasing trend in general in accordance with the increase in the intensity of rainfall but it was affected by SS, BOD, COD and T-P in the upstream part whereas BOD, COD and T-N were significantly affected by beginning period of rainfall in the downstream. EMC in the downstream increased approximately 3~315 times as compared to upstream, particularly the discharge of SS and T-P were extremely increased. While surface flow out of rainfall effluent in the upstream was only 4.7%, the surface flow in the downstream took up as much as 29%, which was major reason for the increase of EMC. From the above contents, we can see that the change in water quality according to the increase and decrease of effluent at the time of rainfall showed very complex pattern depending on the type of land use, and it is judged that the most important thing for the administration of non-point pollution source is to come up with the solution for the reduction of effluent at the beginning.

Key Words : rainfall-runoff, non-point pollution, EMC(Event Mean Concentration), landuse, Kokseong River

* 건국대학교 이과대학 지리학과 강의교수(Lecturer, Dept. of Geography, Konkuk University), hydroyang@hotmail.com

1. 머리말

최근 오염총량제도와 더불어 효과적인 수질개선을 위한 통합적인 유역관리 방안이 도입되고 있다. 그러나 비점오염원의 오염물질은 대부분 강우시 유출되므로 유출경로와 그 특성 파악이 매우 어렵고 발생량 또한 불규칙하여 관리가 어려운 현실적인 문제가 있다(김성수 등, 2002; 이진희 등, 1988; Hall, 1984; Pegram *et al.*, 1999). 이러한 강우 유출수에 영향을 미치는 인자는 선행강우와 토지이용, 식생피복, 유출률, 인위적 개입 등이 있으며, 이들의 복잡한 상호작용에 의해서 유출수의 수질특성이 결정된다(김진하 등, 2003; 오염택 등, 2004; Myers *et al.*, 1985). 강우 유출수는 평상시 하천수보다 많은 양의 물질을 배출할 뿐만 아니라 단시간에 하류까지 도달시키는 특성을 가지고 있다(國松孝男·村岡浩爾, 1990).

근래 강우 유출수의 수질에 대한 관심은 매우 높아지고 있으며, 특히 하천 수질관리에 있어서 강우시 발생하는 비점오염원에 대한 관리의 중요성이 대두되고 있다(이진희 등, 1998). 그리고 집중 강우가 발생하는 여름철에는 산지사면에서 침식된 토사가 계류수에 유입되어 일시적으로 높은 부유사를 초래할 뿐만 아니라(Park, 1992), 부유사와 함께 운반되는 각종 영양염류가 하류부 부영양화의 원인이 되기도 한다(우보명, 1993; Kunze and Stednick, 2006). 최지용 등(1999)에 의하면, 하수처리율이 향상되고 경제활동 수준이 높아질수록 강우시 유출되는 비점오염원의 영향이 높아지고 있으며, 서울지역의 총 오염부하량에 대한 비점오염원의 부하량은 COD 15%, SS 28%에 달한 것으로 보고하고 있다. 이는 시가지에 쌓여 있는 오염물질이 지표 유출수에 의해 하천으로 유입되거나(Ojo, 1990), 합류식 하수관거에 남아 있던 도시하수의 찌꺼기가 강우시 범람하여 하천으로 유입된 결과에 기인한다(Gregory, 1987). 그리고 농촌지역의 비점오염원은 생활하수나 퇴비 침출수, 농약폐기물, 축산분뇨, 비료 등이 있으며 이들 대부분 강우 유출수에 의해서 하천으로 유입되고 무강우시에는 지하로 침투되어 기저 유출수와 함께 하천으로 용출됨으로서(이수길, 1991) 폐쇄성 수역의 부영양화를 일으키는 주요 원인으로 대두하

고 있다(신은성 등, 2001; Hong *et al.*, 2001).

최근 국내에서도 비점오염원의 오염부하량 및 원단위 산정에 관한 연구는 이수길(1991), 이진희 등(1998), 이호준 등(1999), 신은성(2001), 김성수 등(2002), 노기안 등(2005) 이외에도 많은 연구가 활발하게 보고되고 있으나 강우 유출수에 대한 유출특성 및 유출성분의 기여에 관한 분석은 미진하다. 김진하 등(2003)과 오염택 등(2004), 장성호·박진식(2005) 등에 의해 강우시 비점오염원의 유출수에 대한 연구가 있으나 강우시간별 수질농도 변화에 대한 기술에 그치고 있다. 강우시 유출되는 오염물질에 대한 규명은 복잡한 유역의 특성과 수문조건에 따라 크게 달라지므로 장기간에 걸친 다양한 유역의 관측자료 축적이 전제가 되어야 하며, 강우 이벤트별 그 특성이 파악될 때 비로소 가능한 문제이다.

본 연구에서는 강우시 유역에서 발생하는 비점오염물질의 유출특성을 조사하기 위하여 곡성천 유역을 대상으로 동일한 단일 강우사상에 있어서 인위적인 영향이 미치지 않는 산지 계류수와 인간의 개입이 활발한 하류부의 강우 유출수의 유출성분과 평균농도(EMS; Event Mean Concentration)를 비교하고자 한다. 아울러 인위적 요인에 의한 강우 유출수와 함께 배출되는 오염물질과 산지 계류부의 오염 기여도를 조명하고자 한다.

2. 연구지역의 개요

1) 곡성천 유역의 수문지형·지질 특성

연구지역은 전라남도 동북부에 위치한 섬진강 소지류의 하나로 섬진강 중류부에 유입하는 곡성천 유역이다. 유역은 동악산(E.L. 735m)과 형제봉(E.L. 655.6m), 최악산(E.L. 697.0m)을 잇는 서측 산릉과 해발고도 230~560m의 남쪽 산릉이 분수계를 이루고 있다(Fig. 1). 이들 NNE-SSW방향의 산체들에 의해 형성된 하곡은 SSW-NNE방향으로 향하고 있다.

서측 산능부는 해발 250m부근부터 완만한 산록부가 발달하고 있다. 장재훈(1998)은 이들의 형태적인 특

징과 퇴적물 피복 상태에 따라 ① 퇴적물에 덮여 있지 않는 구릉성 완사면, ② 퇴적물로 덮여 있으나 평면형상의 기반침식과 유사한 선상완사면, ③ 두꺼운 사력층으로 덮여 있는 선상지성 완사면으로 분류하였다. 그러나 수문지형학적 관점에서 볼 때, 층적퇴적물로 간주되는 퇴적층은 완사면의 말단부 혹은 산록부의 하천주변에서 흔히 관찰되고 있다. 이들이 비록 산록침식면에 퇴적된 얇은 퇴적층이라 할지라도 유수의 퇴적작용에 의한 완사면이라면 그 두께에 상관없이 선상지라 불려도 큰 문제는 없으리라 사료된다(윤순옥 등, 2005). 한편, 곡성천 상류부는 호우가 집중되는 풍수기에 일시적으로 하천 흐름이 나타나지만, 평상시에는 곡부 혹은 상류부에서 복류하는 선상지의 수문지형 특성을 가지고 있다.

하천 수계는 북서측 산록을 중심으로 NW-SE 방향의 1, 2차 지류와 남쪽 산록을 따라 SSW-NNE 방향으

로 흐르는 곡성천 본류가 직교하는 하천망을 이루고 있다(Fig. 1). 범람원은 본류를 따라 협소하게 나타나지만, 섬진강과 합류하는 하류부에서는 넓은 충적평야가 발달하고 있다.

지질분포는 대체로 화강암류가 넓게 분포하고 있다(Fig. 2). 서북쪽 산록 전체를 차지하는 엽리흑운모화강암(Deformed biotite granite)은 중생대 초 선캄브리아시기(Precambrian)의 편마암(Gneiss)을 관입한 것으로 주라기(Jurassic Period)에 재 관입한 흑운모화강암(Biotite granite)의 영향으로 변성을 받아 엽리발달이 뚜렷한 것이 특징이다(한국지질자원연구원, 1984). 남동쪽 산록에 분포하는 화강암질 편마암(Granite gneiss)은 이지역의 기반암체를 이루는 것으로 비교적 토양 심도가 깊으나 엽리흑운모화강암지역은 토양 심도가 매우 얇아 산정부를 중심으로 기반암의 노출이 심하다. 엽리흑운모화강암과 화강암류편마암의 경계

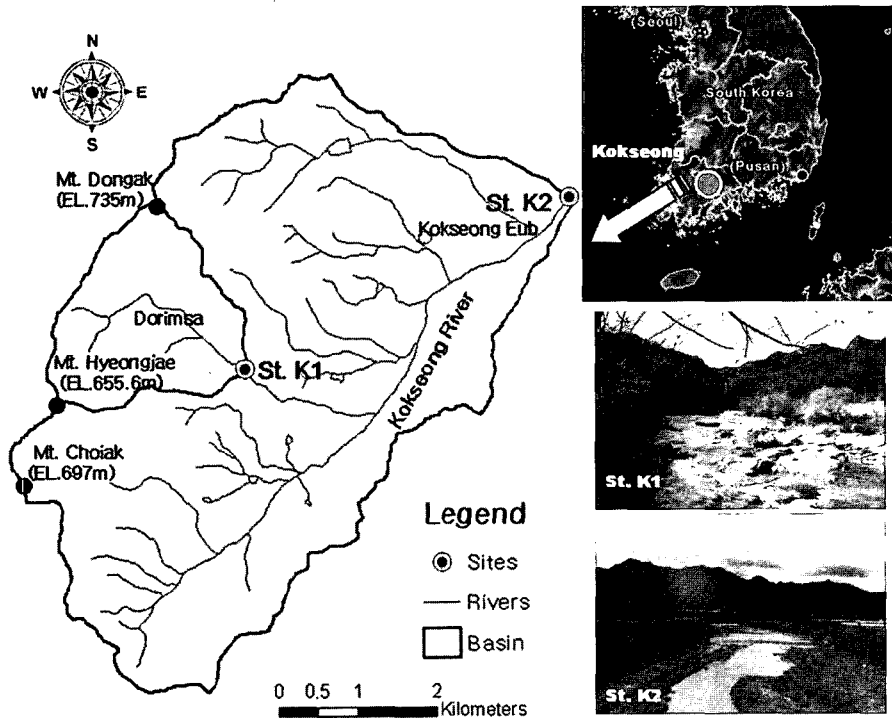


Fig. 1 Location of the study watersheds and drainage system. Shown are the two stream flow measuring and sampling stations, St. K1 and St. K2, and rainfall measuring stations at St. K1.

에 분포한 흑운모화강암은 차별침식으로 평지를 이루고 있으나(성운용, 2004), 주로 엽리흑운모화강암지역에서 운반된 퇴적물로 덮여 있어 기반암의 노두를 관찰하기가 쉽지 않다.

이처럼 화강암류 암석과 층적지형이 전체 지역의 약 89.1%를 차지하고 있으며 특히 엽리흑운모화강암 지역을 중심으로 하천수계가 발달되어 있다는 점에서 곡성천 수질형성에 미치는 지화학적 조건은 큰 차이가 없을 것으로 사료된다.

2) 곡성천 유역의 토지이용 및 식생분포

곡성천 유역은 전라남도 곡성군 곡성읍과 오곡면 일부지역을 포함하고 있다. 2000년 현재 곡성천 유역의 인구는 약 10,913명이며, 농·축산업 중심의 전형적인 농촌지역이다.

곡성천 유역의 토지이용 현황은 Fig. 3 그리고 Table 1과 같다. 먼저 Fig. 3은 국립지리원 수치지형도 1/25,000을 기초로 환경부의 환경지리정보시스템에서 제공하는 식생정보¹⁾ 및 식생도(1/50,000)²⁾ 그리고 현지자료를 참고로 토지이용을 분석한 것이다. 그 결과를 보면 전체면적의 약 71.86%(22,117km²)가 산림지

역이며, 논과 밭이 20.84%를 차지하고 있다. 시가지와 자연부락 등의 거주지역은 약 4.4%, 도로가 1.92%, 하천부지가 0.71%, 저수지가 약 0.28%를 차지하고 있어 곡성천 수질형성에 영향을 미치는 주요 요인은 농경지 혹은 주거지와 같은 비점오염원에 기인할 것으로 생각된다³⁾.

Fig. 4는 환경부의 환경지리정보시스템에서 제공하는 식생정보¹⁾와 식생도(1/50,000)²⁾ 그리고 환경부(2000) 제2차 전국자연환경기초조사 보고서를 토대로 산림지역을 크게 활엽수림, 혼합림, 침엽수림으로 재분류한 식생분포도이다. 침엽수림은 전 유역면적의 절반에 달하는 약 49.64%를 차지하고 있으며, 활엽수림이 8.62%, 혼합림이 13.6%를 각각 점유하고 있다. 그리고 삼림유역의 유출특성을 조사하기 위해 선정된 St. K1(Fig. 1)지점에서는 배후 집수역의 81.05%가 침엽수림이고, 혼합림이 18.06%, 활엽수림이 0.09%를 차지하고 있다.

환경부(2000)의 제2차 전국자연환경기초조사에 의하면 침엽수림 지역에서는 주로 소나무(*Pinus densiflora*)와 리기다소나무(*Pinus rigida*)가 군락을 이루고 있으며, 활엽수림에서는 굴참나무(*Quercus variabilis*)와 졸참나무(*Quercus serrata*) 그리고 혼합수림에는 소나무(*Pinus densiflora*)와 졸참나무(*Quercus serrata*)가 군락을 이루고 있는 것으로 보고되고 있다.

3. 연구내용 및 조사방법

강우시 비점오염원에 기인한 하천 오염물질과 그 유출 특성을 조사할 목적으로 선정된 조사지점은 인위적 오염원이 거의 없는 상류 계류지점(St. K1)과 인위적인 영향이 크게 작용하는 하류지점(St. K2)을 각각 선정하였다(Fig. 1). 대상 강우는 1999년 4월 9일부터 4월 10일 사이에 내린 봄철 강우로서 총 30.1mm이다. 곡성 지역의 4월 강수의 평년값이 92.8mm⁴⁾임을 감안할 때 일강수량 30.1mm는 4월평균 강수량의 1/3을 차지한다. 강우량 측정은 유역의 평균고도에 가까운 St. K1지점에 간이우량계⁵⁾를 설치하여 시간단위로 측정하였다. 이외에도 St. K1과 K2지점에서 1시간 간격으로 유량과

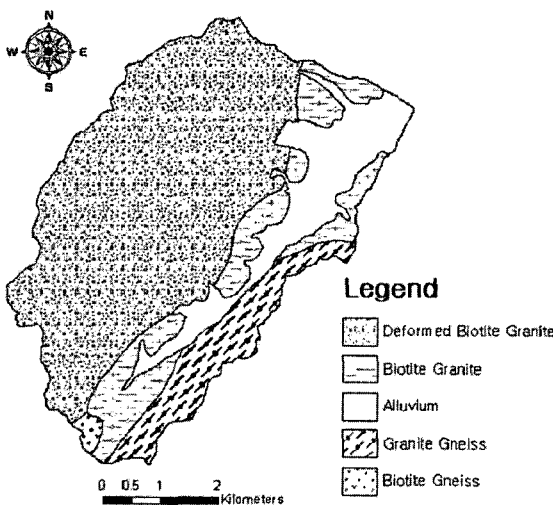


Fig. 2 Geologic map of the Kokseong river watershed(Geological and Mineral Institute of Korea, 1984).

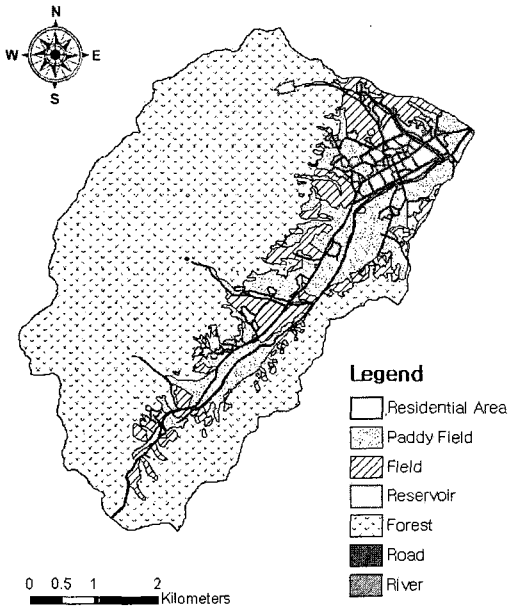


Fig. 3 Landuse map of the Kokseong river watershed

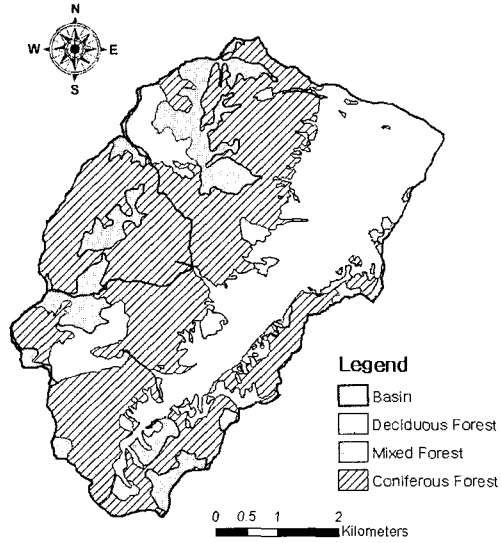


Fig. 4 Vegetation map of the study watershed (Ministry of Environment Republic of Korea, 2000)

수온, pH(potential hydrogen), 전기전도도(EC; electric conductivity), 용존산소(DO; dissolved oxygen)를 측정하였으며, 부유성 고형물질(SS; suspended solid)과 총 질소(T-N; total nitrogen), 총 인(T-P; total phosphorus), 질산성질소(NO₃-N; nitrate

nitrogen), 인산염(PO₄-P; orthophosphates), 생물학적 산소요구량(BOD; biochemical oxygen demand), 화학적 산소요구량(COD; chemical oxygen demand) 분석용 시료를 채수하였다. 관측 및 분석방법은 다음과 같다.

Table 1 Distribution of landuse and vegetation of the study watersheds.

| | St. K1 (upstream of Kokseong River) | | | | St. K2 (downstream of Kokseong River) | | | |
|------------------|--|-------|---------|-------|--|-------|---------|--|
| | Area(km ²) | | Rate(%) | | Area(km ²) | | Rate(%) | |
| Residential Area | - | | - | | 1.355 | | 4.40 | |
| Paddy Field | - | | - | | 3.831 | | 12.45 | |
| Field | - | | - | | 2.581 | | 8.39 | |
| Reservoir | - | | - | | 0.085 | | 0.28 | |
| Forest | Deciduous Forest | 0.004 | 100 | 0.09 | 2.654 | 71.86 | 8.62 | |
| | Mixed Forest | 0.808 | | 18.86 | 4.186 | | 13.60 | |
| | Coniferous Forest | 0.347 | | 81.05 | 15.277 | | 49.64 | |
| Road | - | | - | | 0.590 | | 1.92 | |
| River | - | | - | | 0.218 | | 0.71 | |
| Total | 4.285 | | 100 | | 30.776 | | 100 | |

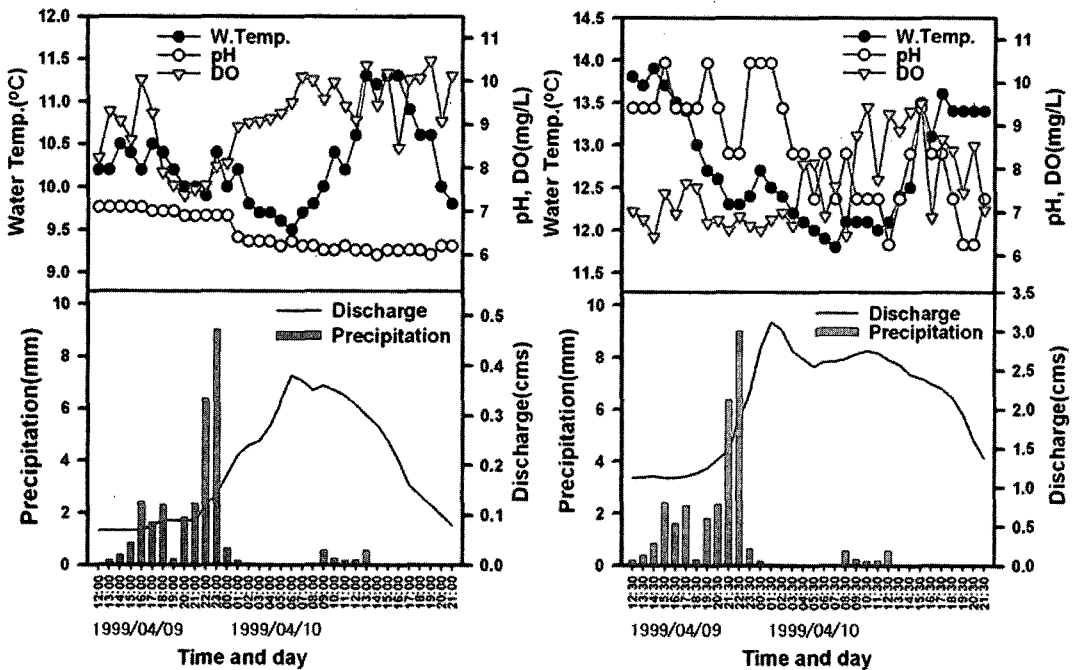


Fig. 5 Change in stream discharge, water temperature, pH, dissolved oxygen concentration at upstream(St. K1) and downstream(St. K2) of Kokseong River, Apr. 9-10, 1999.

유량은 플라이스 유속계(中淺計測, NP-275)를 이용한 단면적법으로 측정하였으며, 중수시 유량측정을 위하여 사전에 하천단면을 측량하였으며, 유속계 투입지점은 동일지점의 수심변화를 고려한 1점법을 사용하였다. 수온, pH, EC, DO는 수온계(CKC, CT-66), pH meter(TOA, HM-12P), EC meter(TOA, CM-14PW), DO meter(TOA, DO-14P)로 각각 측정하였으며, 분석용 시료는 항온상자(ice box)에 보관하여 실험실로 운반하였다. SS와 T-N, T-P, NO₃-N, PO₄-P, COD, BOD 분석은 환경부 수질공정 실험방법과 Standard Methods (APHA-AWWA-WEF, 1998)에 준하여 분석하였다.

4. 강우 유출수와 수질농도 변화

1) 유량, 수온, pH, DO

Fig. 5(a)는 상류 계류수(St. K1)의 강우유출에 대한

수온과 pH 그리고 농도변화이다. 강우는 1999년 4월 9일 13시부터 10일 01시 사이에 28.4mm, 4월 10일 09시부터 13시 사이에 1.75mm의 강우 이벤트가 각각 발생하였다. 1999년 4월 9일 13시부터 21시 사이에는 시간당 2mm전후의 가랑비가 지속되었으나 21시부터 23시 사이에 6-9mm/hr의 비교적 많은 비가 내렸다.

유량은 강우에 대응하여 9일 17시부터 증가하였으며 폭우가 지속되는 22시부터 급격하게 증가하여 10일 06시경에 첨두유량을 기록하였다. 수문곡선 하강부의 기울기가 대체로 큰 것은 기반암이 노출된 화강암지역에서의 유출 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

한편 강우 유출수의 증가와 함께 수온은 감소하는 경향을 보였으나 첨두유량을 기점으로 수온증가가 급격하게 나타났다. 강우가 종료된 10일 16시부터 급감하는 경향을 보였다. 이러한 수온 변화는 유역의 복잡한 기상·수문환경에 지배되어 나타난 것으로 기저유출이 탁월한 St. K1 지점의 경우 평상시 수온변화 폭이 적으나 강우에 의한 중간유출과 지표유출이 개입되어 수온변화를 초래한 것으로 판단된다(新井正·西澤利賢, 1974).

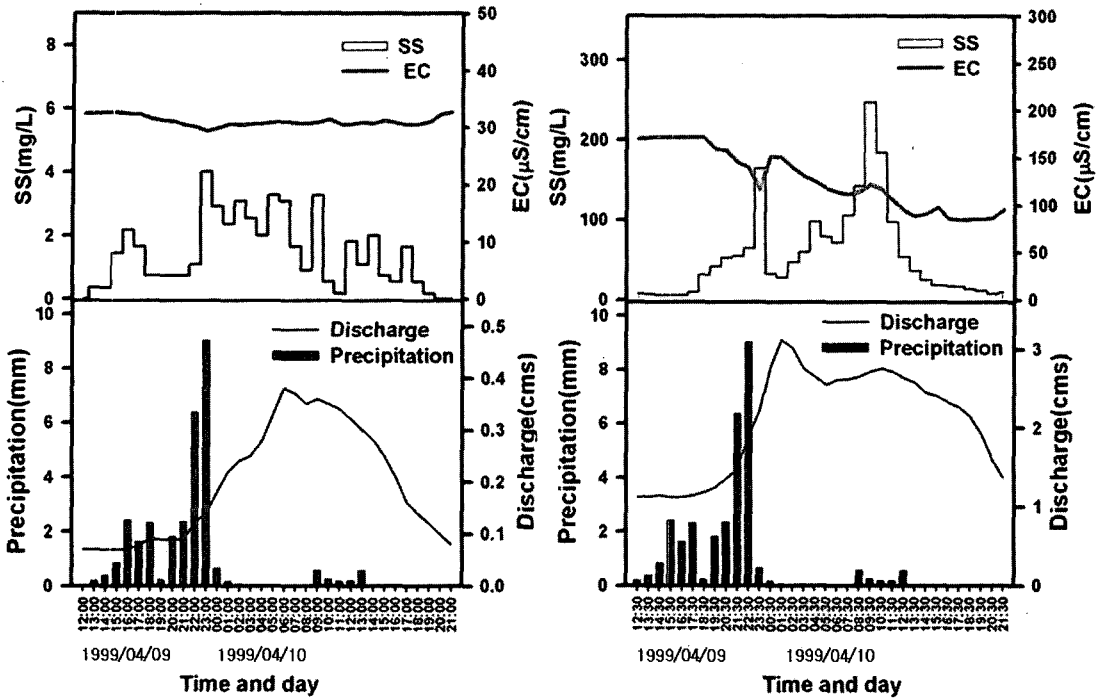


Fig. 6 Change in stream discharge, electric conductivity(EC) and suspended solid(SS) concentration at upstream(St. K1) and downstream(St. K2) of Kokseong River, Apr. 9–10, 1999.

pH 변화는 강우 후 감소하다가 4월 10일 20시부터 회복하는 경향을 나타내 토양층에 기인한 중간유출 성분이 개입한 것으로 판단된다. 일반적으로 유하하는 동안 하천수는 CO₂의 용존량이 적어져 약산성에서 약알칼리를 나타내지만, 빗물이 토양층을 통과 하는 동안 토양 미생물이 방출한 CO₂가 용해되어 지중수는 주로 산성을 나타내며(Keben, 2001; Tokuchi *et al.*, 1993) 이들 성분이 개입하면 하천수의 pH는 더욱 낮아지게 된다(半谷高久·小倉紀雄, 1985). St. K1지점의 강우 전 DO농도는 10mg/L 이상의 높은 농도를 보였으며 이벤트 기간 동안 증감의 변동이 심하고 강우 후 유출수의 증가와 함께 농도가 크게 높아지는 특성을 보였다.

Fig. 5(b)은 하류부(St. K2)의 수온, pH 그리고 DO 농도 변화이다. 먼저 강우에 대한 하천유량은 상류 계류부보다 신속한 반응을 나타내고 있다. 강우 초기 시가지로부터 직접 유출성분이 빠르게 개입하는 한편 논으로부터 월류수(overflow)가 유입되어 빠른 침투를

나타냈으며 두 번째의 큰 침투유량은 유역 전체의 lag time과 강우효과가 작용한 결과로 판단된다.

St. K2지점의 수온변화는 St. K1지점과 유사한 경향을 보이고 있으나 수온의 반동이 침투유량 이후 7시간 지체되어 나타났다. 그리고 pH 변화는 폭이 크고 복잡한 양상을 보이고 있어 다양한 유출경로 내지는 유출 성분이 개입한 것으로 간주된다. DO농도 역시 계류수의 변동과 동일하게 증가하는 경향을 보이니 시점별 편차가 크게 나타나는 것이 특징이다.

2) 오염물질의 농도 변화

Fig. 6(a)와 (b)는 강우 유출수의 EC와 SS 농도변화이다. EC의 경우, 강우발생 후 유량이 증가함에 따라 감소하다가 유량이 감소하면 강우 이전으로 회복하는 경향이 나타난다. 이러한 현상은 하류부보다 상류부에서 더욱 뚜렷하고, 유량증가에 따른 강우의 희석효과가 상류부에서 크게 작용한 결과라 판단된다(平田健

正·村岡浩爾, 1988). 김수진 등(2005)과 이현호(1997)의 연구에서도 이와 유사한 결과를 얻고 있다. 강우이전 높은 농도를 유지하던 하류부(K2)의 EC는 강우 초기 일시적인 감소 추세를 보였으나 시가지에 퇴적된 건설퇴적물의 세탈과 용탈의 영향(박재철·이현호, 2000)으로 유량증가와 함께 급증하다가 침두유량 후 대체적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 강우효과와 감소로 EC농도는 다시 강우이전으로 회복하는 경향이 뚜렷하다.

Fig. 7과 Fig. 8을 보면 초기 강우시 St. K1과 K2지점 모두 강우강도에 따라 SS농도가 비교적 민감하게 반응을 나타내고 있어 SS농도 변화에 강우강도가 직접적인 관계에 있음을 알 수 있다(박종관, 1994). 특히 St. K1 지점의 경우 하천 유량보다 앞서 침두농도가 나타나지만, St. K2지점의 SS농도는 하류부 농업용수용 보에 퇴적된 토사와 하상 침전물 등이 유량증가로 인한 교란·침식 운송 작용으로 하천 침두유량보다 다소 지체되어 침두농도가 나타났다. 그리고 초기 침단 유량 후 급증한 SS증가는 상류부의 오염물질의 지체(lag time)가 크게 작용한 결과로 간주된다(노기안 등, 2005). 강우 이벤트 동안의 SS농도는 St. K1지점에서 0~4.0mg/L로 실제 SS부 하를 논하기에 무리가 있는 저농도이지만, St. K2지점의 경우 5.45~247.09mg/L로 그 변동 폭이 45배에 달하였다.

BOD와 COD는 거주지의 면적비와 높은 상관성을 보이는 것으로 인간 활동에 의한 오염지표로 이용되고 있는 수질항목이다(이호준 등, 1999). Fig. 7은 강우 유출수에 대한 BOD와 COD 농도변화이다. St. K1의 경우, BOD 하천수질환경기준 I~II 급수를 나타내고 있으나, 인위적인 영향을 받고 있는 St. K2에서는 II~III 급수로 침두유량 후 시간별 증감의 폭이 크게 나타났다. COD 농도변화 역시 BOD와 유사한 경향을 보이고 있다. 인위적인 영향이 거의 없는 St. K1지점의 경우 강우강도에 대한 BOD, COD 반응은 거의 없으며, 오염물질 유출은 주로 하천 침전물질에 기인한 결과 하천 증수 후 세탈되어 시간경과에 따라 수질농도가 현저하게 저하되는 경향을 나타낸다. 그러나 St. K2에서는 강우강도와 선행강우, 유량증가 등이 작용하여 보다 복잡한 농도변화를 보이고 있다.

농촌지역에서 유입되는 오염물질은 주로 질소와 인이며, 특히 시비의 세탈과 용탈, 축사폐수에 기인한 것으로 보고되고 있다(이진희 등, 1998, 신영규, 2004). 일반적으로 NH_4^+ -N가 물속에 유입되면 질산화작용(Nitrification)에 의해 NO_2^- -N의 형태로 변하며 점차적으로 NO_3^- -N로 변하므로 새로운 오염물질의 유입이 없을 경우 T-N의 농도변화는 일어나지 않는다(Chow *et al.*, 1981; Quilbé *et al.*, 2006). 한편 토양층의 질소의 유입경로를 보면 토양층의 유기물 분해과정에서 생성된 NO_3^- -N는 토양에 흡착하지 못하는 성질을 갖고 있어 호우시 빠르게 유출되는 물질 중의 하나이다(平田健正·村岡浩爾, 1988; Hobara *et al.*, 2001). 특히 강우시 토양층의 포화대가 확대될 때 NO_3^- -N는 지중수의 이동경로를 통해 쉽게 하천으로 유출되어 하천수의 NO_3^- -N농도를 상승시키는 요인으로 작용한다(김수진 등, 2005; 木平英一 등, 1997; 平田健正·村岡浩爾, 1988; Hobara *et al.*, 2001).

St. K1지점의 강우 유출수의 T-N과 NO_3^- -N농도는 0.24~2.68mg/L, 0.23~2.54mg/L로 T-N 중 NO_3^- -N 성분이 대부분을 차지하고 있으며 변화 경향 또한 서로 일치한다(Fig. 8). 농도변화는 강우강도보다 유량변화에 더 반응하고 있는 것으로 볼 때 앞서 기술한 바와 같이 St. K1지점의 유출성분은 토양에서 유출되는 중간유출 혹은 그 영향을 직접 받는 지하수가 대부분을 차지한 것으로 생각할 수 있다(平田健正·村岡浩爾, 1988). 이러한 현상은 김수진 등(2005)의 연구에서도 밝혀진 바 있다. 단 강우 전 T-N농도가 2.68mg/L, 2.54mg/L로 관측기간 중 가장 높은 농도를 나타내고 있으며, 이는 하류부 St. K2 지점의 관측값과 비슷한 것으로 현재로서는 그 원인에 관하여 논의할 구체적인 자료는 없다. 한편 St. K2지점의 T-N과 NO_3^- -N농도 변화는 강우 초기에 큰 변화를 보이는데 반하여 증수시 오히려 농도가 저하되는 경향을 나타낸다. 강우초기 flushing에 의한 높은 농도변화는 하천 주변의 논과 시가지로부터 유입된 오염물질에 기인한 것으로 간주되며, 유출 기여역이 유역 전체로 확대되면서 농도 저하가 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 9는 강우유출수의 T-P와 PO_4 -P의 농도변화이다. 강우초기에는 강우강도에 관계없이 입자형태의

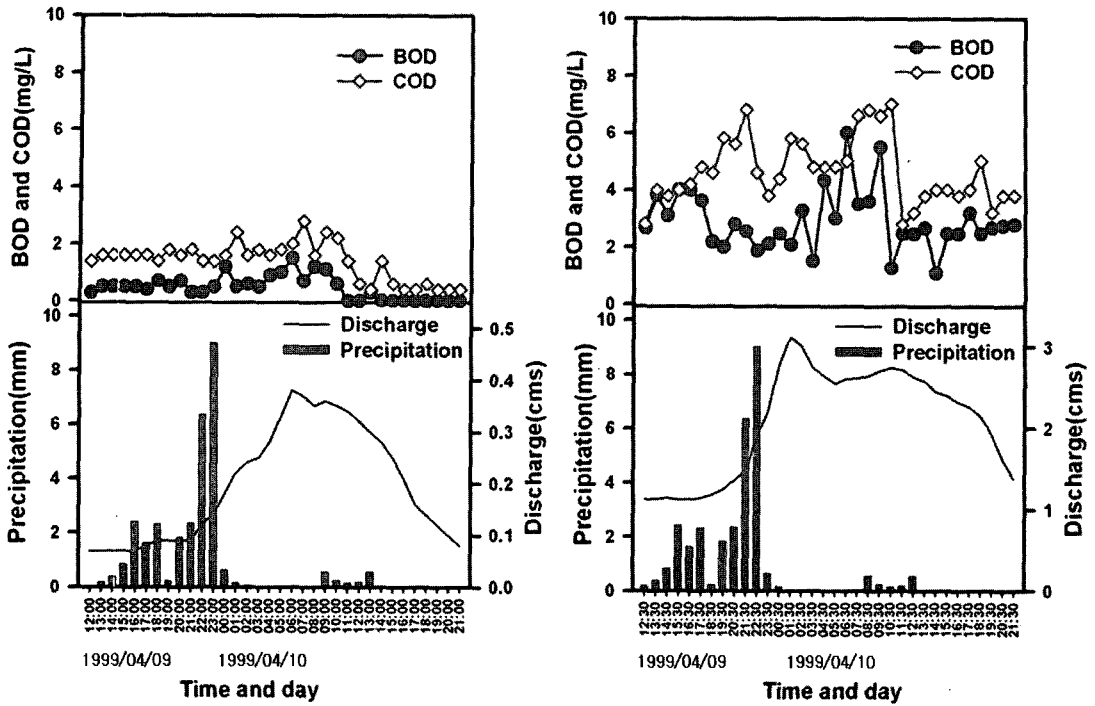


Fig. 7 Change in stream discharge, biochemical oxygen demand(BOD) and chemical oxygen demand(COD) concentration at upstream(St. K1) and downstream(St. K2) of Kokseong River, Apr. 9-10, 1999.

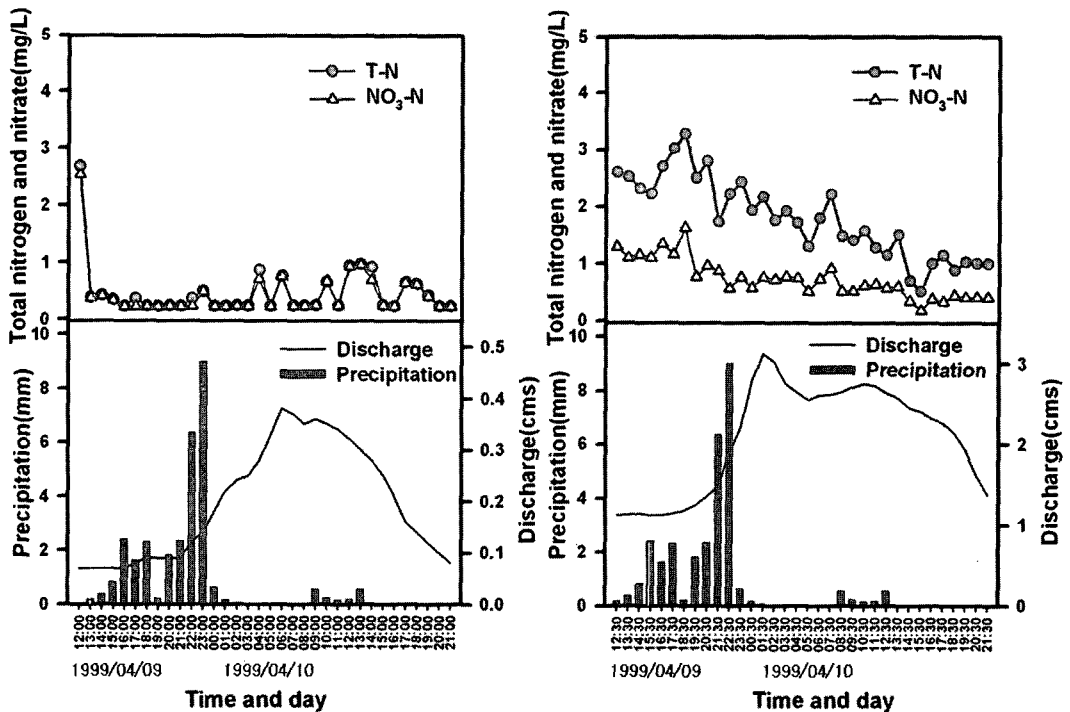


Fig. 8 Change in stream discharge, total nitrogen(T-N), nitrate and nitrate(NO₃-N) concentration at upstream(St. K1) and downstream(St. K2) of Kokseong River, Apr. 9-10, 1999.

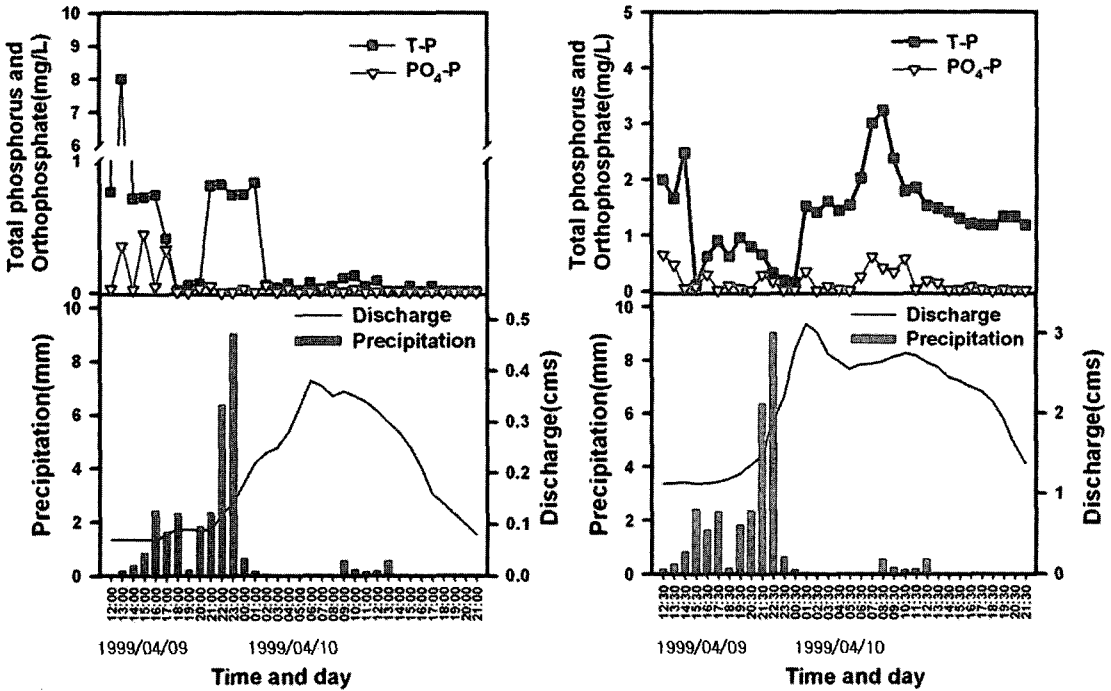


Fig. 9 Change in stream discharge, total phosphorus and orthophosphates concentration at upstream(St. K1) and downstream(St. K2) of Kokseong River, Apr. 9-10, 1999.

T-P의 물질은 영향을 크게 받고 있으며(오영택 등, 2004), 이러한 현상은 St. K2보다 K1에서 더 크게 나타났다. T-P와 $PO_4\text{-P}$ 농도 차이는 K1보다 K2에서 크고 증수기에 그 차이는 더 크게 나타나고 있어 인위적인 영향에 기인한 오염물질의 유입을 반영한 것으로 간주된다(이진희 등, 1998)⁹⁾. 이호준 등(1999)에 의하면 T-P와 $PO_4\text{-P}$ 는 산림면적 비율과 상관성은 크지 않으나 경지면적과는 유의한 관계를 갖는다.

5. 고찰

일반적으로 하천 유량변화는 강우에 대한 유역의 반응 결과이며, 강우에 대한 수질응답은 수질 항목에 따라 강우 후 농도변화 양상이 서로 다르게 나타난다. 특히 비점오염원의 유출특성은 강우강도, 선행강우 효과, 강우 지속시간, 유출량, 유출률 등과 같은 다양한

인자들의 상호관계를 받는다(김전하 등, 2003; 오영택 등, 2004; Myers *et al.*, 1985).

Fig. 10은 강우시 오염물질의 유출특성을 파악하기 위하여 강우기간 중의 관측 유량 $Q(t)$ 에 대한 누적유량 $\sum Q(t)$ 의 비 $Q(t)/\sum Q(t)$ 와 관측 오염부하량 $L(t)$ 에 대한 누적오염부하량 $\sum L(t)$ 의 비 $L(t)/\sum L(t)$ 의 상호관계를 분석한 것이며, 그 결과는 Table 2와 같다. 각 지점별 유량과 오염부하량 간의 결정계수는 각각 0.76~0.98, 0.78~0.98로 매우 상관이 큰 것으로 나타났다. 장성호·박진식(2005)에 의하면 회귀식의 기울기가 1보다 크면 초기 유출현상이 강한 것이며, 1보다 적은 경우는 그 반대를 의미한 것으로 보고하고 있다. St. K1에서는 SS, BOD, COD, T-P가 1보다 큰 기울기를, St. K2에서는 BOD, COD, T-N이 1보다 큰 기울기를 나타내 초기에 오염물이 유출되는 경향이 보였다. St. K1의 T-N, St. K2의 SS, T-P는 선행강우 효과가 비교적 오랜 시간동안 지속되고 있으며 그 결과 2차

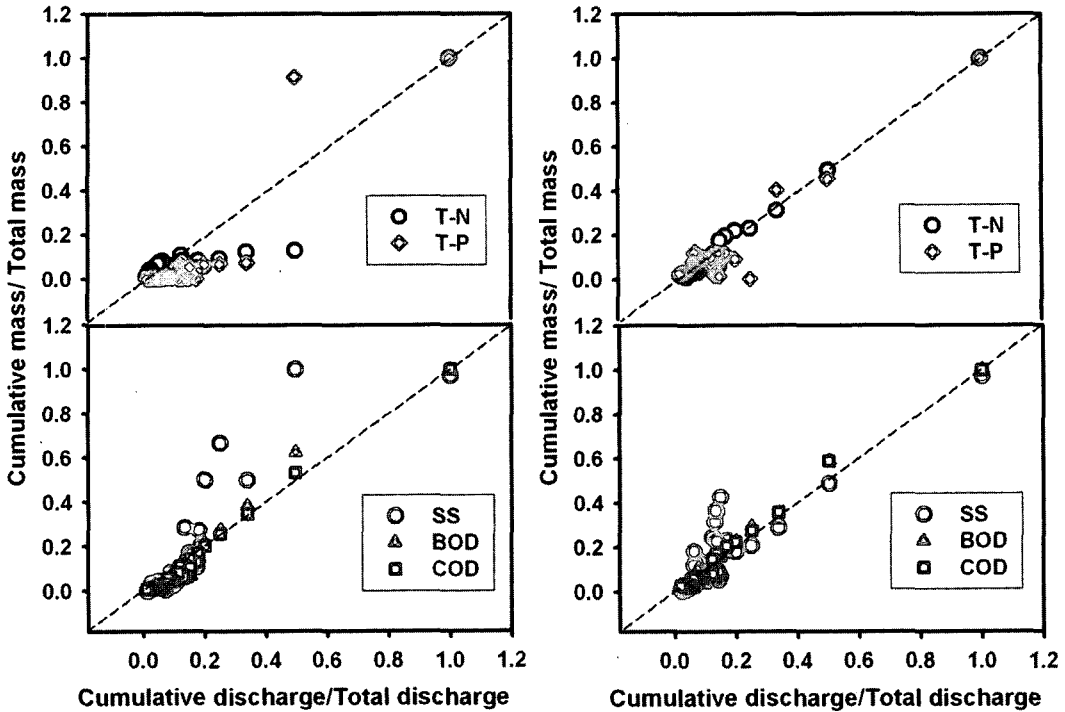


Fig. 10 Cumulative non-point pollutants with cumulative discharge at K1 and K2

이벤트시 오염부하량 변화가 크게 일어나 1에 근접한 값을 나타낸 것으로 판단된다. 이처럼 비점오염원에 의한 오염물질의 발생은 강우강도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나(오영택 등, 2004), 각 수질항목 그리고 유역의 특성에 따라 다소 영향을 받고 있어 용존형태로 유입되는 유기물(COD, T-N)들의 뚜렷한 증가는 관측되지 않았다.

비점원 오염물질의 유출특성 중의 하나는 초기 강우시 오염물질의 유출이며, 오염물질의 유하거리 및 속도에 따라 오염물질의 농도변화가 일어나고(장성호·박진식, 2005), 강우 유출수의 수질변동은 입자성 물질에 기인한 것으로 이들 입자성 물질의 대부분은 비점오염원에서 유입된 것으로 알려져 있다(Ichiki and Yamada, 1999; Pegram *et al.*, 1999). 한편 國松孝男·村岡浩爾(1990)와 Muraoka and Hirata(1988)에 의하면, 비 강우시 계류수의 대부분은 지하수 용출수에 의해 유지되므로 안정적인 수질농도를 나타내지만, 강우시에는 중간유출과 지표면 유출이 발생되기 때문

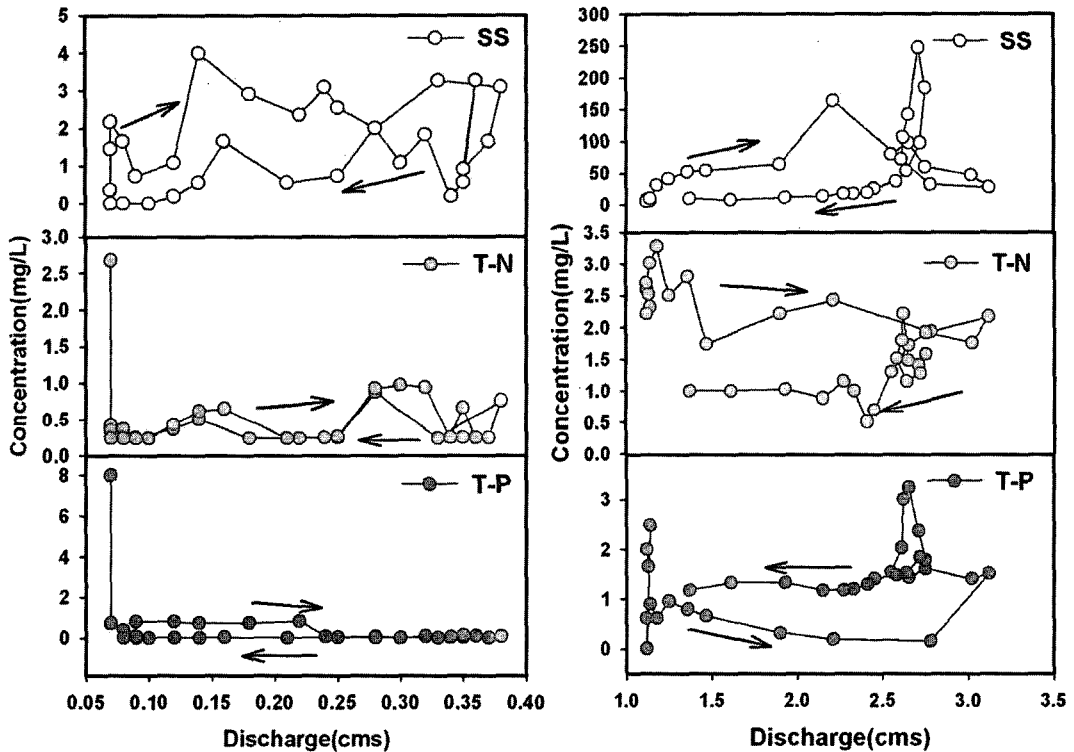
에 유량뿐만 아니라 수질 또한 변화한다고 간주하고 수질응답 특성을 강우 후 수질변화 양상에 따라 강우 전 수질농도를 회복하는 유형(Type 1)과 강우 후 강우 전보다 농도가 증가하는 유형(Type 2)으로 구분하여 설명을 하고 있다.

본 연구에서도 강우 유출수의 수질변화 양상은 유역의 지형·지질적 요인과 토지이용 그리고 물순환 기구의 유출특성에 의해서 좌우된다고 간주하고 유출성분의 구분과 오염물질의 이력효과 그리고 평균농도(EMS)를 산정하여 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 평가하였다.

Fig. 11은 비점오염물질의 이력을 나타낸 그래프이다. 먼저 수질농도의 변화 특성을 보면, SS의 경우 St. K1과 K2지점에서 모두 Type 1유형을 보여 동일한 유출경로 및 기구에 의한 것으로 간주된다. T-N과 T-P의 경우 St. K1에서 Type 1유형에 근접한 경향을 보이고 있는 반면 St. K2에서는 다른 경향을 보이고 있어 오염물질의 기여요소가 서로 다른 것으로 판단된다.

Table 2. Relationship between the discharge and loading

| St. | SS | BOD | COD | T-N | T-P |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| K1 | $y=1.2623x-0.0152$ | $y=1.1032x-0.0369$ | $y=1.0521x-0.0368$ | $y=0.8297x-0.0427$ | $y=1.1288x-0.0938$ |
| | $R^2=0.76$ | $R^2=0.96$ | $R^2=0.98$ | $R^2=0.80$ | $R^2=0.79$ |
| K2 | $y=0.956x+0.0345$ | $y=1.046x-0.0235$ | $y=1.0523x-0.0136$ | $y=1.0288x-0.0306$ | $y=0.9561x-0.0199$ |
| | $R^2=0.78$ | $R^2=0.96$ | $R^2=0.97$ | $R^2=0.98$ | $R^2=0.89$ |



(a) St. K1
(b) St. K2
Fig. 11 Hysteresis of SS, T-N and T-P concentration at K1 and K2

특히 T-P의 경우 반시계 방향의 이력을 나타내고 있으며, St. K2에서의 SS, T-N, T-P는 침투 유량의 도달 영향보다도 2차 이벤트에 매우 민감하게 반응하고 있다. 이는 St. K2 상류부에 존재하는 농업용 수중보 내부에 침전된 오염물질의 용출 또는 교란 등에 의한 영향이 개입했을 것으로 생각하나 이에 대한 구체적인 자료는 현재 없다.

강우 사상에 대한 평균농도 또는 유량증가 중 평균 농도는 강우 유출수와 함께 유출되는 오염물질을 평가

하는데 가장 적절한 인자로 인식되고 있으며 널리 이용되고 있다(김건하 등, 2003; EPA, 1983; Novotny *et al.*, 1993). 강우사상에 따라서 관측되는 유량자료와 이에 해당하는 수질자료를 이용한 EMS농도는 아래와 같은 총 유출량 중 총 오염물질 중량에 대한 총 유출량의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$EMC = \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q}$$

Table 3. Estimation of EMC(Event Mean Concentration) Loads from K1 and K2.

| St. | SS (mg/L) | BOD (mg/L) | COD (mg/L) | NO ₃ -N (mg/L) | T-P (mg/L) | T-N (mg/L) | PO ₄ -P (mg/L) |
|-----|--------------|---------------|---------------|------------------------------|---------------|---------------|------------------------------|
| K1 | 1.67 | 0.55 | 1.50 | 0.45 | 0.48 | 0.03 | 0.35 |
| K2 | 63.51 | 2.88 | 4.76 | 1.33 | 1.67 | 0.18 | 110.08 |

여기서 Q_i 는 관측시간 i 에 대한 유출량(m^3/sec 혹은 m^3/hr), C_i 는 오염물질 농도(mg/L), EMC는 강우사상에 대한 평균농도(mg/L)이다. 이는 강우 사상별 발생되는 총 강우 유출수내 오염물질농도를 발생빈도의 개념을 도입한 것으로 서로 다른 유역의 강우 유출수의 수질을 직접 상호비교 평가할 수 있다는 장점이 있다. 김건하 등(2003)은 4개의 농촌유역을 선정하여 각 10개 강우 이벤트에 대한 오염물질에 대한 오염도(pollutograph)를 작성하고 통계적 분석을 통하여 환경인자에 대한 배출 EMS를 추정할 수 있는 예측모형을 작성하였다. 그 결과 T-N과 T-P와 같은 영양염류의 경우 결정계수가 0.8이상의 양호한 예측결과를 얻었다.

조사기간 동안 St. K1과 K2지점의 EMC는 Table 3과 같다. K1지점의 SS와 BOD, COD, NO₃-N, T-N, PO₄-P, T-P의 EMC는 1.67mg/L, 0.55mg/L, 1.50mg/L, 0.45mg/L, 0.48mg/L, 0.03mg/L, 0.35mg/L이었으나, K2지점의 SS와 BOD, COD, NO₃-N, T-N, PO₄-P, T-P의 EMC는 63.51mg/L, 2.88mg/L, 4.76mg/L, 1.33mg/L, 1.67mg/L, 0.18mg/L, 110.08mg/L이었다. COD와 NO₃-N, T-N은 두 지점간 EMC는 약 3배 그리고 BOD는 약 5.2배, PO₄-P는 6배 증가한 것으로 나타났으며, SS는 약 38배, T-P는 무려 315배 증가한 것으로 나타났다. 다시 말해서 봄철 강우시 유출되는 비점오염물질의 경우 계류수에 비해 인위적인 활동이 활발한 하천 하류부에서 SS와 T-P의 배출이 극단적으로 증가하고 있음을 의미한 것으로 이는 본 연구의 귀중한 연구성과로 판단된다.

多田明夫 등(1997)은 강우 유출수의 유출성분을 분리하기 위하여 아래와 같은 관계식을 이용하여 수질을 이용한 수문그래프 분리방법을 제시하였다. 일반적으로 추적자로서 사용되는 용존물질은 Mg, Na, Ca, Cl,

HCO₃ 등과 같은 이온성분 혹은 ²H, ³H, ¹⁸O 등과 같은 환경동위원소를 이용하고 있으나 EC도 각종 이온성분과 같은 변화를 나타내고 측정이 용이하다는 이점이 있어 흔히 사용되는 방법 중의 하나이다. 본고에서는 상기 점을 고려하여 EC농도에 의한 유출성분 분리를 실시하였다.

$$Q_t = Q_g + g_d$$

$$C_t \cdot Q_t = C_g \cdot Q_g + C_d \cdot Q_d$$

여기서 Q 는 유량, C 는 EC의 농도, t, d, g 는 각각 총 유출량, 직접 유출량, 지하수 유출량이다. 상기의 두 식으로부터 지하수 유출량(Q_g)은

$$Q_g = \left(\frac{C_t - C_d}{C_g - C_d} \right) Q_t$$

가 된다. 그리고 Q_t 와 C_t 는 홍수시 연속 측정값이며 C_g 는 지하수 혹은 홍수 이전의 하천 값을, C_d 는 빗물 혹은 지표수의 값을 사용하는 것이 일반적이므로 본고에서는 강우 이전의 St. K1지점의 EC 농도를 곡성천 유역의 평균적 지하수 EC농도라 가정하였으며, C_g 와 C_d 는 홍수 중 일정하다고 간주하였다.

유출성분 계산결과는 Fig. 12, Fig. 13과 같다. 먼저 St. K1지점의 유출성분 중 지중수의 유출은 전 유출량의 95.3%를 차지하고 있어 직접유출의 비율은 극히 미비한 것으로 나타났다. 그리고 St. K2지점의 총 유출량의 약 71%가 지중수 성분이 차지하고 있으며 약 29%가 지표유출에 기인한 것으로 산출되었다. 따라서 산지 계류수의 비점오염원에 의한 오염물질의 유출에 비해 작계는 3배에서 많게는 315배 EMC의 증가를 초래한 것은 전 유출량의 약 29%를 차지하는 지표유출에 기인한 것으로 볼 때 강우초기에 발생하는 지표 유출

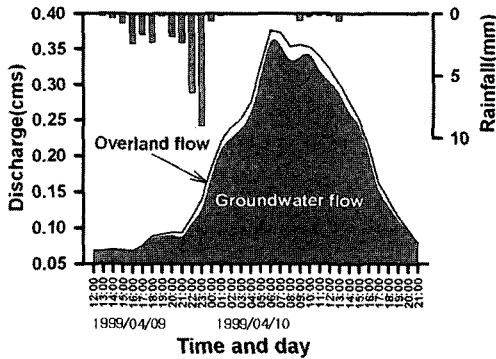


Fig. 12 Separation of discharge components at St. K1 by temporal variation of EC concentration, Apr. 9-10, 1999.

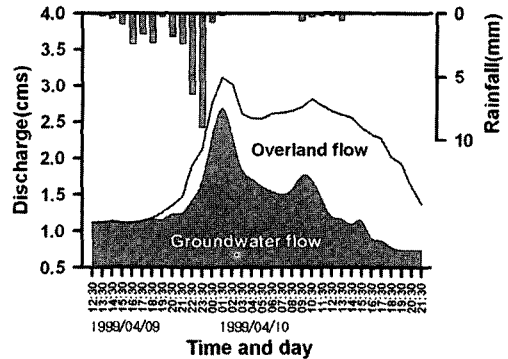


Fig. 13 Separation of discharge components at St. K2 by temporal variation of EC concentration, Apr. 9-10, 1999.

수에 대한 적절한 대책없이 공공수역의 획기적인 수질개선은 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 그리고 강우시 계류부에서 발생하는 비점오염물질의 부하량은 크게 염려할 필요가 없다고 말할 수 있겠으나 그 하류부에 폐쇄수역인 호소나 저수지 등이 위치해 있을 경우 장기적으로 영양염류가 집적되어 내부 재생산에 의한 부영양화를 초래할 가능성 또한 배제할 수 없다고 본다(양해근·최희철, 2003).

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 전라남도 곡성군 곡성천을 대상으로 강우시 발생하는 비점오염물질에 대한 기여도를 파악하기 위하여 인위적인 영향이 전혀 미치지 않는 자연 계류부와 인간활동의 영향을 직접 받고 있는 하류부에서 강우-유출 특성을 분석하였다. 곡성천 유역은 지질 및 식생분포가 비교적 균일하여 계류부와 하류부 간의 인위적 영향에 의한 오염기여도를 비교·분석하기에 좋은 장소로 판단되며, 그 수단으로 수질의 EMS를 이용하여 항목별 유역의 기여도를 살펴보았으며 오염물질의 이력효과에 의한 오염물질의 기원과 수문곡선의 분류에 의한 유출성분비의 특성을 파악함으로써 호우시 수질관리의 제언이 가능할 것으로 판단된다. 곡성천 유역에 대한 단일 강우사상(1999.04.09-10)에 대한

비점오염물질의 유출특성에 대한 조사결과는 다음과 같다.

- ① 곡성천 유역은 2차 산업 기반이 전무한 전형적인 농촌지역으로서 전체 면적의 약 71.86%가 산지를 이루고 있으며, 경지가 20.84%, 거주지역이 약 4.4%, 도로가 1.92%, 하천부지가 0.71%, 저수지가 약 0.28%를 차지하고 있어 곡성천 수질형성에 영향을 미치는 주요 요인은 농경지 그리고 주거지 등에서 유출되는 비점오염원에 기인할 것으로 생각된다.
- ② 강우초기에 계류수의 대부분이 선상지 상류부에서 복류하였으나 하류부에 위치한 시가지로부터 직접 유출성분이 빠르게 개입하는 한편 강수기 눈으로부터 월류하여 강우에 대한 하천유량의 반응은 상류 계류부보다 신속하게 반응하였다.
- ③ 비점오염원에 의한 오염물질의 발생은 강우강도가 증가함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나 계류부에서는 SS, BOD, COD, T-P가 하류부에서는 BOD, COD, T-N이 초기 강우의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.
- ④ 하류부의 EMC는 계류부에 비해 약 3~315배 증가하고 있었으며, 특히 SS와 T-P의 배출이 극단적으로 증가하였다.
- ⑤ 계류부의 강우 유출수 중 지표 유출수가 4.7%에 지나지 않는 반면에 하류부의 지표 유출수는

29%를 차지하고 있어 EMC증가의 중요한 요인으로 작용하고 있다.

상기의 내용으로부터 토지이용 형태에 따라 강우시 유출수의 증감의 변화에 따른 수질변화가 복잡하게 나타나고 있었으며, 비점오염원 관리에 있어서 무엇보다도 중요한 것은 초기 유출수의 저감방안의 해결이 가장 중요하다고 판단된다. 이를 위해서는 유역의 건전한 물순환 체계를 유지 혹은 복원할 수 있도록 지하수와 하천수의 상호교류를 포함한 수문환경 기초조사가 전제가 되어야 하며, 유역의 토지이용 특성 및 강우사상에 따라 강우 유출형태가 달라지므로 비점오염원에 대한 체계적이고 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

註

- 1) 환경부 환경지리정보; <http://egis.me.go.kr/egis/>
- 2) 국가지리정보 유통망; <http://www.ngic.go.kr/index.jsp>
- 3) 곡성하수처리장과 위생처리장은 각각 2000년에 착공하여 2003년에 완공하였다. 따라서 조사 당시 곡성천 유역의 모든 생활오폐수와 분뇨는 조사지역에 방류되었을 것으로 간주된다.
- 4) 기상청 남원지점의 4월 강수의 월 평년값이다 (http://www.kma.go.kr/kor/weather/climate/climate_06_02.jsp?a=3&pop=nor-pre.html).
- 5) 간이우량계설치에 관한 내용은 박종관(역), 1997, 물환경조사법, 청문각(新井正, 1995, 水環境調査の基礎, 古今書院), p.34-36을 참조.
- 6) 일반적으로 가정하수나 공장폐수가 유입될 경우 T-P는 PO₄의 8~10배의 값을 나타낸다.

참고문헌

김건하 · 김영철 · 이동률 · 정하영 · 여중현, 2003, “우리나라 농지-임야유역으로부터의 강우유출 EMS부하 및 추정,” 대한환경공학회지, 25(6), 760-770.

김성수 · 김종석 · 방기연 · 권은미 · 정옥진, 2002, “경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사,” 대한환경공학회지, 24(11), 2019-2027

김수진 · 정용호 · 김경하 · 유재윤 · 정창기 · 전재홍, 2005,

“산림유역내 강우 발생시 계류수질변화와 지중유출수의 기여도,” 한국농림기상학회지, 7(1), 51-56.

노기안 · 김민경 · 이병모 · 이남중 · 서명철 · 고문환, 2005, “벼농사에서 질소유출이 수질에 미치는 영향평가,” 한국환경농학회지, 24(3), 270-279.

박종관, 1994, “SRC Method에 의한 산지 소유역의 부유토사 유출량 산정,” 한국지형학회지, 1, 17-31.

박종관(역), 1997, 물환경조사법, 청문각(新井正, 1995, 水環境調査の基礎, 古今書院).

성운용, 2004, “곡성군 입면지역에 발달한 산록면의 지형형성과정,” 한국지형학회지, 11(4), 21-33.

신영규, 2004, “대관령 지역의 산림 소유역과 농경지 소유역의 수질 비교,” 대한지리학회지, 39(4), 544-561.

신은성 · 최지용 · 이동훈, 2001, “농업지역의 비점오염물질 유출특성에 관한 연구 -강원도 춘천을 중심으로-,” 한국물환경학회지, 17(3), 299-311.

양해근 · 최희철, 2003, “영산강과 섬진강 유역의 하천 수질환경 평가,” 대한지리학회지, 38(1), 16-31.

오영택 · 박제철 · 김동섭 · 류재근, 2004, “강우시 소옥천의 비점오염원 유출 특성,” 한국수질보전학회지, 20(6), 657-663.

우보명, 1993, “산림환경이 수자원 함양에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국임학회지, 82(3), 283-291.

윤순옥 · 사이토코지 · 황상일 · 다나카유키야 · 오구치다카시, 2005, “한국 선상지의 이론적 고찰과 분포특성,” 대한지리학회지, 40(3), 335-352.

오종민 · 신동엽, 1999, “산림유역에서 유출되는 계류수질 특성,” 한국수처리기술연구회, 7(1), 45-53.

이수길, 1991, 농촌지역에서의 비점원 오염물질이 하천수질에 미치는 영향에 관한 연구 -수영강을 대상으로-, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.

이진희 · 이행렬 · 이재근 · 이동근 · 김훈희, 1998, “하천에 있어서 자연성의 보전, 정비, 창출에 관한 연구(1) -농촌지역에서의 토지이용과 하천수질과의 상관성-,” 한국환경복원녹화기술학회, 1(1), 84-94.

이호준 · 방제용 · 김용욱, 1999, “토지이용이 이원천 유역의 하천수질에 미치는 영향,” 한국생태학회지, 22(5), 235-240.

이현호, 1997, “산지 물순환 소과정에 있어서 수질변화의 추적분석에 의한 산림의 환경적 정화기능의 계량화 연구,” 한국임학회지, 86(1), 56-68.

장성호 · 박진식, 2005, “남천에서의 강우시 비점오염물질

- 의 유출특성,” 한국환경보건학회지, 31(1), 1-6.
- 장재훈, 1998, “곡성지역의 산록침식면과 선상지에 관한 연구,” 지리학연구, 32(1), 19-34.
- 최지용 · 신은성 · 이동훈, 1999, “서울 도시지역의 비점오염원 유출특성에 관한 연구,” 한국물환경학회지, 15(3), 315-323.
- 한국동력자원연구소(한국지질자원연구소), 1984, 구례도폭 지질보고서.
- 홍성구 · 권순국, 2001, “농촌유역특성과 하천수질관계,” 한국농공학회지, 43(3), 56-65.
- 환경부, 2000, 제2차 전국자연환경기초조사: 화순곡성(8-11)의 자연환경생태조사보고서.
- 國松孝男 · 村岡浩爾, 1990, 河川汚濁のモデル解析, 技報堂.
- 多田明夫 · 堀野治彦 · 丸山利輪 · 田中丸治哉 · 火田武志, 1997, “水質により分離した流出成分と長短期流出兩用モデルによる流出成分の比較,” 水文 · 水資源學會誌, 10(2), 133-143.
- 半谷高久 · 小倉紀雄, 1985, 水質調査法, 丸善.
- 植田芳明, 1985, “水質を用いた流出分析の展望,” 立正大學大學院年報, 2, 61-71.
- 新井正 · 西澤利營, 1974, 水溫論, 共立出版.
- 木平英一 · 窪田順平 · 塚本良則, 1997, “降雨に伴う谷部飽和帶の擴大と溪流水のNO₃⁻-N 濃度の變動,” 水文 · 水資源學會誌, 10(2), 154-160.
- 平田健正 · 村岡浩爾, 1988, “山林域における物質循環特性の溪流水質に及ぼす影響,” 土木學會誌論文, 399(II-10), 131-140.
- APHA-AWWA-WEF, 1998, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Amer. Pub. Health Asso.,
- Chow, V. T., R. Eliassen and R. K. Linsley, 1981, *Models for water quality management*, McGraw-Hill, New York.
- Gregory, K. J. and D. E. Walling, 1987, *Human activity and environmental process*, John Wiley & Sons, New York.
- Hall, M. J., 1984, *Urban hydrology*, Elsevier Applied Science Publisher, London.
- Hobara, H., N. Tokuchi, N. Ohte, K. Koba, M. Katsuyama, S. J. Kim and A. Nakanishi, 2001, Mechanism of nitrate loss from a forested catchment following a small-scale natural disturbance, *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 1326-1335.
- Hong, S. G. and S. K. Kwun, 2001, Identification of Critical Areas on Water Quality in a Rural Watershed, *The Korean Society of Agricultural Engineers*, 43(5), 145-152.
- Ichiki, A. and K. Yamada, 1999, Study on characteristics of pollutant runoff into lake Biwa Japan, *Water Science and Technology*, 39(12), 17-25.
- Kebew, A. E., 2001, *Applied chemical hydrogeology*, Prentice-Hall, New York.
- Kunze M. D. and J. D. Stednick, 2006, Streamflow and suspended sediment yield following the 2000 Bobcat fire, Colorado, *Hydrological Processes*, 20, 1661-1681.
- Myers, C. F., J. Meek, J. Tuller and A. Weinberg, 1985, Nonpoint sources of water pollution, *Journal of Soil Water Conser.*, 40(1), 14-18.
- Muraoka, K. and T. Hirata, 1988, Streamwater chemistry during rainfall events in a forested basin, *Journal of Hydrology*, 102, 235-253.
- Ojo, O., 1990, The Example of Lagos, Nigeria in hydrological process and water management in urban areas, in Herbert, M. and John, P., (ed.), *Recent Trends in Precipitation and the Water Balance of Tropical Cities*, IAHS, 33-41.
- Park, J. K., 1992, Suspended sediment transport in a mountainous catchment, *Science Reports of the Geoscience, Univ. Tsukuba*, Section A-12, 137-197.
- Pegram, G. C., G. Quibell and M. Hinsch, 1999, The nonpoint source impacts of peri-urban settlements in South Africa: implications for their management, *Water Science and Technology*, 39(12), 283-290.
- Quilbe, R., A. N. Rousseau, M. Duchemin, A. Poulin, G. Gangbazo and J. P. Villeneuve, 2006, Selecting a calculation method to estimate sediment and nutrient loads in streams: Application to the Beaurivage River(Quebec, Canada), *Journal of Hydrology*, 305, 1-16.

양해근

Tokuchi, N., H. Tanaka and G. Iwatsubo, 1993, Vertical changes in soil solution chemistry in soil profiles under coniferous forest, *Geoderma*, 59, 1-17.

U. S. EPA., 1983, *Results of the nationwide urban runoff program*, Vol.1 Final Report, Water Division, U. S. EPA.

교신 : 양해근, 143-701, 서울 광진구 화양동 1, 건국대학교 이과대학 지리학과(이메일 : hydroyang@ho-

tmail.com, 전화 : 02-450-3434)

Correspondence : Heakun Yang, Dept.of Geography, Science College, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-Gu, Seoul 143-701 Korea(email : hydroyang@hotmail.com, phone : +82-2-450-3434)

최초투고일 06. 7. 7.

최종접수일 06. 9. 18.