

연구논문

부영양상태 호수유역의 강우유출수에 의한 초기세척효과 분석

조재현 · 서형준

관동대학교 보건환경위생학과

(2007년 7월 20일 접수, 2007년 10월 3일 승인)

An Analysis on the First Flush Phenomenon by Stormwater Runoff in Eutrophic Lake Watershed

Cho, Jae-Heon · Seo, Hyung-Jun

Department of Health and Environmental Hygiene, Kwandong University

(Manuscript received 20 July 2007; accepted 3 October 2007)

Abstract

Lake Youngrang is a lagoon whose effluent flows into the East Sea. Because two resort towns and two golf courses are situated at the lake basin, many tourists visit this area. Stormwater runoff surveys were carried out for the eight storm events from 2004 to 2005 in the eutrophic lake watershed to give a basic data for the diffuse pollution control of the lake. Dimensionless mass-volume curves indicating the distribution of pollutant mass vs. volume were used to analyze the first flush phenomenon. The mass-volume curves were fitted with a power function and polynomial equation curves. The regression analysis showed that the polynomial equation curves were better than the power function in representing the tendency of the first flush, and second degree polynomial equation curves indicated the strength of the first flush effectively.

Key words : Stormwater runoff, eutrophic lake watershed, first flush, power function, polynomial equation curves, regression analysis

1. 서론

1. 연구의 배경과 목적

본 연구의 대상지역인 영랑호지역은 2001년에 하수처리장이 건설되기 전까지는 호수 주변 주거지역의 생활하수가 처리되지 않고 호수로 흘러들어 호수

의 수질이 악화되었고, 수온이 높은 시점에는 조류의 성장이 활발하여 부영양화현상이 극심하게 나타났다. 처리장 완공이후에는 생활하수의 유입이 차단되어 호수수질이 상당히 호전되었다. 지자체에서는 호안에 산책로와 휴식공간을 조성하여 아름다운 호수경관과 어우러진 시민을 위한 훌륭한 위락공간으

로 거듭나고 있다. 그러나 영랑호는 여전히 부영양 상태에 있고, 현재는 호수의 가장 큰 유입수인 장천과 주거지역의 강우유출수가 영랑호의 주된 오염원이 되고 있다. 장천상류에는 대규모의 콘도미니엄을 비롯한 리조트시설과 골프장이 들어서 있다.

따라서 이 호수의 수질관리를 위해서는 비점오염부하의 관리가 필요하다. 정부에서도 수자원의 수질관리를 위한 비점오염원 관리사업에 관심을 가지고 있기 때문에 지자체에서는 영랑호에 유입되는 강우유출 오염부하량 중 가장 큰 비중을 차지하는 장천 하류에 저류형 비점오염원관리 시설을 설치할 계획을 갖고 있다. 저류형 비점오염원 관리시설의 경우에 전체 빗물을 다 저류해서 관리할 수는 없으므로 특히 강우초기의 유출수를 저류시켜서 유출수 내 부유물질과 일부 영양물질을 처리할 목적으로 설치하는 경우가 많다. 저류형 비점오염원 관리시설 설치와 관련한 기초자료를 확보하기 위해서 2004년과 2005년에 걸쳐서 이 지역에 대한 강우유출조사와 초기세척효과(first flush effect) 분석을 하였다.

2. 연구의 범위

영랑호로 유입되는 빗물과 오염부하량의 대부분은 영랑호의 가장 큰 유입 지천인 장천과 영랑호 남쪽 주거지역 주변의 우수관거에서 흘러들고 있다. 장천내 본류와 지류상의 3개 지점과 영랑호 남쪽의 우수관거를 대상으로 2004년에 4회, 2005년에 4회, 도합 8회에 걸쳐서 강우유출조사를 하였다. 이 자료를 토대로 누적유량비-누적오염부하량비 곡선(mass-volume curve)을 작성하고 호수유역 강우유출수의 초기세척효과(김성수 등, 2002; Bertrand-

Krajewski *et al.*, 1998; Novotny, 2003)를 분석하였다. 누적유량비-누적오염부하량비 곡선으로 초기세척효과를 개략적으로 판단할 수 있지만, 보다 정량적으로 초기세척을 평가할 수 있는 수단을 개발하기 위해 멱함수, 2차 및 3차 다항식곡선을 대상으로 누적유량-부하량비 곡선을 회귀분석하였다.

II. 지역개관 및 강우유출조사

영랑호는 동해안의 석호이고, 유역면적이 7.8 km², 수표면적이 1.02 km²이다. 본 연구자가 조사한 2005년의 영랑호 평균수질이 COD 22.4 mg/L, TP 0.047 mg/L, Chl-a 46.1 mg/m³으로 부영양 상태이다. 영랑호의 가장 큰 유입수는 호수 서쪽의 장천이고, 배수면적이 4.7 km²이다. 장천 상류부에는 골프장과 콘도를 포함한 리조트시설이 들어서 있고, 표 1에서 보는 바와 같이 장천배수구역 토지이용의 대부분은 임야와 농경지이고, 일부 지역에 주거지역이 분포하고 있다. 영랑호 남쪽의 우수토구로부터도 강우시 상당량의 배수가 호수로 흘러들고 있다. 이 우수토구의 배수구역내에 골프장의 일부가 들어서 있고, 주거지역도 약 13 %를 차지하고 있다. 영랑호 전체로는 임야가 약 66 %, 주거지역 약 12 %를 차지한다.

2004년과 2005년 2년간에 걸쳐서 장천의 3개 지점과 영랑호 남쪽의 하수관거 1지점에서 8회의 강우사상을 대상으로 강우유출조사를 하였다. 표 2에 각 강우사상의 특성을 요약하였다. 강우유출 조사지점도는 그림 1과 같다. 장천의 조사지점 중 1개소는 장천 중류부에 위치해 있고, 나머지 2개소는 장천의 지류인 독골천과 불미앞골천에 각각 위치하

표 1. 배수구역별 토지이용

| 배수구역 | 토 지 이 용(%) | | | | 배수면적(km ²) | 경사도(%) | 불투수층비(%) |
|-------|------------|----------|-------|------|------------------------|--------|----------|
| | 주거지역 | 리조트와 골프장 | 농 경 지 | 임 야 | | | |
| 장 천 | 3.1 | 12.6 | 16.5 | 67.7 | 4.75 | 19.5 | 8.7 |
| 독 골 천 | 4.0 | 40.8 | 10.7 | 44.5 | 1.05 | 13.5 | 23.1 |
| 불미앞골천 | 1.0 | 8.6 | 9.0 | 81.3 | 0.77 | 23.2 | 9.2 |
| 우수관거 | 13.0 | 24.0 | 2.0 | 61.0 | 0.29 | 12.7 | 13.0 |
| 영랑호전체 | 11.6 | 9.8 | 12.9 | 65.7 | 7.79 | 11.3 | 14.7 |

표 2. 강우사상별 특성

| 강우사상 | Date | 강우량(mm) | 지속시간(hr) | 강우전 건기일수 |
|------|--------------|---------|----------|----------|
| 04-1 | 2004년 6월 19일 | 95.4 | 35.8 | 21.8 |
| 04-2 | 2004년 7월 1일 | 50 | 16.8 | 9.2 |
| 04-3 | 2004년 8월 1일 | 19 | 14.8 | 4.2 |
| 04-4 | 2004년 9월 6일 | 90.5 | 28 | 14.5 |
| 05-1 | 2005년 6월 30일 | 19.6 | 4.5 | 3.2 |
| 05-2 | 2005년 7월 8일 | 46 | 17.8 | 3.2 |
| 05-3 | 2005년 7월 28일 | 29 | 12.5 | 14.7 |
| 05-4 | 2005년 8월 24일 | 96.2 | 28.2 | 2.5 |



그림 1. 영랑호 유역과 강우유출조사 지점

고 있다. 강우초기와 강우강도가 클 때는 15분내지 30분 간격으로 시료를 채취하였고, 그외의 시기에 는 평시유량으로 복귀할 때까지 1시간 내지 2시간 간격으로 시료채취를 하였다. 유량조사는 시료채취 와 병행하여 실시되었다. 채취된 시료로 COD, BOD, TP, TN 그리고 SS를 분석하였다.

III. 누적유량비-누적오염부하량비 곡선과 초기세척효과

1. 관련 선행연구

특정 배수구역에서의 오염부하량 변동은 여러 가지 요인의 지배를 받는데, 그중 중요한 것은 강우량 과 강우강도, 선행건기일수, 배수구역내 오염물질 의 축적량, 배수구역과 하수관거의 특성 등이다. 서 로 다른 강우사상에 대해서 유출량과 오염부하량의 변화를 비교분석하기 위해서 무차원의 누적유량비 와 누적오염부하량비의 곡선을 이용한다. 신창민 등(2004)은 도시지역을 토지이용별로 구분하여 수 질일반항목과 중금속 등을 대상으로 강우유출조사

를 하여 EMC를 산정하고, 토지이용별 비점오염원 원단위를 산정하였다. 매 강우기간 중의 시료채취 횟수가 적어서 신뢰도가 충분하지는 않지만, 누적 유량-부하량비 곡선을 분석하여 SS, BOD, COD, TP의 수질항목에서 초기세척효과가 나타나는 것을 보고하였다. Bedient *et al.*(1978)은 전통적인 도시 지역, 임야지역, 그리고 개발이 진행중인 지역에 대한 강우유출조사를 바탕으로 누적유량-부하량비 곡선을 작성해서 초기세척효과를 분석하였다. SS의 경우에는 3개 지역 모두에서 초기세척효과가 나타 났다. NO₃-N의 경우는 임야지역에서는 초기세척 효과가 나타나지 않았고, 개발지역은 조사지점 직 상류의 골프장의 영향으로 초기세척효과가 확연히 나타났다. Bertrand-Krajewski *et al.*(1998)은 하수관거를 대상으로 한 강우유출조사 결과를 이용 해서 누적유량-부하량비 곡선을 작성하고 초기세 척효과를 분석하였고, 멱함수를 이용해서 누적유 량-부하량비 곡선을 회귀분석하고 초기세척효과 의 강도를 분석하였다. Lee *et al.*(2003)은 도시지역 의 소규모 배수구역을 대상으로 강우유출조사를 하 였고, 멱함수와 3차 다항식을 이용해서 누적유량- 부하량비 곡선을 회귀분석하였다. 회귀분석한 3차 다항식의 상수가 누적유량-부하량비 곡선의 형상 을 잘 반영하는 것으로 분석하였다.

2. 누적유량비-누적오염부하량비 곡선

무차원의 누적유량비는 특정 강우사상의 총유출 량에 대한 누적유출량의 비값이고, 무차원의 누적 오염부하량비는 총오염부하량에 대한 누적오염부하

량의 비로 계산된다. 시간간격이 Δt_i 인 N 개의 유량(Q_i) 및 수질(C_i) 관측치로부터 누적유량비와 누적오염부하량비는 아래 식과 같이 산출된다(Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998).

$$\frac{\sum_{i=1}^j C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i} = f \frac{\sum_{i=1}^j Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i} = f \frac{\sum_{i=1}^j V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (1)$$

여기서 N 은 총관측자료수, V_i 는 Δt_i 시간간격 동안의 유출체적이다. 이와 같은 방법으로 누적유량-부하량비 곡선을 그릴 수 있다.

누적유량-부하량비 곡선은 각 강우사상의 유출특성을 잘 보여주는데, 만약에 전체 강우사상을 통틀어 균일한 유출수질을 보인다면 누적유량-부하량비 곡선은 원점을 지나고 기울기가 1인 직선이 된다(Bedient *et al.*, 1978). 각 강우사상별로 누적유량-부하량비 곡선을 그렸을 때 대부분의 관측치의 점들이 45°의 직선보다 위에 존재하고 또한 이 점들이 45°의 직선과 상당히 떨어져 있다면, 이 경우의 오염부하 유출 특성은 강우초기에 많은 오염부하의 유출이 일어나고 시간이 경과할수록 유출부하량은 점차 감소한다. 이와 같은 형태의 유출패턴을 초기세척효과라고 할 수 있다. 반대로 대부분의 관측치가 45°의 직선 아래에 분포한다면 강우 중기에 많은 오염부하의 유출이 일어났음을 보여준다. 본 연구에서는 영랑호 유역 내 4개 지점의 강우유출조사 결과로 COD, BOD, TP, TN 그리고 SS의 수질 항목에 대한 누적유량-부하량비 곡선을 그리고 이 지역 강우유출의 특성과 초기세척효과를 분석하였다.

3. 회귀분석과 초기세척효과의 강도

누적유량-부하량비 곡선을 이용해서 목적으로 초기세척효과의 크기를 짐작할 수 있으나, 보다 객관적인 방법으로 초기세척효과의 크기를 계량화할 수 있다면 특정지역의 강우유출 특성을 평가하는데 큰 도움이 될 것이다. 본 연구에서는 멱함수와 더불어 2차 다항식과 3차 다항식으로도 회귀분석하여 어떤 방법이 초기세척효과의 강도를 가장 잘 표현

하는지를 분석하였다.

$$F(X) = X^b \quad (2)$$

$$F(X) = cX^2 + dX \quad (3)$$

$$F(X) = eX^3 + fX^2 + gX \quad (4)$$

여기서 X 는 누적유량비, F 는 누적오염부하량비이다.

IV. 결과 및 토의

1. 누적유량비-누적오염부하량비 곡선

2004년과 2005년의 실측자료를 바탕으로 장천의 3개 지점과 영랑호 남쪽의 우수관거를 대상으로 무차원의 누적유량비와 누적오염부하량비를 산출하여 구해진 누적유량-부하량비 곡선은 그림 2~그림 6과 같다.

SS에 대한 누적유량-부하량비 곡선의 경우에 장천본류의 2004년 1차 조사를 제외하고는 모든 조사에서 45°의 이등분선보다 윗부분으로 상당히 이격되어 실측치들이 위치해 있기 때문에 초기세척효과가 두드러지게 나타난다. 그중에서도 특히 독골천과 불미앞골천의 실측치들의 이격 정도가 커서 초기세척효과가 하천본류보다 강하게 나타난다. 2004년 1차 조사결과는 특이한 경우인데, 강우후반에 SS농도가 높았고, 강우중간에 비가 그쳤다가 이어지는 형태가 반복되어 유출의 첨두치가 여러번 생겼기 때문에 누적유량-부하량비 곡선이 45°의 이등분선보다 아래에 실측치들이 분포하고 있다. 장천의 지류인 독골천과 불미앞골천에서의 SS는 장천본류와 우수관거 지점보다 초기세척효과가 더 큰 것으로 나타났다.

우수관거의 BOD와 COD는 초기세척효과가 약하게 나타났고, 독골천의 BOD와 COD에서는 SS보다는 약하지만 초기세척효과가 꽤 큰 것으로 조사되었다. 전반적으로 독골천의 초기세척효과가 불미앞골천보다 더 큰데, 이것은 독골천 상류의 리조트지역에 건기동안에 많은 오염물질이 축적되고, 리조트지역의 불투수층에 축적된 오염물질이 강우초기에 많이 씻겨나가기 때문으로 판단된다.

TN에 관한 조사결과는 특이해서 장천본류와 지

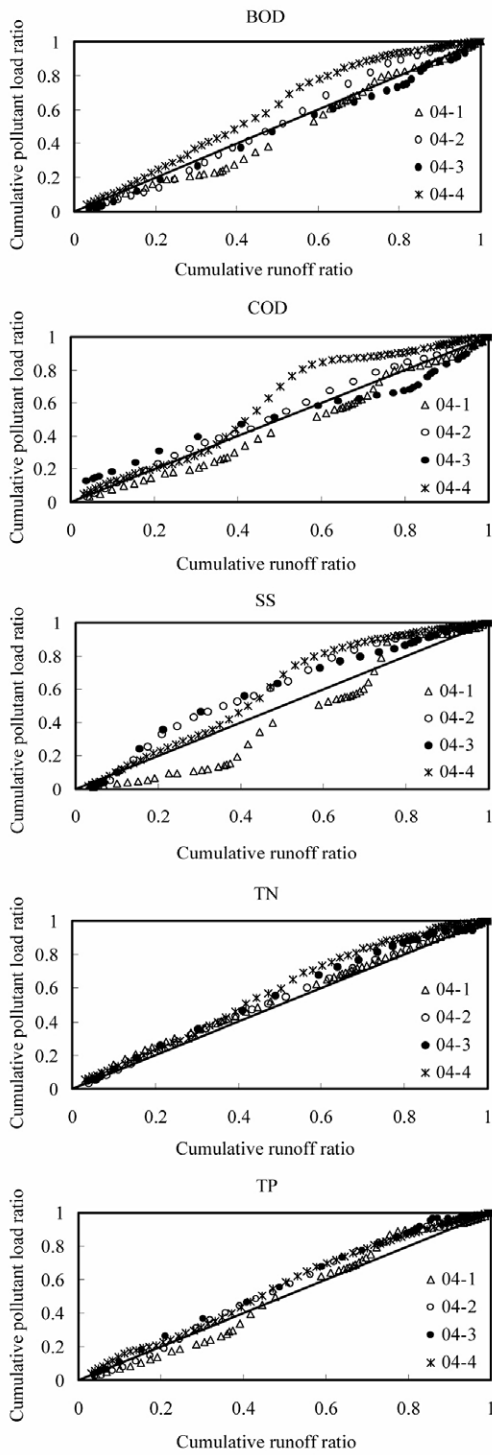


그림 2. 장천분류 지점의 누적유량비-누적오염부하량비 곡선(2004년)

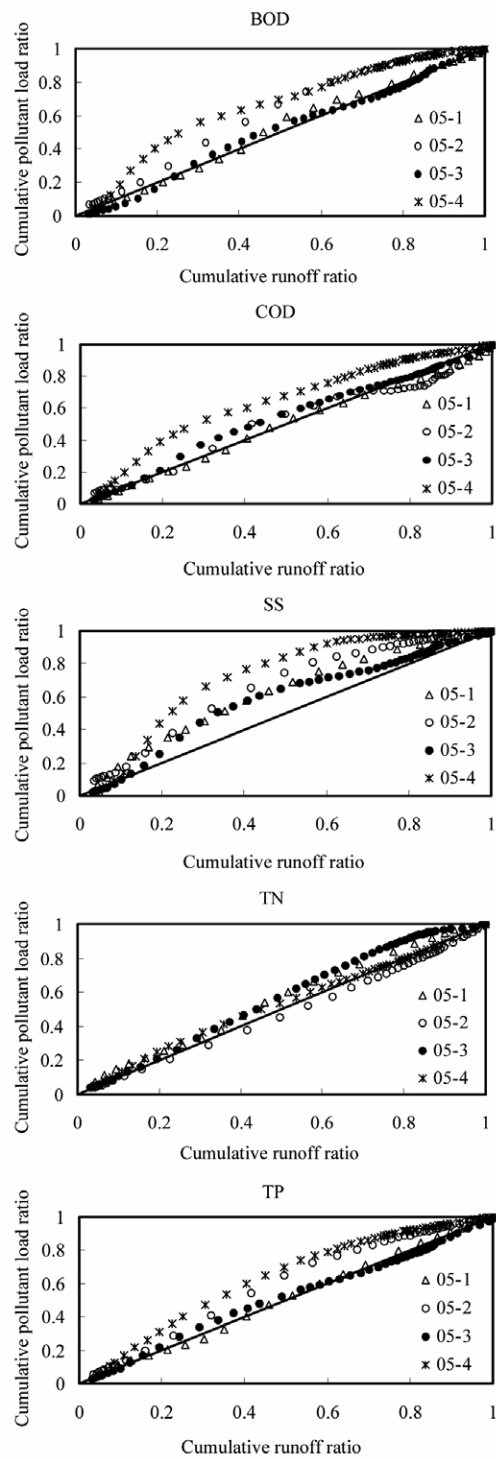


그림 3. 장천분류 지점의 누적유량비-누적오염부하량비 곡선(2005년)

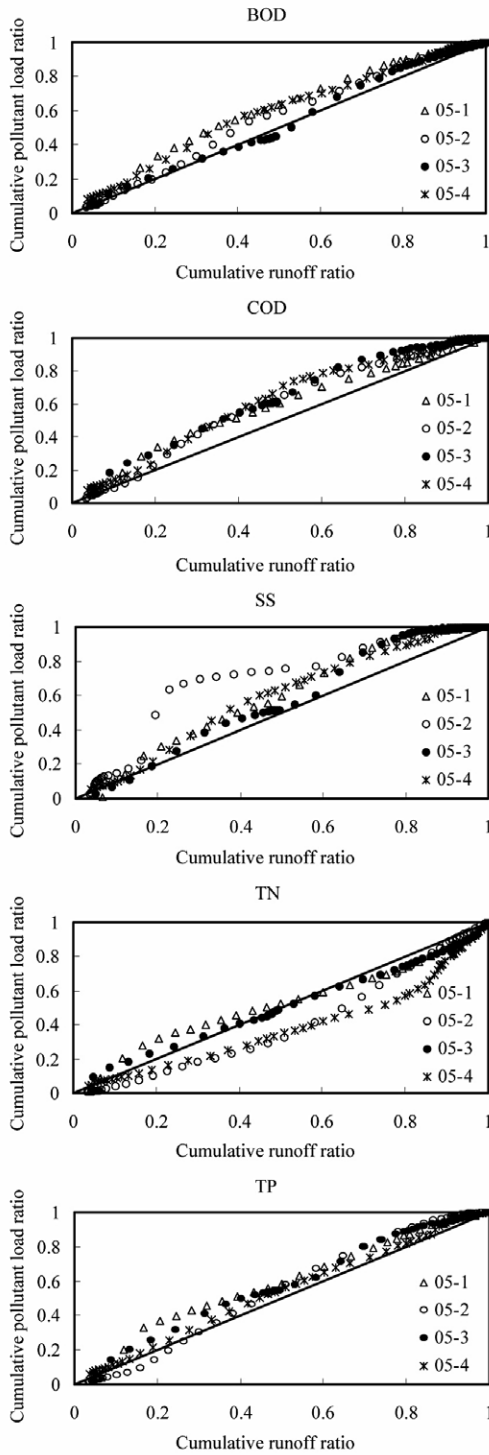


그림 4. 우수관거 지점의 누적유량비-누적오염부하량비 곡선

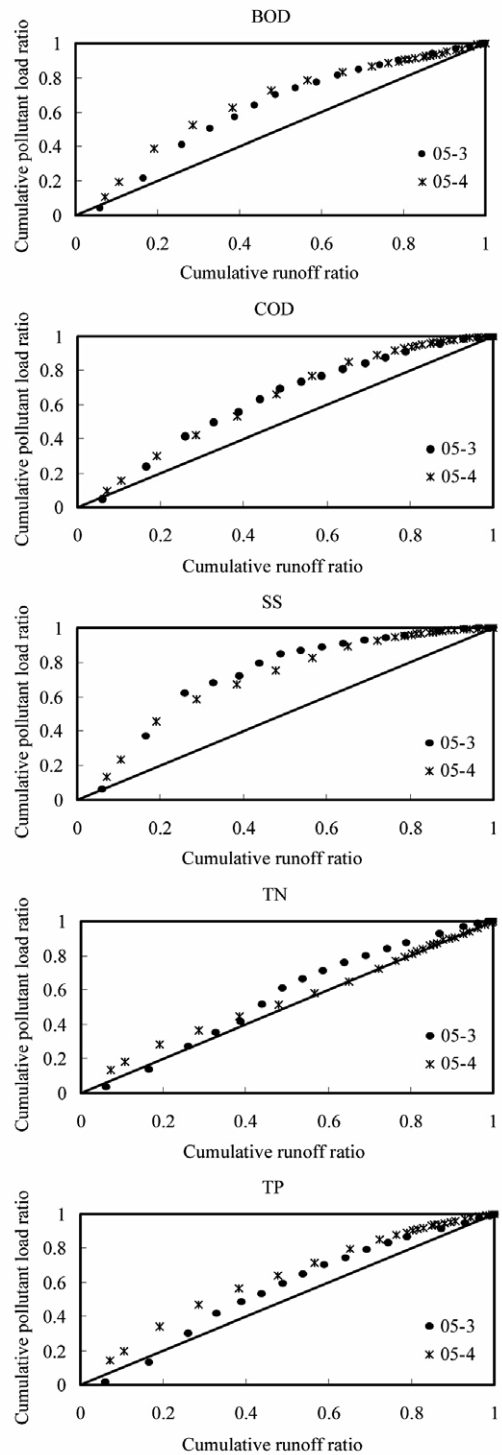


그림 5. 독골천 지점의 누적유량비-누적오염부하량비 곡선

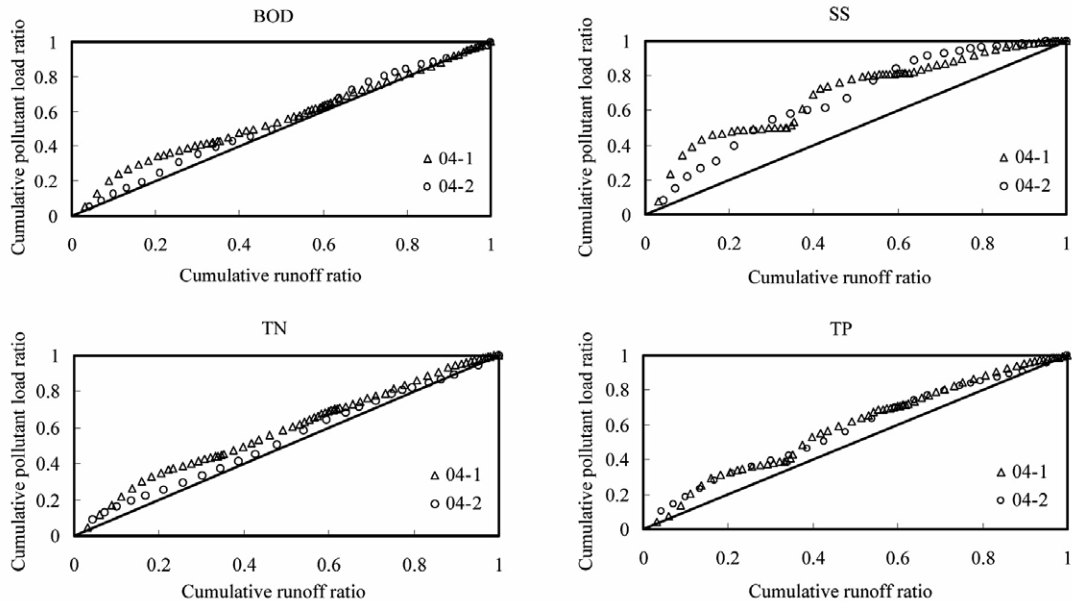


그림 6. 불미앞골천 지점의 누적유량비-누적오염부하량비 곡선

류들에서의 TN의 측정치들이 그림에서 보는 바와 같이 대부분 45°의 이등분선에 근접해 있고, 유출량 증가에 따라 오염부하량이 일정하게 증가하는 특성을 보인다. 우수관거의 TN은 대부분의 실측치가 45°의 이등분선보다 아래에 위치해 있어 강우 후반에 유출되는 오염부하의 비중이 큰 것으로 조사되었다. 이것은 강우시에는 우수유출수의 TN농도가 건기시 우수관거의 TN농도가 낮아서 강우시에는 희석효과가 나타난 때문으로 판단된다.

2. 회귀분석과 초기세척효과의 강도

2004년과 2005년의 강우조사결과로 작성된 누적유량-부하량비 자료를 이용해서 (2)식의 멱함수로 회귀분석한 결과는 표 3에 제시하였다. 멱함수로 회귀분석할 때에 강우시작 직후 아주 초기의 누적유량-부하량비 자료가 상수 b 값에 큰 영향을 주기 때문에 누적유량비 3% 이하의 실측치 자료는 계산에서 제외하였다. 누적유량-부하량비 자료가 45°의 이등분선 위쪽으로 편차가 클수록 초기세척효과가 큰데, 상수 b 값이 작아질수록 초기세척효과가 커지는 것으로 알려져 있다(Bertrand-Krajewski *et al.*, 1998; Lee and Bang, 2000). 상수 b 값이 1보

다 적을 때 초기세척효과를 나타낸다. 그러나 장천 본류의 04-3차의 COD의 경우에는 표 3에서 보는 바와 같이 b 값이 0.71로 계산되어 초기세척효과가 아주 큰 것으로 되어있지만, 실제로는 그림 2의 장천 본류에 대한 누적유량비-누적오염부하량비 곡선에서 보는 바와 같이 초기세척효과가 별로 나타나지 않는다. 이 경우에는 이등분선에서 약간 위로 위치한 누적유량비 40% 이하의 자료들이 b 값 계산에 큰 영향을 미쳤기 때문에 이 b 값으로 초기세척효과를 제대로 판단할 수가 없다. 그림 3에서 보는 바와 같이 05-1차의 TN의 경우에도 대부분의 실측치 자료가 이등분선에 근접해 있어서 초기세척효과가 나타나지 않지만, b 값이 0.84로 계산되어 초기세척효과가 큰 것으로 계산되어서 문제점이 발생한다. 이것은 강우초기의 누적유량비 20% 이하의 일부 자료들이 b 값 계산에 큰 영향을 미치기 때문이다.

누적유량-부하량비 자료를 이용해서 (3)식의 2차 다항식과 (4)식의 3차 다항식으로 회귀분석한 결과의 상수값들은 표 3, 표 4 및 표 5에 제시하였다. 장천본류의 SS의 경우에 2004년과 2005년의 자료를 이용해서 멱함수로 회귀분석하였을 때의 r^2 값은 0.8409~0.9834의 범위였고, 2차 다항식으로 회귀

표 3. 회귀분석결과: 상수 b와 c의 값

| 지점 | 강우 사상 | 수 질 항 목 | | | | |
|-----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | BOD | COD | SS | TN | TP |
| 장천 분류 | 05-1 | 1.0687(-0.0880) | 1.0784(-0.0387) | 0.7482(-0.7511) | 0.8353(-0.2459) | 0.9759(0.0052) |
| | 05-2 | 0.8280(-0.6164) | 0.8827(-0.1868) | 0.7253(-0.9435) | 1.0112(0.1372) | 0.8619(-0.5325) |
| | 05-3 | 1.2159(-0.0301) | 1.0345(-0.2581) | 1.0062(-0.5271) | 0.9382(-0.2857) | 0.9989(-0.1114) |
| | 05-4 | 0.762(-0.9106) | 0.7334(-0.8516) | 0.8109(-1.3963) | 0.9143(-0.2015) | 0.7954(-0.7904) |
| | 04-1 | 1.1426(0.3162) | 1.1713(0.3384) | 1.5403(0.7233) | 0.8660(-0.2073) | 1.1451(0.1389) |
| | 04-2 | 1.1435(0.1675) | 1.0122(-0.1223) | 0.9762(-0.5681) | 0.9748(-0.1499) | 1.1292(-0.0952) |
| | 04-3 | 1.2078(0.1472) | 0.7138(-0.2013) | 1.0987(-0.5619) | 0.9395(-0.3313) | 1.0068(-0.2758) |
| 독골천 | 05-3 | 0.8840(-0.7618) | 0.8423(-0.7440) | 0.6665(-1.3837) | 1.0694(-0.3050) | 1.1761(-0.3705) |
| | 05-4 | 0.6998(-0.9203) | 0.7860(-0.7414) | 0.6025(-1.1779) | 0.7854(-0.1944) | 0.6864(-0.7191) |
| 불미 앞골천 | 04-1 | 0.7514(-0.3574) | - | 0.5205(-1.0866) | 0.7390(-0.4643) | 0.7862(-0.4692) |
| | 04-2 | 0.9068(-0.1828) | - | 0.6646(-1.0111) | 0.8126(-0.2261) | 0.7336(-0.4918) |
| 우수 관거 | 05-1 | 0.7934(-0.6163) | 0.7715(-0.5715) | 1.1273(-0.3921) | 0.8113(-0.3586) | 0.8185(-0.5406) |
| | 05-2 | 1.005(-0.2336) | 0.9880(-0.4644) | 0.7931(-1.2867) | 1.5267(0.6770) | 1.2418(-0.0362) |
| | 05-3 | 0.9554(0.0812) | 0.7193(-0.5798) | 1.0407(-0.1236) | 0.8718(-0.0970) | 0.8227(-0.2997) |
| | 05-4 | 0.797(-0.5015) | 0.8039(-0.6395) | 0.9161(-0.4630) | 1.0720(0.5538) | 0.8864(-0.1570) |

* 괄호안의 값이 c값임.

표 4. 회귀분석결과: 상수 d와 e의 값

| 지점 | 강우 사상 | 수 질 항 목 | | | | |
|-----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | BOD | COD | SS | TN | TP |
| 장천 분류 | 05-1 | 1.0879(-0.6944) | 1.0034(-0.0812) | 1.7363(0.2955) | 1.2685(-0.0926) | 1.0035(-0.2745) |
| | 05-2 | 1.6425(-0.6108) | 1.1060(0.7607) | 1.9278(0.1049) | 0.8434(0.2949) | 1.5377(-0.3772) |
| | 05-3 | 1.0187(-0.0381) | 1.2216(0.2447) | 1.4984(0.3676) | 1.3288(-0.8881) | 1.0766(0.4994) |
| | 05-4 | 1.8906(0.6324) | 1.8255(0.6954) | 2.3573(0.2605) | 1.1695(0.5342) | 1.7831(-0.0713) |
| | 04-1 | 0.7214(-0.8664) | 0.6753(-0.3982) | 0.3841(-1.7619) | 1.1997(0.3214) | 0.9137(-1.4701) |
| | 04-2 | 0.9202(-1.4356) | 1.1333(-0.2770) | 1.5904(-0.4340) | 1.1527(-0.0785) | 1.1474(-1.0266) |
| | 04-3 | 0.8326(0.0413) | 1.0986(2.3013) | 1.5539(0.0985) | 1.3352(-0.4890) | 1.3082(-0.6278) |
| 독골천 | 05-3 | 1.4971(-1.1299) | 1.4533(-1.6246) | 1.4929(-1.5795) | 1.3646(-0.8333) | 1.2668(-0.5093) |
| | 05-4 | 1.7550(-0.0899) | 1.7459(-0.0907) | 2.3594(1.0668) | 1.3240(-1.1240) | 1.3741(-0.6705) |
| 불미 앞골천 | 05-3 | 1.8918(0.8508) | 1.7537(-0.4266) | 2.1597(0.7447) | 1.1792(0.7845) | 1.7114(0.4319) |
| | 04-1 | 1.3229(1.3006) | - | 2.0574(1.3010) | 1.4559(0.8849) | 1.4721(0.2244) |
| 우수 관거 | 04-2 | 1.1875(0.0012) | - | 2.0119(0.1144) | 1.2129(0.2520) | 1.4648(0.4387) |
| | 05-1 | 1.6095(0.1840) | 1.5354(0.6911) | 1.4589(-0.7342) | 1.2585(1.7100) | 1.5228(0.8494) |
| | 05-2 | 1.2557(-0.5497) | 1.4823(-0.6454) | 2.2515(1.0818) | 0.3495(-0.1395) | 1.0959(-1.5413) |
| | 05-3 | 0.9537(-0.5424) | 1.5955(-0.2618) | 1.1992(-1.4373) | 1.0336(0.8201) | 1.3171(-0.1472) |
| | 05-4 | 1.5003(0.2864) | 1.6442(-0.1989) | 1.4941(-0.6133) | 0.3740(1.6495) | 1.1785(0.1097) |

* 괄호안의 값이 e값임.

분석하였을 때의 r^2 값은 0.9614~0.9987, 그리고 3차 다항식으로 회귀분석하였을 때의 r^2 값은 0.9795~0.9993으로 각각 계산되었다. 전반적으로

볼 때 멱함수보다 2차 다항식과 3차 다항식으로 회귀분석했을 때의 상관계수가 훨씬 높았고, 2차 다항식보다 3차 다항식의 상관계수가 약간 더 높았다.

표 5. 회귀분석결과: 상수 f와 g의 값

| 지점 | 강우 사상 | 수 질 항 목 | | | | |
|--------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | BOD | COD | SS | TN | TP |
| 장천 분류 | 05-1 | 0.8789(0.7908) | 0.0743(0.9686) | -1.1626(1.8628) | -0.1169(1.2288) | 0.3873(0.8861) |
| | 05-2 | 0.2592(1.3484) | -1.2772(1.4722) | -1.0939(1.9783) | -0.2854(0.9853) | 0.0081(1.3561) |
| | 05-3 | 0.0250(1.0001) | -0.6117(1.3410) | -1.0584(1.6778) | 0.9978(0.8953) | -0.8331(1.3204) |
| | 05-4 | -1.8115(2.1922) | -1.8423(2.1573) | -1.7674(2.4815) | -0.9625(1.4243) | -0.6888(1.7491) |
| | 04-1 | 1.5257(0.3355) | 0.8942(0.4979) | 3.1830(-0.4006) | -0.6560(1.3428) | 2.1912(0.2590) |
| | 04-2 | 2.0811(0.3558) | 0.2469(1.0244) | 0.0104(1.4198) | -0.0453(1.1219) | 1.2731(0.7438) |
| | 04-3 | 0.088(0.8524) | -3.4996(2.1966) | -0.7031(1.6009) | 0.3696(1.1019) | 0.6239(1.0087) |
| 독골천 | 04-4 | 1.1129(1.0034) | 1.8469(0.7435) | 1.7469(0.8029) | 0.8323(1.0005) | 0.4658(1.0443) |
| | 05-3 | -0.6305(1.7115) | -0.6115(1.7020) | -2.9417(2.8753) | 1.3365(0.7805) | 0.6087(1.0498) |
| 불미 앞골천 | 05-4 | -2.1909(2.3372) | -0.1044(1.5304) | -2.2900(2.5495) | -1.3659(1.5898) | -1.3640(1.9374) |
| | 04-1 | -2.1722(1.8958) | - | -2.9019(2.6305) | -1.6989(1.8457) | -0.7823(1.5709) |
| 우수 관거 | 04-2 | -0.1844(1.1880) | - | -1.1652(2.0588) | -0.5655(1.3163) | -1.0828(1.6449) |
| | 05-1 | -0.8643(1.6848) | -1.5033(1.8184) | 0.5979(1.1582) | -2.6642(1.9587) | -1.6858(1.8706) |
| | 05-2 | 0.5181(1.0304) | 0.4182(1.2177) | -2.7661(2.6950) | 0.8677(0.2923) | 2.0716(0.4640) |
| | 05-3 | 0.8480(0.7070) | -0.2096(1.4764) | 1.9083(0.5454) | -1.2563(1.4066) | -0.0916(1.2501) |
| | 05-4 | -0.9052(1.6294) | -0.3591(1.5545) | 0.4015(1.2176) | -1.7711(1.1175) | -0.3115(1.2279) |

* 괄호안의 값이 g값임.

상수 d, e, f, g 의 값은 초기세척효과의 강도와 관련성이 없었고, 2차 다항식의 c 값은 초기세척효과와 밀접하게 관련되어 있는 것을 보여 주었다. c 값이 음일 때 누적유량-부하량비 곡선의 형태가 위로 볼록하고, 양일 때는 누적유량-부하량비 곡선의 형태가 오목하였다. c 값이 감소함에 따라 초기세척효과의 강도가 더 크게 나타난다. 장천분류의 2005년도 조사결과의 SS를 보면 그림 3에서 보는 바와 같이 초기세척효과의 강도가 05-4 > 05-2 > 05-1 > 05-3의 순으로 나타나는데, 이것은 표 3의 장천분류 SS에 대한 상수 c 값의 계산 결과와 일치한다. 다른 수질 항목에 대해서도 상수 c 값의 계산 결과는 누적유량-부하량비 곡선의 초기세척효과의 강도를 잘 나타내고 있다. 장천분류의 2005년도 조사결과의 TP를 보면 초기세척효과의 강도가 그림 3에서 보는 바와 같이 05-4 > 05-2 > 05-3 > 05-1의 순으로 나타나는데 이 결과는 표 3의 장천분류 TP에 대한 상수 c 값의 계산 결과와 일치한다. 반면에 표 3의 2005년 조사의 장천분류 SS에 대한 상수 b 값으로 초기세척효과의 강도를 표시하면 05-2 > 05-1 > 05-4 > 05-3으로 나타난다. 따라서 멱함수의 상수

b 값은 초기세척효과의 강도를 제대로 나타내지 못하고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

2년간의 강우조사 결과로 BOD, COD, SS, TN, TP의 각 수질 항목에 대한 누적유량-부하량비 곡선을 작성하였다. SS에 대한 누적유량-부하량비 곡선의 경우, 대부분의 조사에서 실측치 자료들이 45°의 이등분선에서 윗 부분으로 큰 편차를 보이면서 이격되어 있어서 초기세척효과가 두드러지게 나타난다. 특히 독골천과 불미앞골천의 초기세척효과가 하천분류보다 강하게 나타났고, 우수관거의 BOD와 COD는 약한 초기세척현상을 보였다. TN에 관한 조사결과는 특이해서 유출량 증가에 따라 오염부하량이 일정하게 증가하는 특성을 보인다.

멱함수로 누적유량-부하량비 자료를 회귀분석했을 때에 상수 b 값이 작아질수록 누적유량-부하량비 자료가 45°의 이등분선 위쪽으로 편차가 커지고, 대체적으로 초기세척효과가 커지는 것으로 나타난다. 따라서 상수 b 값으로 초기세척효과의 강도를 나

타내는 지표로 사용될 수는 있지만, 강우시작 직후의 일부 자료들이 b 값 계산에 큰 영향을 미치기 때문에 전체적인 초기세척효과의 특성을 왜곡시키는 경우가 있다. 멱함수이외에 누적유량-부하량비 자료를 이용해서 2차 다항식과 3차 다항식으로 회귀 분석했을 때 멱함수보다 상관계수가 더 높아서, 2차 다항식과 3차 다항식이 누적유량-부하량비 곡선의 특성을 보다 더 적절히 묘사하였다. 두가지 다항식의 상수 d, e, f, g 의 값은 초기세척효과의 강도와 특별한 관련성이 없었다. 2차 다항식의 상수 c 값은 초기세척효과와 밀접하게 관련되어 있는 것을 보여주었다. c 값이 음일 때 누적유량-부하량비 곡선의 형태가 위로 볼록하고, 양일 때는 누적유량-부하량비 곡선의 형태가 오목하다. c 값이 감소함에 따라 초기세척효과의 강도가 더 크게 나타나서 상수 c 가 초기세척효과의 강도를 효과적으로 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2005-000-10983-0)지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정육진, 2002, 경안천유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사, 대한환경공학회지, 24(11),

2019-2027.

신창민, 최지용, 박철휘, 2004, 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성, 대한환경공학회지, 26(7), 729-735.

Bedient, P. B., Harned D. A., and Characklis W. G., 1978, Stormwater analysis and prediction in Houston, *J. Environ. Eng. Div. ASCE*, 104(EE6), 1087-1100.

Bertrand-Krajewski, J.-L., Chebbo G., and Saget A., 1998, Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharge and the first flush phenomenon, *Water Research*, 32(8), 2341-2356.

Lee, J. H. and Bang, K. W., 2000, Characterization of urban stormwater runoff, *Water Research*, 34(6), 1773-1780.

Lee, J. H. Yu, M. J., Bang, K. W., and Choe, J. S., 2003, Evaluation of the methods for first flush analysis in urban watersheds, *Water Science and Technology*, 48(10), 167-176.

Novotny, V., 2003, Water quality: diffuse pollution and watershed management. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

최종원고채택 07. 10. 10