

횡성호 유역의 비강우시 및 강우시 오염물질 유출특성

노성덕 · 김장현 · 이대근 · 김선주* · 손병용** · 전양근†

환경시설관리공사

*한국수자원공사 수자원기획처

**한국수자원공사 횡성권관리단

Characteristics of Pollutants Discharge from Hoengseong Watershed during the Dry and Rainy Seasons

Sung-Duk Roh · Jang-Hyun Kim · Dae-Keun Lee · Seon-Joo Kim* · Byeong-Yong Sohn** · Yang-Kun Chun†

Environmental Facilities Management Corporation

*Water Resources Planning Department, Korea Water Resources Corporation

**Hoengseong Regional Office, Korea Water Resources Corporation

(Received 11 May 2006, Accepted 26 May 2006)

Abstract

This study was carried out to make a basic information for establishment of countermeasures against water pollution of Hoengseong watershed, accordingly we investigated the characteristics of pollutants discharge and estimated the unit loads from Hoengseong watershed. Seven sites (S1~S7) were selected for sampling and samples were taken 4 times during the dry and rainy seasons, respectively. During rainfall events, measured site mean concentration (SMC) ranges of BOD₅, COD_{Mn}, TOC, SS, Turbidity, T-N and T-P were 0.8~1.3 mg/L, 2.3~6.3 mg/L, 1.284~2.110 mg/L, 3.4~69.3 mg/L, 2.36~52.68 NTU, 1.243~1.669 mg/L and 0.025~0.070 mg/L, respectively. And the calculated annual unit loads of BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N and T-P in Hoengseong watershed were 1.327 kg/ha/yr, 7.349 kg/ha/yr, 87.075 kg/ha/yr, 1.848 kg/ha/yr and 0.103 kg/ha/yr, respectively. It was difficult to directly compare the unit loads proposed in this study with the estimated existing those. Because the unit loads in this paper were estimated not by land use types, but by complex land use of non-urban area. From the survey results, they showed that the unit loads in Hoengseong watershed were similar to those existing in the forest area, and showed lower than those existing in the paddy/dry field.

keywords : Hoengseong watershed, Pollutant discharge, Site mean concentration (SMC), Unit load

1. 서론

우리나라의 수질오염에 대한 규제는 주로 도시하수, 공장 폐수 등 점오염원(point sources)을 중심으로 관리되어 왔기 때문에 강우시 비점오염원(nonpoint sources)에서 유출되는 오염물질은 적절히 관리되지 못했다. 수질개선을 위해서는 점오염원의 규제와 병행하여 비점오염원에 대한 관리도 시급한 실정이다. 갈수록 불투수성 포장비율이 높아짐에 따라 강우시 첨두유출량(peak flowrate)도 커지고 있다. 이에 따른 비점오염물질(nonpoint pollutants)의 이동력이 증가하여 수질과 수량적인 측면에서 큰 영향을 끼치고 있는 것으로 조사되고 있다(이 등, 2001; Novotny et al., 1981).

비점오염물질은 발생량 및 배출특성의 파악이 매우 어렵고 발생량이 매우 불규칙하며, 많은 종류의 오염물질을 포함하고 있다. 또한 시간에 따른 부하량 변동폭이 크며, 강

우초기에 오염물질의 농도가 매우 높다(노 등, 2004; 한국수자원공사, 2004a; Bedient et al., 1980). 특히 질소와 인 등의 영양물질이 많이 포함되어 있어 하천이나 호소의 부영양화를 일으키는 주범으로 알려져 있다(안, 2000; Ichiki et al., 1999). 이와 같은 현안과제를 해결하기 위하여 최근 들어 국내외에서 비점오염원의 유출특성 조사 및 저감시키기 위한 투자와 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 비점오염원은 각 지역의 지형, 수리 수문 조건 및 토지이용현황, 강우특성 등 다양한 요인에 따라 배출특성이 매우 다양하여 대상지역에 대한 개별적인 연구가 필요하다(김 등, 2002; 경기도보건환경연구원, 2001).

횡성호 유역 역시 읍·면단위 생활, 축산계 점오염원 및 강우시 비점오염원으로부터의 급격한 오염물질 유출증가에 따른 수질악화가 점오염원과 더불어 커다란 문제로 대두되고 있다. 이에 '횡성호 비점오염 저감 및 수질보전 종합대책 수립'이라는 연구용역(연구기간: 2004.5.7~2005.1.31)을 수행하게 되었다. 본 연구를 통해서 횡성호 유역의 유역 및 강우특성에 따른 유량변화와 비강우시 및 강우시 수

† To whom correspondence should be addressed.
chun@efmc.co.kr

질분석을 통해 오염물질의 유출특성을 파악하고 이를 토대로 유출오염부하 원단위 산정하여 황성호 유역의 수질보전에 기여하고 대책 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 조사 및 분석 방법

2.1. 대상유역특성

황성호는 섬강 제1지류인 계천(황성군 갑천면 대관대리)에 건설된 다목적 인공호로서 남한강 지류인 섬강의 중하류지역의 갈수기 용수부족과 매년 되풀이되는 홍수피해 문제를 해결코자 수자원 종합개발 계획의 일환으로 건설되었다. 현재 원주시를 비롯한 댐 하류 중소도시에 연간 111.6 백만 m³의 용수를 공급하며, 댐 하류에 매년 발생하는 홍수피해를 경감하고 있을 뿐만 아니라 연간 104 Gwh의 전력을 생산 공급하게 되었다(한국수자원공사, 2004b). 황성호 유역의 주요 유입하천은 계천으로 유동천, 구사천의 지방2급 하천이 지천으로서 합류하여 황성호로 유입되며, 제1지류인 섬강과 남한강, 한강으로 합류되는 형상이다. Fig. 1에 황성호 유역내 비점오염원 유출특성 조사를 위하여 선정된 조사지점(S1~S7)과 조사지점을 중심으로 배수구역을 유동천(S-1~S-3), 계천(S-4~S-5, S-7), 구사천(S-6), 계천본류(S-8)로 세분화하여 나타내었다.



Fig. 1. Sampling sites in Hoengseong watershed.

계천, 유동천, 구사천의 유역면적(km²)은 각각 38.84, 9.49, 21.19이며, 유로연장(km)은 283.62, 24.36, 77.86이다. 인구밀도, 한우밀도, 농경지 비율 모두 각 하천의 상류지역에서 하류지역으로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다. 한우는 사육두수가 많을 뿐만 아니라 발생부하 원단위가 크므로 축산오염원 중 가장 큰 영향을 미칠 것으로 추정되었다.

2.2. 조사방법 및 강우특성

황성호 유역내 7개의 각 조사지점별로 2004년 7월부터 2004년 11월까지 유량 및 수질조사를 실시하였으며, 강우 현황에 따라 강우시 4회, 비강우시 4회에 걸쳐 각 분석항

목별로 측정을 수행하였다. 비강우시에는 강우 조사기간에 들어가지 않는 기간으로 청명한 날이 5일 이상 지속된 시점에서 실시하였다. 강우시에는 선행무강우일수(antecedent dry days, ADD)를 3일 이상, 예상 강우량 20 mm 이상으로 하여 현장조사를 실시하였다. 시료채취는 peak를 고려하여 유출초기로부터 30분~2시간 간격으로 유량이 유출초기 상태로 될 때까지 강우사상(rainfall event)당 6~12회이상 연속조사 실시하되 농도부하가 증가할 시점부터는 10~30분 간격으로 조사하였다. Peak를 포함한 부하변동기간이외에는 2~4시간 등 조사간격을 적절히 조정하였다. 시료채취는 하천에서 직접 채취하는 것을 원칙으로 하였으며, 강우시 유량의 증가로 직접채취가 어려운 경우 조사지점 상부에서 자동채취기(Auto Sampler, ISCO6712, ISCO Inc., USA)를 이용하여 채수하였다. 하천 유속의 측정은 유속계(FP201, Global water, USA; SW2100, Swoffer, USA; UC-2, TAMAYA, Japan)를 이용하였다. 강우시 시료의 채수는 횡단방향 3~5지점에서 채수·혼합하여 1개의 시료로 하여 대표성 있는 시료를 사용하였다. 비강우시는 하천유량과 수질이 비교적 큰 차이가 없이 일정하므로 1회 출수시 12시간 간격을 두고 2회에 걸쳐 채수한 시료를 혼합하여 분석하였다. Table 1은 조사기간 각 조사지점별로 비강우시 및 강우시 조사회수와 조사일시, 강우량, 강우강도, 강우지속시간, 선행무강우일수, 유출고, 유출계수, 침투유출량 및 시료수를 나타낸 것이다.

2.3. 유량 및 수질분석

유량은 강우시간에 따른 하천의 수위와 동시에 하천유량을 측정하였고 비강우시 및 강우시의 오염물질 유출상태를 비교하여 강우에 의한 수질, 수량의 변화상태, 오염물질의 유출형태 등 강우사상에 따른 유출특성을 조사하였다. 유량의 측정은 유속계에 의한 유량측정법(한국수자원공사, 2002) 중 도보측정과 교량에 의한 유량측정법을 선택하였다. 유량 측정지점에 대하여 조사전 횡단측량을 실시하였고 측정되어진 유속 및 수심의 결과와 각 구분단면을 대표하는 평균 유속을 사용하기 위하여 하천의 단면은 중간단면법(Mid-Section Method)을 선택하여 계산하였다.

현장측정항목은 수온, pH, DO, 탁도, 전기전도도, 유량(유속, 하상단면) 등으로 하였으며, 실내 실험은 BOD₅, COD_{Mn}, TOC, SS, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, Chlorophyll-a 등을 분석하였다. 각 항목별 분석방법은 Standard Method(APHA, 1998)와 수질오염공정시험법(환경부, 1999)에 의해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 비강우시 조사

황성호 유역의 비강우시 총 4회에 걸쳐 무강우 5일 이상 일 때 조사한 평균유량과 평균오염물질 농도를 Table 2에 나타내었다. 유동천 및 계천 상류에서 하류로 갈수록 유량 및 오염물질 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 유량의 경

Table 1. Hydrologic description of runoff events in each site

| Site | Rainy/ Dry | Event date (yy/mm/dd) | Total rainfall (mm) | Rainfall intensity (mm/hr) | Duration (hrs) | Antecedent dry days | Runoff depth (mm) | Runoff coefficient | Peak flowrate** (CMS) | NO. of Samples |
|------|---------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|
| S1 | Rainy | 04/07/03 | 42.4 | 0.0~8.8(0.9) | 42 | 10 | 0.78 | 0.018 | 1.631 | 26 |
| | Dry | 04/07/22 | - | - | 12 | 5 | - | - | 0.772 | 8 |
| | Dry | 04/08/13 | - | - | 12 | 26 | - | - | 0.231 | 8 |
| | Rainy | 04/08/16 | 98.7 | 0.0~17.4(3.0) | 25 | 29 | 7.45 | 0.075 | 5.164 | 25 |
| | Rainy | 04/09/10 | 23.1 | 0.0~2.9(0.7) | 22 | 4 | 0.64 | 0.028 | 0.895 | 21 |
| | Dry | 04/10/05 | - | - | 12 | 16 | - | - | 0.343 | 8 |
| | Dry | 04/11/10 | - | - | 12 | 50 | - | - | 0.109 | 8 |
| | Rainy | 04/11/26 | 22.6 | 0.0~13.6(1.4) | 9 | 15 | 0.10 | 0.004 | 0.291 | 15 |
| S2 | Rainy | 04/07/03 | 42.4 | 0.0~8.8(0.9) | 42 | 10 | 0.49 | 0.012 | 1.502 | 26 |
| | Dry | 04/07/22 | - | - | 12 | 5 | - | - | 1.784 | 8 |
| | Dry | 04/08/13 | - | - | 12 | 26 | - | - | 0.535 | 8 |
| | Rainy | 04/08/16 | 98.7 | 0.0~17.4(3.0) | 25 | 29 | 12.05 | 0.122 | 12.486 | 25 |
| | Rainy | 04/09/10 | 23.1 | 0.0~2.9(0.7) | 22 | 4 | 0.63 | 0.027 | 1.360 | 21 |
| | Dry | 04/10/05 | - | - | 12 | 16 | - | - | 0.659 | 8 |
| | Dry | 04/11/10 | - | - | 12 | 50 | - | - | 0.170 | 8 |
| | Rainy | 04/11/26 | 22.6 | 0.0~13.6(1.4) | 9 | 15 | 0.11 | 0.005 | 0.524 | 15 |
| S3 | Rainy | 04/07/03 | 42.4 | 0.0~8.8(0.9) | 42 | 10 | 1.69 | 0.040 | 4.394 | 26 |
| | Dry | 04/07/22 | - | - | 12 | 5 | - | - | 3.492 | 8 |
| | Dry | 04/08/13 | - | - | 12 | 26 | - | - | 0.635 | 8 |
| | Rainy | 04/08/16 | 98.7 | 0.0~17.4(3.0) | 25 | 29 | 16.42 | 0.166 | 19.290 | 25 |
| | Rainy | 04/09/10 | 23.1 | 0.0~2.9(0.7) | 22 | 4 | 0.60 | 0.026 | 1.962 | 21 |
| | Dry | 04/10/05 | - | - | 12 | 16 | - | - | 0.926 | 8 |
| | Dry | 04/11/10 | - | - | 12 | 50 | - | - | 0.229 | 8 |
| | Rainy | 04/11/26 | 22.6 | 0.0~13.6(1.4) | 9 | 15 | 0.14 | 0.006 | 0.751 | 15 |
| S4 | Rainy | 04/07/03 | 44.5 | 0.0~9.2(1.0) | 42 | 10 | 0.22 | 0.005 | 0.256 | 26 |
| | Dry | 04/07/22 | - | - | 12 | 5 | - | - | 0.299 | 8 |
| | Dry | 04/08/13 | - | - | 12 | 26 | - | - | 0.141 | 8 |
| | Rainy | 04/08/16 | 102.6 | 0.0~13.6(3.1) | 25 | 29 | 10.16 | 0.099 | 4.635 | 25 |
| | Rainy | 04/09/10 | 23.4 | 0.0~2.8(0.7) | 22 | 4 | 0.21 | 0.009 | 0.194 | 21 |
| | Dry | 04/10/05 | - | - | 12 | 16 | - | - | 0.198 | 8 |
| | Dry | 04/11/10 | - | - | 12 | 50 | - | - | 0.169 | 8 |
| | Rainy | 04/11/26 | 20.0 | 0.0~5.4(1.4) | 9 | 15 | 0.14 | 0.007 | 0.266 | 15 |
| S5 | Rainy | 04/07/03 | 44.5 | 0.0~9.2(1.0) | 42 | 10 | 0.21 | 0.005 | 0.699 | 26 |
| | Dry | 04/07/22 | - | - | 12 | 5 | - | - | 3.865 | 8 |
| | Dry | 04/08/13 | - | - | 12 | 26 | - | - | 0.494 | 8 |
| | Rainy | 04/08/16 | 102.6 | 0.0~13.6(3.1) | 25 | 29 | 13.91 | 0.136 | 12.363 | 25 |
| | Rainy | 04/09/10 | 23.4 | 0.0~2.8(0.7) | 22 | 4 | 0.22 | 0.009 | 0.419 | 21 |
| | Dry | 04/10/05 | - | - | 12 | 16 | - | - | 1.593 | 8 |
| | Dry | 04/11/10 | - | - | 12 | 50 | - | - | 0.368 | 8 |
| | Rainy | 04/11/26 | 20.0 | 0.0~5.4(1.4) | 9 | 15 | 0.09 | 0.005 | 0.367 | 15 |
| S6 | Rainy | 04/07/03 | 44.5 | 0.0~9.2(1.0) | 42 | 10 | 0.92 | 0.021 | 0.608 | 26 |
| | Dry | 04/07/22 | - | - | 12 | 5 | - | - | 0.484 | 8 |
| | Dry | 04/08/13 | - | - | 12 | 26 | - | - | 0.135 | 8 |
| | Rainy | 04/08/16 | 102.6 | 0.0~13.6(3.1) | 25 | 29 | 11.27 | 0.110 | 9.296 | 25 |
| | Rainy | 04/09/10 | 23.4 | 0.0~2.8(0.7) | 22 | 4 | 0.49 | 0.021 | 0.358 | 21 |
| | Dry | 04/10/05 | - | - | 12 | 16 | - | - | 0.390 | 8 |
| | Dry | 04/11/10 | - | - | 12 | 50 | - | - | 0.150 | 8 |
| | Rainy | 04/11/26 | 20.0 | 0.0~5.4(1.4) | 9 | 15 | 0.18 | 0.009 | 0.292 | 15 |
| S7 | Rainy | 04/07/03 | 44.5 | 0.0~9.2(1.0) | 42 | 10 | 0.74 | 0.017 | 1.617 | 26 |
| | Dry | 04/07/22 | - | - | 12 | 5 | - | - | 5.890 | 8 |
| | Dry | 04/08/13 | - | - | 12 | 26 | - | - | 0.661 | 8 |
| | Rainy | 04/08/16 | 102.6 | 0.0~13.6(3.1) | 25 | 29 | 17.22 | 0.168 | 21.404 | 25 |
| | Rainy | 04/09/10 | 23.4 | 0.0~2.8(0.7) | 22 | 4 | 0.16 | 0.007 | 0.575 | 21 |
| | Dry | 04/10/05 | - | - | 12 | 16 | - | - | 2.090 | 8 |
| | Dry | 04/11/10 | - | - | 12 | 50 | - | - | 0.532 | 8 |
| | Rainy | 04/11/26 | 20.0 | 0.0~5.4(1.4) | 9 | 15 | 0.12 | 0.006 | 0.751 | 15 |

() is average value

** Peak flowrates in the dry season are mean flowrate values of two times measured datas

Table 2. Mean flowrate and pollutant concentrations in the dry season survey

| Site | Flowrate (CMS) | BOD ₅ (mg/L) | COD _{Mn} (mg/L) | SS (mg/L) | T-N (mg/L) | T-P (mg/L) | NH ₃ -N (mg/L) | NO ₃ -N (mg/L) | PO ₄ -P (mg/L) | TOC (mg/L) | Chl.-a ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Thurbidity (NTU) |
|------|----------------|-------------------------|--------------------------|-----------|------------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|-------------------------------------|------------------|
| S1 | 0.364 | 0.8 | 1.7 | 1.1 | 1.659 | 0.019 | 0.007 | 1.597 | 0.008 | 0.921 | 0.917 | 1.22 |
| S2 | 0.787 | 0.8 | 1.9 | 0.7 | 1.813 | 0.010 | 0.008 | 1.723 | 0.004 | 1.006 | 0.531 | 1.31 |
| S3 | 1.321 | 0.8 | 2.0 | 1.7 | 2.007 | 0.018 | 0.015 | 1.882 | 0.006 | 1.047 | 0.495 | 2.52 |
| S4 | 0.202 | 0.7 | 1.3 | 1.0 | 1.561 | 0.013 | 0.003 | 1.354 | 0.004 | 1.079 | 0.362 | 1.26 |
| S5 | 1.580 | 0.8 | 2.0 | 1.5 | 1.923 | 0.011 | 0.021 | 1.793 | 0.004 | 1.231 | 0.795 | 2.04 |
| S6 | 0.290 | 0.8 | 2.1 | 25.6 | 1.574 | 0.018 | 0.016 | 1.476 | 0.004 | 1.765 | 0.924 | 22.15 |
| S7 | 2.293 | 0.8 | 2.2 | 3.8 | 1.998 | 0.014 | 0.019 | 1.821 | 0.005 | 1.436 | 0.909 | 4.69 |

Table 3. Mean pollutant loads in the dry season survey

(Unit : kg/day)

| Site | BOD ₅ | COD _{Mn} | SS | TOC | T-N | NH ₃ -N | NO ₃ -N | T-P | PO ₄ -P |
|------|------------------|-------------------|----------|--------|--------|--------------------|--------------------|------|--------------------|
| S1 | 24.04 | 52.50 | 28.97 | 30.33 | 50.56 | 0.20 | 47.30 | 0.54 | 0.20 |
| S2 | 51.84 | 127.00 | 42.64 | 70.59 | 125.75 | 0.46 | 116.04 | 0.66 | 0.29 |
| S3 | 91.39 | 226.31 | 135.16 | 130.38 | 228.86 | 1.15 | 213.10 | 2.03 | 0.88 |
| S4 | 11.38 | 21.59 | 15.90 | 18.08 | 27.06 | 0.05 | 23.39 | 0.23 | 0.07 |
| S5 | 106.07 | 254.90 | 306.37 | 153.44 | 264.60 | 1.94 | 247.44 | 1.40 | 0.54 |
| S6 | 18.87 | 47.72 | 942.48 | 44.23 | 41.14 | 0.40 | 37.61 | 0.51 | 0.10 |
| S7 | 143.31 | 477.23 | 1,368.92 | 258.85 | 409.17 | 3.65 | 363.43 | 2.78 | 1.10 |

우 유동천의 중상류지점인 S1과 S2의 경우 하천수를 농업용수로 이용하고 있어 조사시기에 따라 하천유량이 감소하기도 하였다. 오염물질 농도조사에서 S1지점에 비해 S2지점에서 부유물질과 인의 농도가 낮았다. 이는 하천이 사행으로 흐르고 보가 설치되어 있어 유속이 감소하여 부유물질이 침전되고 산림지대로부터의 저농도의 계곡수가 유입됨에 따른 희석에 의한 것으로 판단된다. 그러나 질소농도는 용존성 질산성 질소의 비율이 높아 유동천뿐만 아니라 계천도 상류에서 중류를 흐를 때 농도의 감소는 없는 것으로 조사되었다.

Table 3과 Fig. 2는 4회 조사된 비강우시 평균오염물질 부하를 나타낸 것으로 상류에서 하류로 이동할수록 부하가 증가하였다. S3지점의 경우 S3지점의 배수구역에서만 배출되는 유량이 0.534 m³/s(S3지점 유량에서 S2지점 유량을 뺀 값)로 청일면소재지 인근에서 배출되는 유량의 비율이 비강우시에는 크며, 이로 인해 오염부하가 증가하는 것으로 보인다. S6지점(구사천하류)의 경우 SS부하가 급격히 증가한 것은 1차 조사시기에 구사천의 개수공사에 의해 일시적으로 발생한 것으로 판단된다. 질소부하가 높게 나타난 S5지점은 농경지면적이 넓은 유역특성에 기인한 것으로 추정된다. 인부하의 경우 하류부에 위치한 S3, S7지점에서 높게 나타났는데, 이는 인구, 농경지, 가축의 밀도가 높기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 강우시 조사

3.2.1. 오염물질의 유출경향

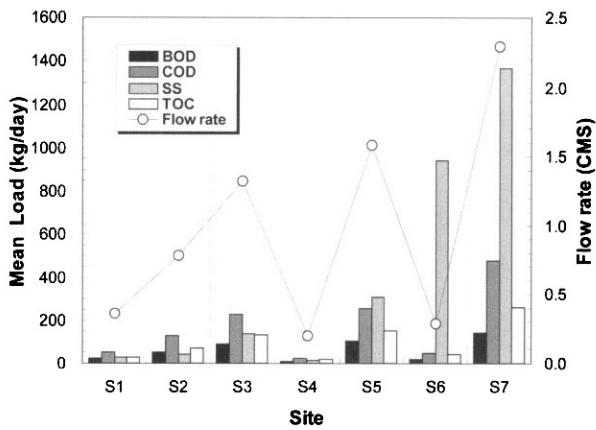
횡성호 유역의 2004년 수문특성을 파악하기 위해 Fig. 3에 횡성댐 우량관측소에서 측정된 강우량과 횡성군 갑천면 매일리(유동천과 계천이 합류되어 횡성호로 유입되는 지점)에 위치한 수위관측소에서 측정된 횡성호 유입유량에 대한 수문곡선(hydrograph)을 나타내었다. 2004년 수문곡선을 보

면 강우량이 일최대 95.0 mm, 일평균 4.1 mm, 총강우량 1507 mm를 나타내고 있으며, 유입유량은 일최대 294.3 CMS, 일평균 8.1 CMS으로 조사되었다. 본 연구에서 실측 기간 유동천과 계천의 총강우량이 각각 186.7 mm, 190.5 mm로, 이때 2004년 총강우량에서 차지하는 비율을 살펴보면 각각 12.4%, 12.6%를 보였다.

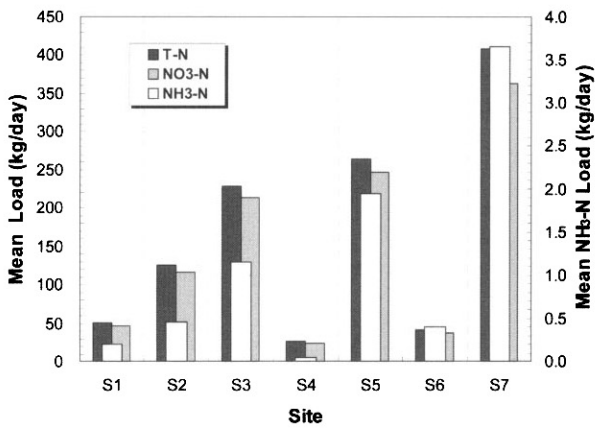
강우시 조사(총 4회)에서 오염물질의 유출특성을 파악하기 위해서 S3(유동천하류)과 S7(계천하류)지점을 대상으로 조사기간중 총강우량이 각각 98.7 mm, 102.6 mm로 가장 많은 2차 강우 조사시의 수문곡선과 농도곡선(pollutograph)을 Fig. 4에 나타내었다. 강우시작으로부터 S3과 S7지점에서 최대유량 도달시간은 각각 870분, 850분으로 조사되었다. 농도곡선과 관련하여 항목별 오염물질농도를 살펴보면, 다른 항목에 비해 SS가 높은 유출농도를 보이고 있어 오염물질 중 SS가 횡성호에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 조사되었다. 특히 S7지점이 S3지점보다 높은 SS 농도를 보이고 있어 유동천보다 계천의 영향이 큰 것으로 조사되었다. 입자성 물질인 SS와 인의 경우 인이 SS보다 약간 늦게 최고농도에 도달하나 거의 일치하였으며, SS 증가에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. S3지점의 SS는 첨두 유량보다 앞서 최고농도가 나타나는 경향을 보였으며, S7지점의 SS는 첨두 유량과 거의 비슷하게 출현하였다. 질소는 유량 증가에 따라 약간 감소하는 경향을 보였으나, 뚜렷한 유의성을 보이지 않았다.

3.2.2. 오염물질 농도의 통계학적 분석

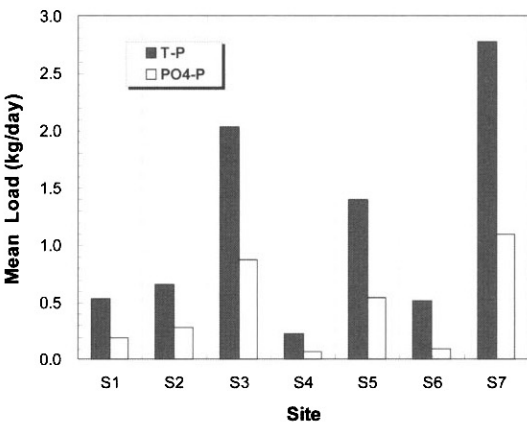
횡성호로 유입되는 오염물질의 정량적인 분포를 파악하기 위해 강우시 조사에서 측정된 S3(유동천하류)과 S7(계천하류)지점의 오염물질 농도를 대상으로 통계학적 분석을 실시하여 Fig. 5에 나타내었다. 여기에는 최소값(minimum), 하사분위수(lower quartile), 중앙값(median), 평균(mean), 상



(a) Organic matters & SS



(b) Nitrogen



(c) Phosphorous

Fig. 2. Comparison of mean pollutant loads in the dry season survey.

사분위수(upper quartile), 최대값(maximum) 및 사분위간 범위(interquartile range)를 보여준다. 항목별 오염물질 농도 범위는 BOD₅가 S3지점에서 0.3~2.6(중앙값 0.8) mg/L, S7 지점에서 0.2~4.0(중앙값 1.2) mg/L의 범위를 보이고 있다. COD_{Mn}은 S3지점에서 1.1~5.4(중앙값 2.5) mg/L, S7지점에서 1.4~14.7(중앙값 2.5) mg/L의 범위를 보이고 있으며, TOC는 S3지점에서 0.620~2.375(중앙값 1.400) mg/L, S7지점에서 0.726~4.220(중앙값 1.225) mg/L의 범위를 보

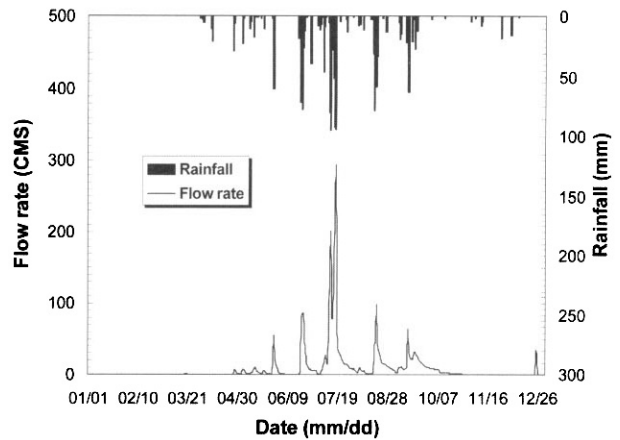


Fig. 3. Hydrograph for 2004 in Hoengseong watershed.

이고 있다. SS의 경우는 S3지점에서 0.3~56.4(중앙값 2.2) mg/L, S7지점에서 0.3~307.0(중앙값 6.0) mg/L의 높은 농도 범위를 보이고 있다. 그리고 T-N은 S3지점에서 1.296~2.070(중앙값 1.717) mg/L, S7지점에서 1.230~2.270(중앙값 1.520) mg/L의 범위를 보이고 있으며, T-P는 S3지점에서 0.011~0.144(중앙값 0.032) mg/L, S7지점에서 0.015~0.176(중앙값 0.039) mg/L의 범위를 보이고 있다. 통계학적 분석 결과를 통해 알 수 있듯이, 항목별 오염물질 농도분포가 S7지점이 S3지점보다 큰 범위를 보이고 있어 강우시 횡성호에 미치는 오염물질 영향이 유동천보다 계천이 큰 것으로 조사되었다.

3.2.3. 유량가중평균농도 및 지역평균농도

강우시 비점오염원으로부터 유출수의 평균농도를 가장 잘 반영하여 나타내는 것으로 알려진 유량가중평균농도(event mean concentration, EMC) 및 지역평균농도(site mean concentration, SMC)를 산정하여 각 실측기간의 조사지점별 강우유출수의 비점오염물질 유출특성을 파악하고자 하였다. EMC는 강우시 발생한 총오염물질량(kg)을 총유출량(m³)으로 나눈 유량가중평균값으로 식 (1)을 이용하였으며, SMC는 특정지역 EMC 값의 평균값으로 산정하였다.

$$\text{유량가중평균농도(EMC)} = \frac{\sum C_i \cdot Q_i \cdot t_i}{\sum Q_i \cdot t_i} \quad (1)$$

여기서, C_i와 Q_i는 각 실측농도(mg/L)와 유량(m³/s)이며, t_i는 유출시간(sec)을 나타낸다.

Table 4는 각 조사지점별 EMCs와 SMC를 나타낸 것으로 SMC는 조사기간 강우사상(총 4회)에 대한 각 조사지점별 EMC의 평균값이다. Fig. 6의 각 조사지점별 SMC를 보면 BOD₅의 SMC는 0.8~1.3 mg/L의 범위로 비교적 낮은 농도를 보이고 있으며, 조사지점별로 보면 하천의 하류지점으로 갈수록 증가하는 경향이 있다. COD_{Mn}의 SMC는 2.3~6.3 mg/L의 범위로 비강우시의 수질농도에 비해 다소 높은 농도를 보이고 있으며, 조사지점별로 보면 유동천에 위치한 조사지점(S1~S3)보다 계천에 위치한 조사지점(S4~S7)의 수질농도가 높은 것으로 나타났다. TOC의 SMC는

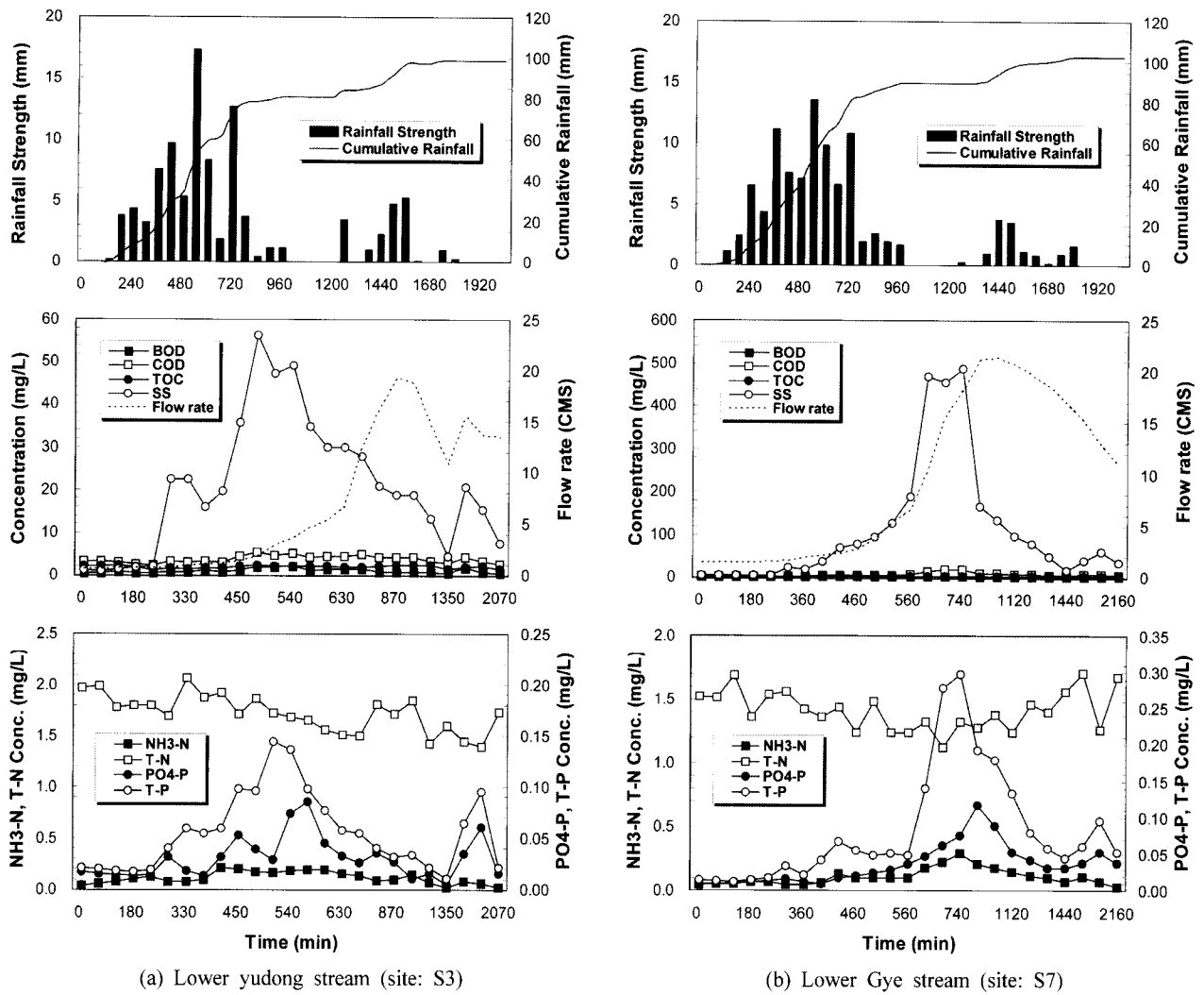


Fig. 4. Hydrographs and Pollutographs for pollutants during the 2nd rainy survey (2004/08/16).

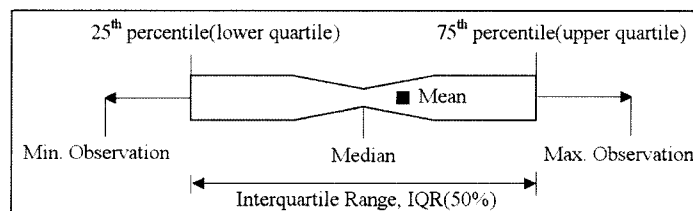
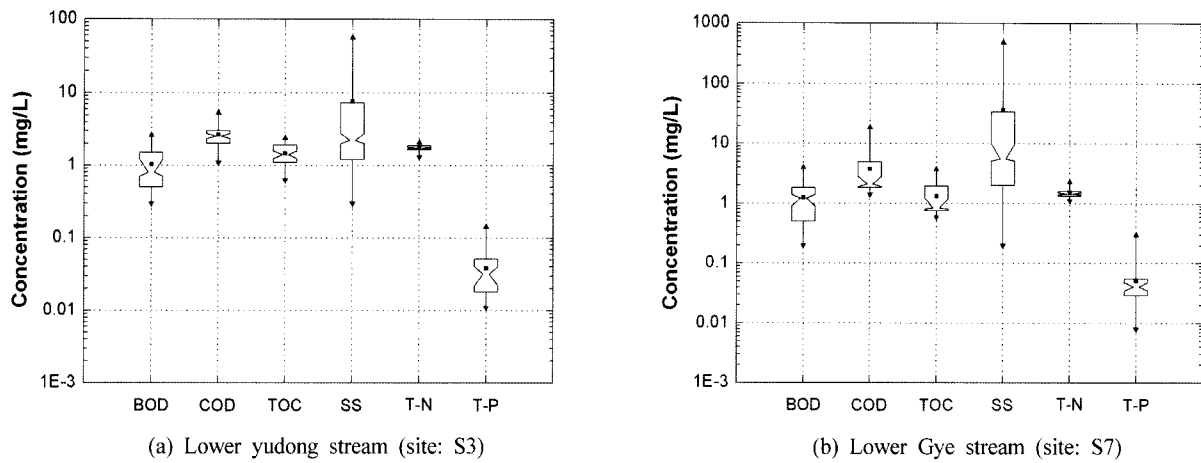


Fig. 5. Statistical analysis for measured pollutant concentrations during rainfall events.

Table 4. EMCs and SMC in each site during rainfall events

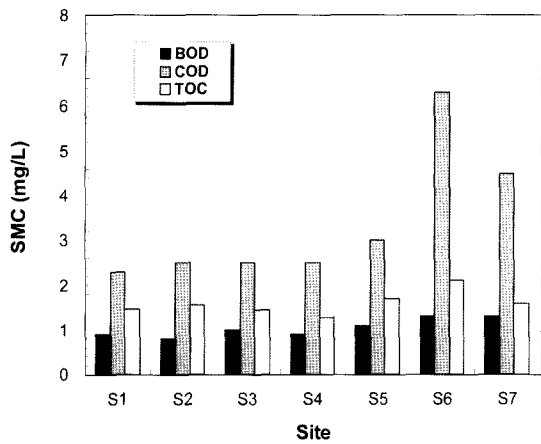
| Item | | BOD ₅ (mg/L) | COD _{Mn} (mg/L) | SS (mg/L) | T-N (mg/L) | T-P (mg/L) | NH ₃ -N (mg/L) | NO ₃ -N (mg/L) | TOC (mg/L) | Turbidity (NTU) | |
|------|-----|----------------------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|--------|
| S1 | EMC | Event 1 | 1.2 | 2.3 | 2.2 | 1.566 | 0.018 | 0.016 | 1.211 | 1.933 | 2.07 |
| | | Event 2 | 0.6 | 3.0 | 8.3 | 1.252 | 0.035 | 0.117 | 0.914 | 1.765 | 4.43 |
| | | Event 3 | 0.4 | 1.7 | 0.4 | 1.338 | 0.037 | 0.036 | 0.970 | 0.672 | 0.43 |
| | | Event 4 | 1.4 | 2.2 | 2.8 | 1.183 | 0.019 | 0.026 | 1.045 | 1.481 | 2.51 |
| | SMC | 0.9 | 2.3 | 3.4 | 1.335 | 0.027 | 0.049 | 1.035 | 1.463 | 2.36 | |
| S2 | EMC | Event 1 | 0.9 | 1.6 | 1.9 | 1.437 | 0.024 | 0.014 | 1.171 | 1.523 | 1.62 |
| | | Event 2 | 0.8 | 4.6 | 35.5 | 1.338 | 0.066 | 0.106 | 1.143 | 1.910 | 27.35 |
| | | Event 3 | 0.4 | 1.9 | 0.4 | 1.484 | 0.042 | 0.041 | 1.207 | 1.066 | 0.43 |
| | | Event 4 | 1.2 | 1.9 | 3.1 | 1.195 | 0.016 | 0.020 | 1.003 | 1.738 | 2.50 |
| | SMC | 0.8 | 2.5 | 10.2 | 1.364 | 0.037 | 0.045 | 1.131 | 1.559 | 7.98 | |
| S3 | EMC | Event 1 | 1.5 | 2.5 | 2.2 | 1.774 | 0.044 | 0.030 | 1.578 | 1.475 | 1.82 |
| | | Event 2 | 0.9 | 3.7 | 16.9 | 1.580 | 0.047 | 0.082 | 1.350 | 2.025 | 8.43 |
| | | Event 3 | 0.4 | 2.0 | 0.9 | 1.679 | 0.020 | 0.058 | 1.267 | 0.967 | 0.88 |
| | | Event 4 | 1.0 | 1.8 | 5.1 | 1.644 | 0.020 | 0.024 | 1.436 | 1.321 | 3.44 |
| | SMC | 1.0 | 2.5 | 6.3 | 1.669 | 0.033 | 0.049 | 1.408 | 1.447 | 3.64 | |
| S4 | EMC | Event 1 | 1.2 | 1.9 | 2.1 | 1.450 | 0.017 | 0.008 | 1.293 | 0.975 | 1.70 |
| | | Event 2 | 0.7 | 4.5 | 22.7 | 1.350 | 0.045 | 0.077 | 0.897 | 2.031 | 12.17 |
| | | Event 3 | 0.4 | 1.6 | 0.3 | 1.424 | 0.013 | 0.056 | 1.202 | 0.846 | 0.55 |
| | | Event 4 | 1.4 | 2.2 | 2.5 | 1.471 | 0.027 | 0.016 | 1.247 | 1.285 | 1.95 |
| | SMC | 0.9 | 2.5 | 6.9 | 1.425 | 0.025 | 0.039 | 1.161 | 1.284 | 4.09 | |
| S5 | EMC | Event 1 | 1.2 | 1.9 | 2.1 | 1.399 | 0.026 | 0.024 | 1.295 | 0.887 | 1.60 |
| | | Event 2 | 0.9 | 4.6 | 50.5 | 1.504 | 0.060 | 0.100 | 1.137 | 2.992 | 25.04 |
| | | Event 3 | 0.5 | 2.4 | 1.2 | 1.492 | 0.018 | 0.021 | 1.278 | 1.140 | 1.33 |
| | | Event 4 | 1.9 | 3.3 | 7.6 | 1.251 | 0.034 | 0.022 | 1.007 | 1.766 | 6.54 |
| | SMC | 1.1 | 3.0 | 15.4 | 1.412 | 0.035 | 0.042 | 1.179 | 1.696 | 8.63 | |
| S6 | EMC | Event 1 | 1.6 | 3.1 | 11.4 | 1.448 | 0.043 | 0.059 | 1.227 | 1.246 | 7.53 |
| | | Event 2 | 1.1 | 9.6 | 172.2 | 1.180 | 0.143 | 0.162 | 0.622 | 3.827 | 144.84 |
| | | Event 3 | 0.5 | 2.8 | 5.3 | 1.117 | 0.042 | 0.019 | 0.932 | 1.591 | 3.65 |
| | | Event 4 | 2.0 | 9.8 | 88.2 | 1.227 | 0.052 | 0.022 | 1.022 | 1.775 | 54.70 |
| | SMC | 1.3 | 6.3 | 69.3 | 1.243 | 0.070 | 0.065 | 0.951 | 2.110 | 52.68 | |
| S7 | EMC | Event 1 | 1.3 | 2.1 | 6.2 | 1.569 | 0.036 | 0.037 | 1.316 | 0.847 | 3.60 |
| | | Event 2 | 1.0 | 7.6 | 115.8 | 1.428 | 0.109 | 0.125 | 0.994 | 1.906 | 87.40 |
| | | Event 3 | 0.6 | 2.3 | 3.2 | 1.419 | 0.028 | 0.057 | 1.171 | 1.107 | 3.48 |
| | | Event 4 | 2.4 | 6.0 | 28.2 | 1.785 | 0.050 | 0.040 | 1.434 | 2.486 | 2.27 |
| | SMC | 1.3 | 4.5 | 38.4 | 1.550 | 0.056 | 0.065 | 1.229 | 1.587 | 24.19 | |

1.284~2.110 mg/L의 범위를 보이고 있으며, 하천의 최상류지점(S4)에서는 낮게, 계천의 지천인 구사천의 조사지점(S6)에서는 높게 나타났으며, 다른 조사지점 간에는 유사한 농도를 보였다.

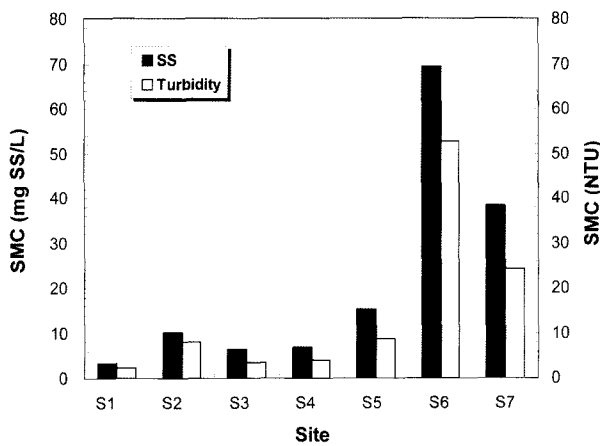
SS와 탁도의 SMC는 각각 3.4~69.3 mg/L, 2.36~52.68 NTU로 비강우시에 비해 높게 나타나 강우에 민감하게 영향을 받는 것으로 보이며, 조사지점간의 차이도 심한 것으로 나타났다. SS와 탁도의 SMC는 COD_{Mn}과 유사하게 유동천에 비해 계천의 조사지점에서 높게 나타났다. T-N의 SMC는 1.243~1.669 mg/L로 비교적 낮은 농도를 보이고 있으며, 청일면소재지가 위치한 유동천의 S3지점에서 가장 높은 농도를 보이고 있고 높은 SS농도를 나타내었던 S6지점에서 가장 낮은 농도를 나타내었다. T-P의 SMC는 0.025~0.070 mg/L로 SS 농도가 높았던 S6지점에서 가장 높은 것으로 조사되었다.

3.2.4. 유출오염부하량

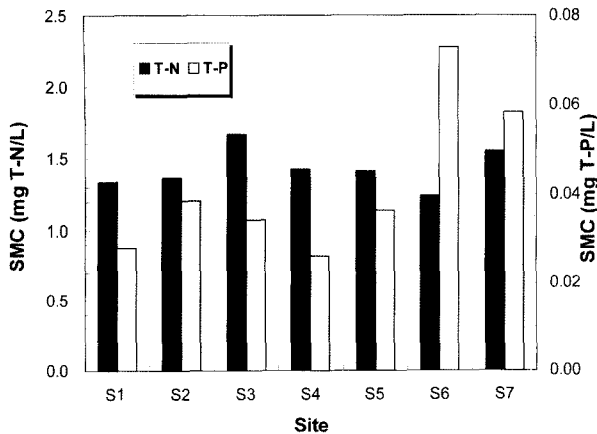
강우시 조사지점별 유출오염부하량은 강우로 인한 순유출부하량에 강우 유출시간으로 나누어 산정하였다. 순유출부하량은 비강우시 측정된 하천의 오염부하량을 기저(background)부하량으로 하고, 강우시 비점오염부하가 가중되는 것을 가정하여 강우시 유출부하량에서 비강우시 유출부하량을 뺀 값으로 산정하게 된다. 그러나 유량이 비강우시와 강우시의 현장조사 시기의 차이와 배수구역이 작은 대상유역특성에 의해 유량의 변동이 심하게 나타나 비강우시 유출부하량(기저부하량)을 산정하는데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 강우시 기저부하량을 산정하기 위해 강우유출수에 영향을 받지 않은 유량 및 수질자료(강우시작과 동시에 유량 및 수질 측정)를 활용하였다. 4회에 걸쳐 조사된 강우시 유출오염부하량을 산정하여 Fig. 7에 나타내었다. 유동천 및 계천상류에서 하류로 갈수록 유출오염부하량이



(a) Organic matters



(b) SS & Turbidity



(c) T-N & T-P

Fig. 6. Comparison of SMC in each site during rainfall events.

증가하는 것을 알 수 있다. 강우사상(Table 1)별 오염유출 특성을 보면 구사천을 포함한 계천(S4~S7)의 경우 강우량, 강우지속시간보다도 선행무강우일수, 강우강도가 유출오염 부하량 증가에 영향이 큰 것으로 파악되었다. 특히 강우강도가 SS 유출오염부하량 증가와 뚜렷한 유의성을 보여 가장 큰 영향인자로 조사되었다. 이에 반해서 유동천(S1~S3)의 경우는 전반적으로 강우강도보다는 강우량이 유출오염 부하량 증가에 영향을 미치나 강우량이 비슷한 경우에는 강우강도가 더 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다.

3.2.5. 조사지점별 오염기여율

Table 5는 강우시 유출오염부하량에 의한 조사지점별 오염기여율을 나타낸 것으로 하류 조사지점 유출오염부하량에서 상류 조사지점 유출오염부하량을 뺀 값에서 전체 유출오염부하량으로 나누어 백분율(%)로 산정하였다. 4회에 걸친 강우시 조사결과 COD_{Mn}, SS, T-P의 유출오염부하증가량이 큰 것으로 조사되었다. COD_{Mn}기준으로 평균 오염기여율을 살펴보면 S6(23.3%) > S3(21.8%) > S1(16.9%) > S2(12.0%) > S5(11.8%) > S7(8.2%) > S4(6.1%) 순으로 나타났다. 조사지점별 오염기여율을 살펴보면, S1지점(유동천상류)은 T-P가 34.6%, S3지점(유동천하류)은 BOD₅와 T-N이 각각 29.0%, 32.9%, S6지점(구사천하류)은 COD_{Mn}, SS가 각각 23.3%, 55.7%로 오염기여율이 가장 높은 것으로 조사되었다.

3.3. 유출오염부하 원단위

횡성호 유역은 전형적인 비도시적 토지이용(산지, 논/밭) 특성을 지니고 있다. 대상유역은 특히 산지의 비율이 80% 정도로 높은 비율을 차지하고 있고 횡성호의 공유수면을 제외한다면 산지비율이 더욱 높아질 것으로 보인다. 그러므로 대상유역은 토지이용 형태별로 볼 때 ‘산지’로 구분될 수 있다. 따라서 횡성호 유역을 ‘산지’의 단일 토지이용으로 보고 실측을 통해 대표지점인 유동천과 계천의 원단위를 산정하여 유역을 대표할 수 있는 유출오염부하 원단위를 도출하였다.

유출오염부하 원단위를 산정하기 위해 유량과 오염부하량을 실측해서 산정하는 방법을 이용하였다. 비강우시 및 강우시 실측조사가 각각 총 4회로 일년동안 연속해서 실측하지 못하였으므로 식 (2)에 나타난 바와 같이 년간으로 환산하는 방법인 유효강우량법으로 유동천과 계천(구사천 포함)에 대해 년간 단위면적당 유출오염부하량을 산정하였다.

$$[\text{비도시지역}]\text{원단위}(\text{kg}/\text{ha}/\text{yr}) = \frac{I_a}{A} \cdot \frac{P_a}{p_a} \quad (2)$$

여기서, I_a는 강우시 총누가오염부하량(kg)에서 비강우시 총누가오염부하량(kg)을 뺀 값이며, A는 배수면적(ha), P_a는 년간 총강우량(mm/yr), p_a는 실측기간 총강우량(mm)이다.

유동천(S3)과 계천(S7)을 대상으로 비강우시 및 강우시 측정된 누가유량에 수질항목별 EMC값을 곱하여 총누가오염부하량을, 년간 총강우량은 2001년부터 2004년까지 4년간 대상유역내 기상관측소에서 관측된 연평균 강우량 1268.8 mm/yr로 산정하였다. 실측기간 유동천과 계천의 총강우량은 각각 186.7 mm, 190.5 mm, 소배수구역 구분에 따른 배수면적은 각각 7,602.8 ha, 8,119.5 ha(구사천 2,443.8 ha 포함)로 조사되었다. 이를 토대로 Table 6에 유동천 및 계천의 년간 단위면적당 유출오염부하량(kg/ha/yr)을 산정하였다. 또한 횡성호 유역을 대표할 수 있는 년간 단위면적당 유출오염부하량은 두 하천의 배수면적을 가중치로 사용하여 면적가중평균으로 산정하였다. 유동천과 계

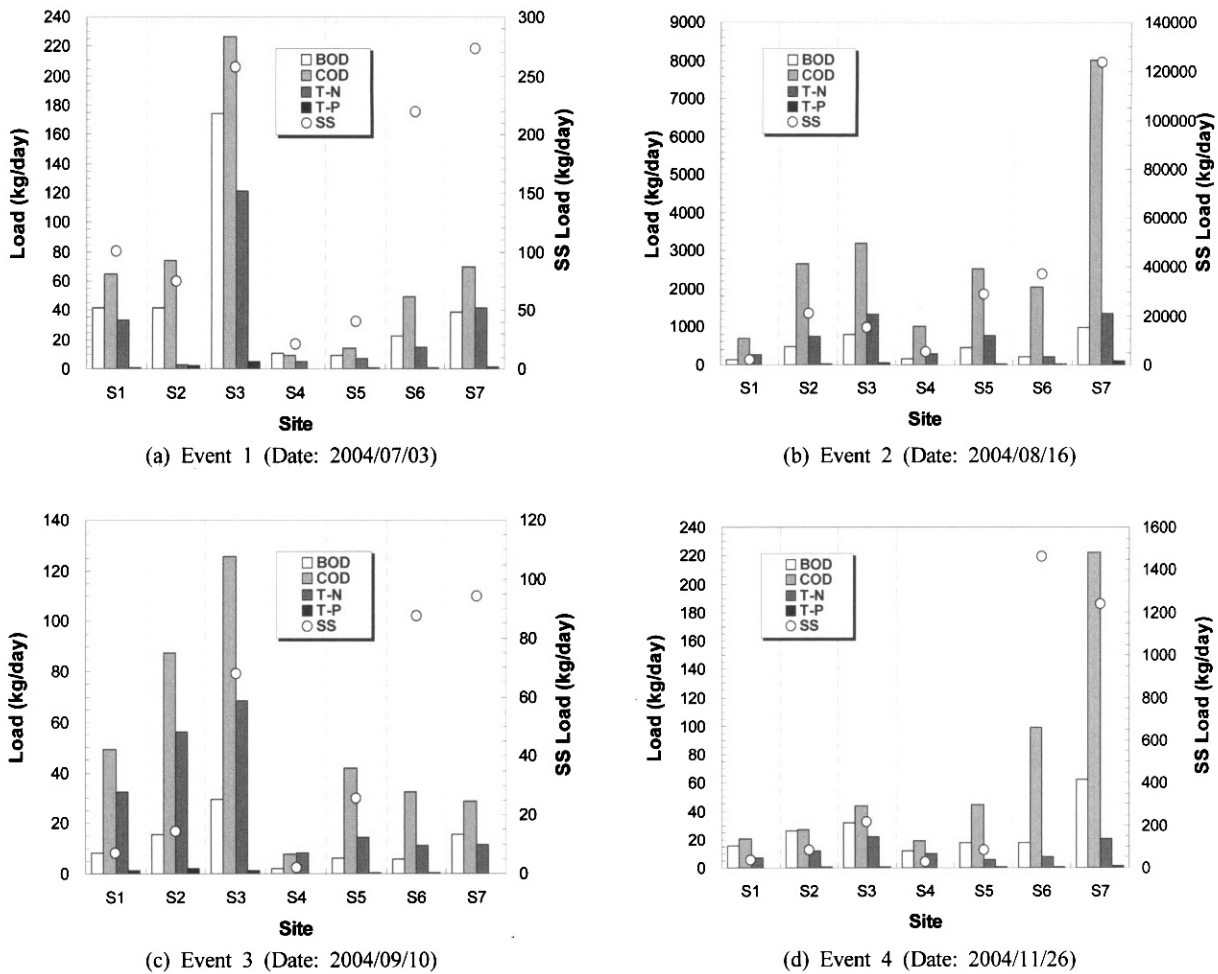


Fig. 7. Comparison of pollutant discharge loads during rainfall events.

Table 5. The contribution ratios by pollutant discharge loads in each site

(Unit : %)

| Site | BOD ₅ | COD _{Mn} | SS | T-N | T-P |
|------|------------------|-------------------|------|------|------|
| S1 | 15.3 | 16.9 | 6.8 | 22.0 | 34.6 |
| S2 | 12.1 | 12.0 | 4.2 | 10.3 | 24.3 |
| S3 | 29.0 | 21.8 | 18.0 | 32.9 | - |
| S4 | 7.8 | 6.1 | 2.7 | 12.0 | 5.5 |
| S5 | 7.9 | 11.8 | 9.8 | 4.1 | 10.7 |
| S6 | 13.6 | 23.3 | 55.7 | 12.3 | 24.9 |
| S7 | 14.3 | 8.2 | 2.7 | 6.3 | - |

Table 6. Annual unit loads of pollutants in Hoengseong watershed

| Watershed | Stream | Unit loads (kg/ha/yr) | | | | |
|------------|--------|-----------------------|-------------------|---------|-------|-------|
| | | BOD ₅ | COD _{Mn} | SS | T-N | T-P |
| Hoengseong | Yudong | 1.365 | 4.683 | 20.535 | 2.008 | 0.063 |
| | Gye | 1.292 | 9.844 | 149.381 | 1.699 | 0.141 |
| | Mean* | 1.327 | 7.349 | 87.075 | 1.848 | 0.103 |

*Mean values are area weighted mean values of Yudong and Gye streams

천의 연간 단위면적당 유출오염부하량에 면적가중평균으로 산정된 횡성호 유역을 대표할 수 있는 유출오염부하 원단위는 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P에 대해 각각 1.327 kg/ha/yr, 7.349 kg/ha/yr, 87.075 kg/ha/yr, 1.848 kg/ha/yr, 0.103 kg/ha/yr로 나타났다.

여러 선행 연구(환경부, 1995, 2000, 2003; 임 등, 1984; 서, 1987)와 본 연구결과를 비교해 Table 7에 나타내었다. 본 연구에서는 소규모 토지이용에 따른 유출오염부하 원단위가 아니라 복합토지형태(산지, 논/밭의 비도시적 토지이용)로서 원단위를 산정하였다. 따라서 상대적으로 이들 값

Table 7. Comparison of the annual unit loads of pollutants for non-urban area

| Land use | Reference sources | Unit loads (kg/ha/yr) | | | | |
|--------------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------|-------|-------|
| | | BOD ₅ | COD _{Mn} | SS | T-N | T-P |
| Complex land | This study | 1.327 | 7.349 | 87.075 | 1.848 | 0.103 |
| | MOE(1995) | 3.5 | 9.3 | 314.7 | 8.02 | 0.52 |
| Forest | MOE(2000) | 3.4 | 7.2 | 333.4 | 1.3 | 0.1 |
| | MOE(2003) | 3.12 | 5.63 | 24.00 | 5.16 | 0.18 |
| Paddy field | Lim(1984) | 18.65 | 62.34 | 16.12 | - | - |
| | MOE(1995) | 8.4 | 22.6 | 71.9 | 23.93 | 2.22 |
| Dry field | Seo(1987) | 6.57 | 32.9 | 350.4 | 12 | 3.98 |
| | MOE(1995) | 5.8 | 16.5 | 293.4 | 34.45 | 0.88 |

과 비교하기는 어려우나 논/밭, 산지지역의 경우와 비교해 볼 때 논/밭보다는 낮게, 산지와는 비슷한 원단위로 조사되었다. 산지면적이 넓은 유역특성을 감안할 때 기존의 토지이용별 원단위범위를 크게 벗어나지 않는 것으로 조사되었다.

4. 결론

본 연구에서는 황성호 유역의 수질보전을 위한 대책수립에 기초자료를 제공하고자 비강우시 및 강우시 오염물질 유출특성 및 유출오염부하 원단위를 산정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 강우시 조사에서 측정된 S3(유동천하류)과 S7(계천하류) 지점의 오염물질 농도를 대상으로 황성호로 유입되는 오염물질의 정량적인 분포를 파악하기 위해 통계학적 분석결과 항목별 오염물질 농도분포가 S7지점이 S3지점보다 큰 범위를 보이고 있어 황성호에 미치는 오염물질 영향이 유동천보다 계천이 큰 것으로 조사되었다.
- 2) 유동천 및 계천 상류에서 하류로 갈수록 유출오염부하량 증가를 보이는 강우사상별 유출오염부하 특성을 살펴보면, 구사천을 포함한 계천(S4~S7)의 경우 강우량보다도 강우강도가, 유동천(S1~S3)의 경우는 강우강도보다도 강우량이 유출오염부하량 증가에 영향을 미치나 강우량이 비슷한 경우에는 강우강도가 더 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다.
- 3) 강우시 유출오염부하량에 의한 조사지점별 오염기여율을 살펴보면, S1지점(유동천상류)은 T-P가 34.6%, S3지점(유동천하류)은 BOD₅와 T-N이 각각 29.0%, 32.9%, S6지점(구사천하류)은 COD_{Mn}, SS가 각각 23.3%, 55.7%로 오염기여율이 가장 높은 것으로 조사되었다.
- 4) 유동천과 계천의 연간 단위면적당 유출오염부하량에 면적가중평균으로 산정된 황성호 유역을 대표할 수 있는 유출오염부하 원단위는 BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P에 대해 각각 1.327 kg/ha/yr, 7.349 kg/ha/yr, 87.075 kg/ha/yr, 1.848 kg/ha/yr, 0.103 kg/ha/yr로 나타났다.
- 5) 황성호 유역의 비강우시 및 강우시 오염물질 유출특성 조사를 통해서 하천별 유출특성을 파악하였으며, 오염원에 대한 유출부하량 및 조사지점별 오염기여율 산정을 통해서 오염기여율 예측 및 수질개선효과에 기여하고 향후 비점오염저감사업 대상지의 선정, 오염원 관리를 위한 기술 및 제도적 관리방안 마련 등을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

6) 본 연구는 5개월의 짧은 조사기간과 적은 조사회수로 인해 황성호 유역의 비점오염물질 유출특성을 정확히 파악하기에는 부족하다고 판단된다. 따라서 지역과 시기에 따른 강우사상, 토지이용형태, 지형 및 지질특성 등의 여러 가지 요소에 따라 다양하게 배출되는 비점오염원의 특성상 황성호 유역의 유출오염부하 원단위 결정을 위해서는, 향후 장기적인 강우사상 및 수질조사 자료 축적, GIS를 고려한 토지이용형태, 지형 및 지질특성의 자료축적 등이 필요하며, 이를 위해 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 '황성호 비점오염저감 및 수질보전 종합대책 수립'에 관한 것으로 연구비를 지원한 한국수자원공사에 감사드립니다.

참고문헌

- 경기도보건환경연구원, 비점오염원 관리방안 (2001).
 김영철, 이재수, 강우시 유출특성에 따른 유출오염물질 농도 곡선의 형상, *대한환경공학회지*, **24**(4), pp. 633-645 (2002).
 노성덕, 이대근, 전양근, 도로상의 비점오염물질 저감을 위한 초기 우수유출수 처리에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 525-533 (2004).
 서윤수, 수역의 적정환경기준 설정에 관하여, *국립환경연구원보*, **9**, pp. 133-153 (1987).
 안재환, 비도시지역에서 강우사상에 따른 비점오염원 유출 특성 연구, *건설기술정보*, pp. 18-23 (2000).
 이상훈, 조옥상, 소하천의 오염부하량이 수질에 미치는 영향에 관한 연구, *환경영향평가학회지*, **10**(1), pp. 9-19 (2001).
 임봉수, 이병현, 최의소, 도시와 농촌에서의 비점원 오염물 배출양상에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, **4**(2), pp. 46-53 (1984).
 한국수자원공사, 대청댐 일원 수문기초조사 보고서 (2002).
 한국수자원공사, 대청댐 비점오염 저감방안 수립, pp. 77-187 (2004a).
 한국수자원공사, 황성댐 일원 하천유량측정등 수문기초조사 보고서 (2004b).

- 환경부, 낙동강수계 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사 사업 보고서 (2003).
- 환경부, 비점오염원 조사연구사업 보고서 (1995).
- 환경부, 수질오염 공정시험법 (1999).
- 환경부, 팔당상수원 비점오염원 최적관리사업 타당성 조사 및 기본계획수립 보고서 (2000).
- APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, Washington D.C., USA (1998).
- Bedient, P. B., Lambert, J. L., and Springer, N. K., Stormwater Pollution Load-runoff Relationship, *J. WPCF*, **52**(9), pp. 2396-2404 (1980).
- Ichiki, A., and Yamada, K., Study on Characteristics of Pollutant Runoff into Lake Biwa Japan, *Water Sci. Technol.*, **39**(12), pp. 17-25 (1999).
- Novotny, V. and Chesters, G., *Handbook of Nonpoint Pollution: Sources and Management*, Van Nostrand Reinhold CO. N. Y., pp. 312-390 (1981).