

# 토지이용에 따른 부유토사 유출 평가

## Estimation of Suspended Sediment Runoff for Landuse

김 주 훈\* / 오 덕 근\*\* / 김 경 탁\*\*\*

Kim, Joo-Hun / Oh, Deuk-Kun / Kim, Kyung-Tak

### :: Abstract ::

Sediment yield and sediment transport in a basin bring about decrease of conveyance by the change of bed section, and have an influence on an aggravation of water quality and freshwater ecosystem. This study is to analyze the characteristics of outflow sediment according to land-use in Mushim-cheon flowing through forest area, farmland area and urban area. The upper stream of Mushim-cheon consists of forest area and farmland area. The suspended sediment is observed through 10 rainfall events in 5 sites. As a result of analyzing characteristics of landuse, the site of Bangse-gyo takes up 69% of Mushim-cheon, and farmland area(27.1%) and forest area(63.7%) take up 90.8% in Bangse-gyo. Accordingly, these two areas have the high possibility to occur sediment. The suspended sediment of this site shows the highest concentration. Transferring to the downstream and the urban, the concentration of suspended sediment gets decreased. The suspended sediment occurred in the upper stream of Mushim-cheon prior to Bangse-gyo has an influence on the downstream, and has a slight influence on the urban area. Also relational formula about suspended sediment and discharge is led. As a result of this formula,  $R^2$  is 0.506 in the upper stream and is 0.656 in the downstream.

**Keywords:** Suspended Sediment, Discharge, Landuse, Mushim-cheon

### :: 요 지 ::

유역의 토사발생은 하상 변동 등에 의한 하천의 통수 단면 감소 등을 유발하며 하천수질 악화와 담수생태계에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 산지 및 농경지 유역과 도시유역의 관류하는 무심천 유역에서 유역의 토지이용 특성에 따른 부유토사의 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 무심천 상류는 농경지와 산림지역으로 구성되어 있다. 부유토사량은 10개의 강우사상에 대

\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부·공학박사·e-mail: jh-kim@kict.re.kr

\*\* 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료·공학석사

\*\*\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부·공학박사·e-mail: ktkim1@kict.re.kr

하여 5개 지점에 대하여 관측하였다. 토지이용특성 분석결과 방서교 유역은 전체 무심천 유역의 69%의 면적을 차지하며 이중에서 농경지(27.1%)와 산림지역(63.7%)이 방서교 상류의 90.8%를 차지하고 있다. 이에 따라 이 지역에서 유사량이 많이 발생될 것으로 판단되었다. 하류 도시지역을 통과하면서 부유사량 농도는 감소하였다. 무심천 유역의 부유사량 농도는 유역 상류 지역인 방서교지점 이전에서 영향을 받고 이후 하류의 도시지역에서의 영향은 미미한 것으로 나타났다. 또한 부유사량과 유출량 관계식을 유도하였으며  $R^2$ 는 상류지역이 0.506이었고, 하류지역에서는 0.656이었다.

**핵심용어:** 부유사량, 유출량, 토지이용, 무심천

## 1. 서론

유역의 토사발생은 토지이용변화, 식생의 파괴 및 훼손 등 유역 환경에 많은 변화를 가져오며 지형학적 변화를 초래하게 된다. 또한 토사매물이나 하상 변동 등에 의한 하천의 통수 단면 감소 등을 유발하며 하천수질 악화와 주변 식생의 파괴와 같은 재해도 초래한다.

유역의 토사 발생량을 정확하게 추정하는 방법은 아직 없으며, 토사발생에 관한 연구는 주로 Wischmeier와 Smith(1978)에 의해 농경지에서의 강우-유출에 의한 토사유출량을 산정하기 위해 제안된 범용토양유실방정식(Universal Soil Loss Equation : USLE)에 의한 연구가 많이 진행되고 있다.

모토양으로부터 토립자의 이탈은 기본적으로 빗방울의 충격능, 지표면 흐름의 전단력, 토양입자의 이탈 용이성, 빗방울의 충격력과 지표면 흐름의 전단력을 감소시킬 수 있는 물질의 존재 유무, 토양의 보존력 등에 영향을 받는다. 이탈된 토립자의 운반은 지표면 흐름의 운반력(transport forces), 토립자의 운반 용이성, 토립자의 운반을 억제할 수 있는 물질의 존재유무 등에 영향을 받는다. 토립자의 이탈은 많은데 이를 하류로 운반할 수 있는 운반능력(transport capacity)이 부족하면 운

반능이 토양유실과 유사발생을 좌우하는 제한 인자가 된다. 반면에 운반능력은 충분한데 토립자의 이탈이 작으면 토립자 이탈과 유출수의 운반능력이 최소화 되도록 경지를 관리하는 것이 표토유실을 방지하는 가장 중요한 핵심이 된다.

유사전달은 지표면의 경사, 토양의 입도분포와 밀도, 토지이용 상태, 지형적인 조건, 유량 등에 의해 결정되는 것으로서 침식량의 75%정도는 침식지역 근방에서 바로 퇴적된다(Forest Service, 1965; Williams와 Berndt, 1972). 토양유실에 따른 유사전달에 대한 연구에서 Hadley와 Shown(1976)은 여러 소유역(0.5 ~ 5.2km<sup>2</sup>)에서의 침식유사 입자의 이송량이 30% 정도라고 발표하였으며, Wade와 Heany(1978)는 미국의 농업 지역의 105개 유역에서의 유사전달률이 1%에서 38%에 이른다고 발표한 바 있다.

충적하천이 일반 수로와 크게 다른 것 중 하나는 충적하천에서는 물 이외에 부수적으로 유사(泥沙)가 이송된다는 것이다. 따라서 충적하천에서 유사량을 예측하는 문제는 개수로에서 유량을 예측하는 문제만큼 공학적으로 중요한 의미를 지니고 있다. 사실상, 하천유사에 관계된 연구나 실무에서의 1차적인 목적은 하천의 수리변량과 하상도의 특성을 가지고 유사량을 추정하

는 것이다(한국건설기술연구원, 1989).

토사발생량 및 이송에 관계된 국내의 연구로는 건설부(1991)에서 "댐설계를 위한 유역단위 비유토사량 조사·연구"에서 비유토사량 자료와 경험공식을 이용하여 분석한 바 있으며, 국립방재연구소(1998)에서는 개발에 따른 토사 유출량 산정에 관한 연구를 수행한 바 있다. 박종관(1994)은 산지소유역에 대하여, Sediment Rating Curve 방법을 이용하여 부유토사 유출량을 산정하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 산지 및 농경지 유역과 도시 유역의 관류하는 무심천 유역에서 유역의 토지이용 특성에 따른 유출토사의 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 부유토사

### 2.1 부유토사(Suspended Sediment)

토사유출의 주요 근원은 농경지, 건설 현장, 시가지 등의 비점오염원이다. 부유토사를 발생시키는 주요원인은 다음과 같다.

- (1) 자연침식 : 토양 및 암석의 풍화과정, 지질학적 침식 등
- (2) 농경지 : 농업활동에 의한 지표면의 인위적인 교란에 의한 침식
- (3) 도시지역 : 건설현장 및 지표면 토양이 노출된 지역
- (4) 하천 및 해안, 하안 : 제방과 같은 수면과 지표면의 경계부분

건설공사 현장은 단위 면적당 유출량이 가장 커서 연간 유실토사량이 500ton/ha/yr까지 이르기도 하지만(권순국, 1998), 전체 면적은 농경지가 더 많다. 특히 경사가 큰 고랭지 채소밭의 토양침식은 매우 커서 상류지

역의 주요 오염원으로 지목되고 있다. 표토가 침식된 경사지 밭에 객토 작업을 하여 새로운 토양이 첨가되는 경우에는 불안정한 토양과 높아진 지면으로 인하여 침식이 더욱 커진다.

농경지에서 유출되는 토사는 토양입자 표면에 인, 농약 등의 오염물질을 흡착하고 있으므로 토목공사 현장이나 산림에서 유출되는 토사에 비해 수질에 미치는 악영향이 더 크다. 농경지에서 탁수가 발생할 때는 항상 인의 농도가 높고 유기물의 농도도 갈수기에 비해 증가한다.

부유토사는 단순히 광물질로서 토립자의 의미뿐만 아니라, 다른 여러 가지 오염물질의 운반 매개체로서의 역할을 하기 때문에 중요하다. 토양침식에 의해 토사는 지표수와 더불어 하천에 유입되는데 하천의 유역 말단부에서 측정되는 토사의 양을 유사발생량(sediment yield)이라 한다. 유역내에서 발생한 침식량(A)에 대한 유사량(Y)의 비를 유실토사량의 도달률(delivery ratio, DR)라고 한다.

$$DR = Y/A \quad (1)$$

도달률은 이론적으로 0~1의 값을 가지나 하천제방에서 발생하는 침식량이 있는 경우에는 1보다 큰 값을 보일 수 있다(권순국 등 1998).

지표면에서 일단 침식된 토립자는 지표수에 의하여 이동되는데 지형조건에 따라 지표면에 다시 침식하기도 하며, 지표수의 운반에너지가 커지면 다시 침식되어 하류부로 이송된다. 부유토사의 입자조성을 원 지표면 토양과 다르게 되는데 이는 점토질 입자와 같은 미세한 입자가 굵은 입자보다 쉽게 이동하기 때문이

다. 이러한 특성을 나타내기 위해서 원 지표면 토양에 대한 부유토사의 입자 분포나 비표면적 또는 오염물질 농도의 비를 부옥도(enrichment ratio, ER)라고 하며 1.1~3.0의 값을 가지나 그 변화량은 대단히 크다(권순국, 1998).

## 2.2 유출량과 부유토사의 관계

유출량에 따른 부유토사의 농도는 동일한 유출량 값에 대하여 상당히 분산되어 나타나며 이는 유출시의 강우조건에 의한 하천 유출의 특성에 기인하는 것으로 알려져 있다. 한편 유출곡선의 상승부와 하강부의 수위별 유량과 부유토사 농도의 관계를 보면, 동일한 유량에서 항상 상승부의 부유토사의 농도가 하강부의 그것과 비교하여 볼 때 높은 값을 갖고 있다. 이는 측정오차가 아니며 履歷效果가 부유토사에 반영된 결과인데 이러한 현상은 일반적으로 자연유역에서 발생한다(Walling, 1974; Wood, 1977; Park, 1992).

유출량과 부유토사 농도와의 관계는 다음 식과 같이 표시된다.

$$C = kQ^n \quad (2)$$

여기서,  $C$ 는 부유토사농도(mg/l),  $Q$ 는 유량(l/sec), 그리고  $k$ ,  $n$ 는 계수이다.

식(2)의  $Q$ 와  $C$ 의 관계는 주로  $n$ 값에 의해 결정되는데 이  $n$ 값의 변화는 유역의 크기, 사면경사, 식생, 인간활동의 여부에 의해 결정된다(Collins, 1981).

## 3. 조사 지역 및 자료 수집

### 3.1 연구대상 유역

청주시의 중심을 관류하는 무심천은 청원군 남일면과 낭성면의 경계에 있는 선도산에서 발원하여 곳곳에 범람원을 형성시키면서 금강의 제1지류인 미호천과 합류하는 지방 2급하천으로 유역의 토지이용 형태는 그림 2의 유역의 토지이용현황도와 같이 상류지역이 산지 및 농경지 지역이고, 중류부는 청주시의 도시 지역으로 구성되어 있다. 무심천의 지류로는 월운천, 영운천, 명암천 및 울량천이 합류한다(그림 1).

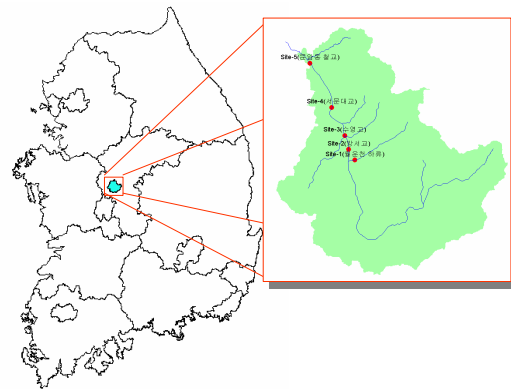


그림 1. 대상 유역 및 관측지점

### 3.2 자료수집

본 연구에서는 유역의 특성에 따른 부유토사의 이송 형태를 파악하기 위하여 산지 및 농경지가 발달한 상류유역, 도시유역, 그리고 도시유역 하류부로 구분하여 자료를 수집하였다(표 1).

자료수집 지점은 5개 지점으로 구분하였으며, 상류의 산지 및 농경지 유역에 해당하는 월운천 하류지점, 청주시로 유입되기 전인 방

표 1. 관측지점별 소유역 면적(km<sup>2</sup>)

지점번호	관측지점	소유역면적	누가면적
1	월운천 하류	12.06	12.06
2	방서교	110.41	122.47
3	수영교	29.23	151.79
4	서문대교	11.34	163.13
5	문암동철교	19.03	182.16

표 2. 관측지점별 관측횟수

지점번호	시점	종점	지점별 관측횟수
1	2003/6/26	2003/6/27	1-0, 2-3, 3-3, 4-3, 5-3
2	2003/7/03	2003/7/03	1-0, 2-4, 3-4, 4-4, 5-4
3	2003/7/09	2003/7/10	1-7, 2-7, 3-0, 4-0, 5-5
4	2003/7/17	2003/7/18	1-6, 2-6, 3-6, 4-6, 5-6
5	2003/7/22	2003/7/23	1-0, 2-0, 3-0, 4-0, 5-30
6	2003/7/24	2003/7/29	1-8, 2-8, 3-0, 4-0, 5-18
7	2003/8/07	2003/8/12	1-5, 2-4, 3-4, 4-0, 5-5
8	2003/8/16	2003/8/19	1-13, 2-14, 3-14, 4-0, 5-14
9	2003/8/23	2003/8/25	1-6, 2-8, 3-0, 4-0, 5-9
10	2003/9/12	2003/9/13	1-11, 2-10, 3-0, 4-0, 5-11

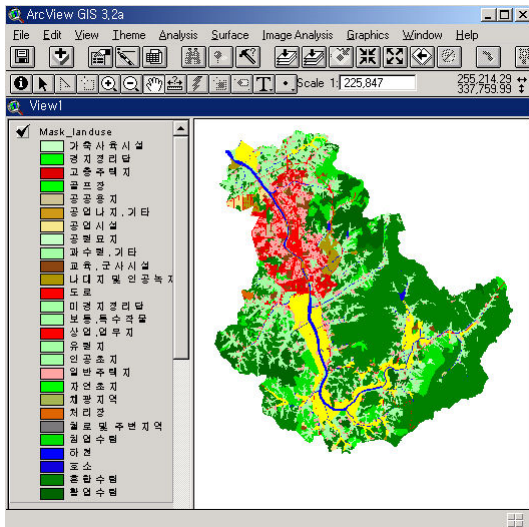


그림 2. 무심천 토지이용현황도

서교 지점, 청주시까지 구간인 수영교 지점 및 서문대교지점, 그리고 무심천 하류부인 문암동 철교 지점으로 구분하여 약 2시간 간격으로 총 10개의 강우사상에 대하여 269회에 걸쳐서 자료를 수집하였다.

## 4. 분석

### 4.1 토지이용특성 분석

무심천 유역의 토지이용특성 분석 결과 월운천 측정지점(1지점)은 농경지(15.9%)와 산림(68.1%)이 전체 면적의 84%를 차지하는 유역으로 유역의 토사발생이 많을 것으로 추측되며(그림 4), 방서교 지점(2지점)은 전체 무심천 유역면적의 69%정도를 차지하는 반면에 농경지역(27.1%)과 산림지역(63.7%)의 비율이 90.8%를 차지하고 있어 토사가 발생할 가능성이 가장 높은 지역이다(그림 5).

전체 유역 중에서 방서교 지점 하류에서부터 5관측지점인 문암동 철교지점까지의 면적은 약 59.6 km<sup>2</sup>이고(그림 6) 이 중 도시지역이 차지하는 비율이 전체 면적의 40.25%로 분석되어 상류 유역의 토지이용 특성과는 다른 양상을

보였다(표 3). 또한 청주시는 하수관거가 합류식 하수관거로 강우 초기의 우수는 무심천에 유입되지 않아 무심천의 부유토사에는 그 영향이 미미할 것으로 판단된다.

따라서 무심천 유역의 부유토사 발생은 상류 유역인 방서교 상류 유역의 토지이용 특성이 무심천 유역의 부유토사 농도에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

### 4.3 부유토사 유출 분석

무심천 유역의 부유토사 유출량을 분석하기 위하여 홍수기 초기인 6월 26일부터 홍수기 말기인 9월 12일까지 10차례에 걸쳐 5개 지점에 대하여 약 2시간 간격으로 부유토사 유출량을 수집하여 부유토사량을 분석하였다.

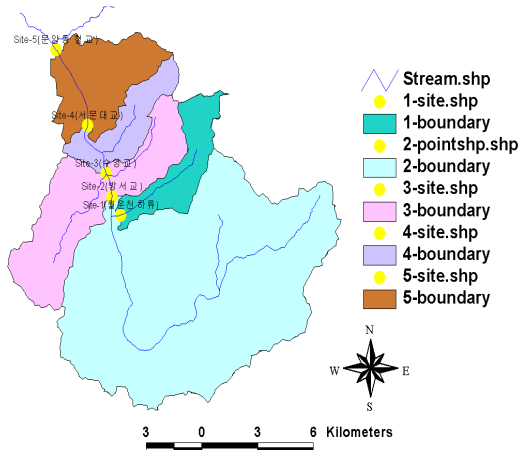


그림 3. 소유역 분할

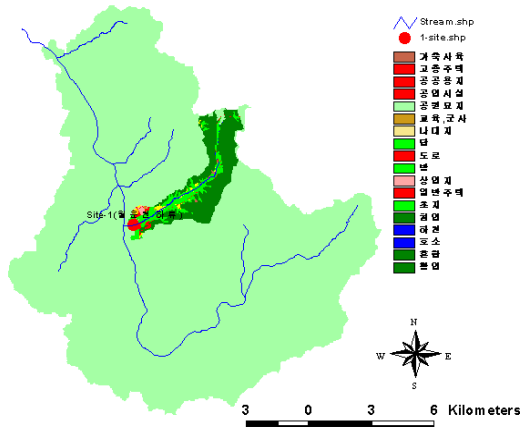


그림 4. 월운천 상류지역 토지이용현황도

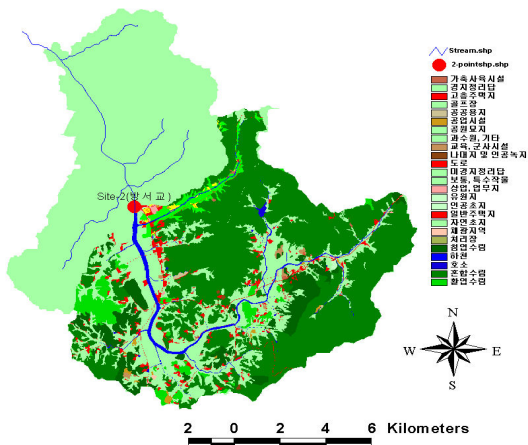


그림 5. 방서교 상류지역 토지이용현황도

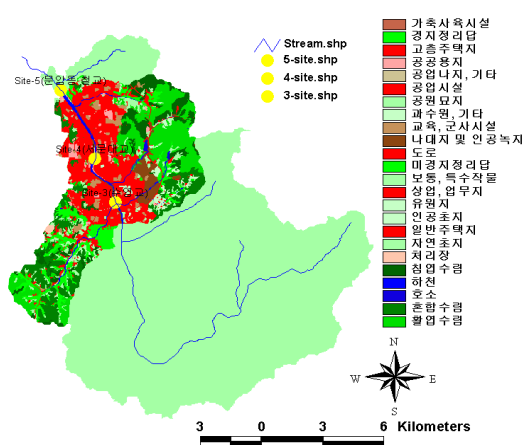


그림 6. 방서교 ~ 문암동 철교 토지이용현황도

표 3. 지점별 토지이용현황(%)

소유역	농경지	산림지역	도시지역	기타
월운천	15.9	68.1	7.20	8.2
방서교 상류	27.1	63.7	5.04	4.16
방서교 하류 -문암동 철교	19.0	38.4	40.25	2.35

분석결과 그림 7~그림 11에서 보는바와 같이 홍수기가 시작되는 시점(1차 측정기간)에서의 토사유출이 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 월운천 유역의 제 10차 측정시기의 부유토사 농도가 높게 나타나는 것은 측정 당시 하천 공사가 진행중에 있어서 이것의 영향인 것으로 판단된다.

그림 8은 월운천 측정지점 하류부가 무심천과 합류한 후인 방서교 지점에서의 수문곡

선과 부유토사 농도 곡선으로 강우 초기의 부유토사의 농도가 2000 mg/l를 넘게 이송되는 것으로 나타났다. 그러나 이후 그림 9 및 그림 10에서 보는바와 같이 도시지역인 수영교(3지점), 서문대교(4지점)를 거치면서 부유토사의 농도가 약간씩 감소하는 것으로 나타났고, 무심천 하류지점인 5지점(그림 11)에서의 부유토사의 농도가 오히려 작아지는 것으로 나타났다.

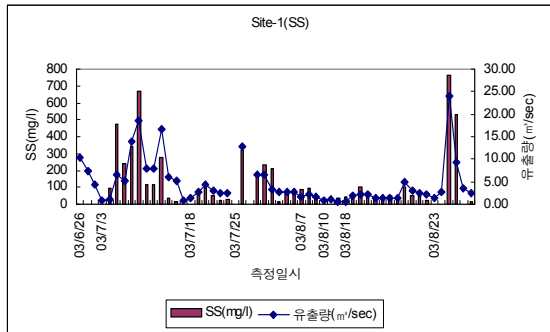


그림 7. 유출 및 부유토사 수문곡선(지점 1)

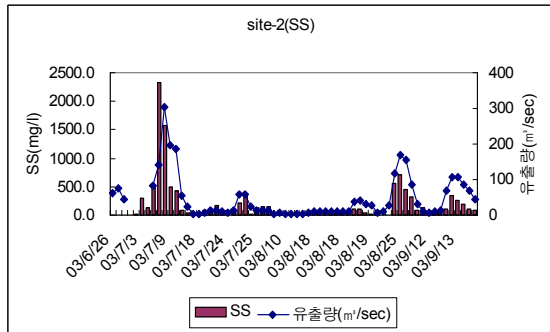


그림 8. 유출 및 부유토사 수문곡선(지점 2)

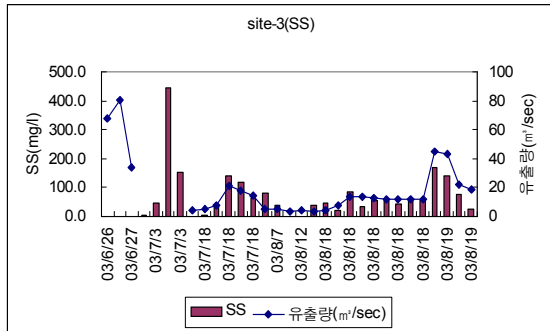


그림 9. 유출 및 부유토사 수문곡선(지점 3)

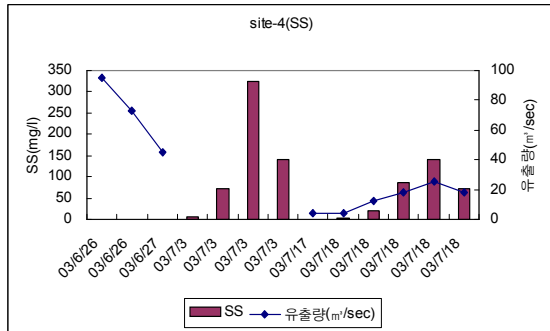


그림 10. 유출 및 부유토사 수문곡선(지점 4)

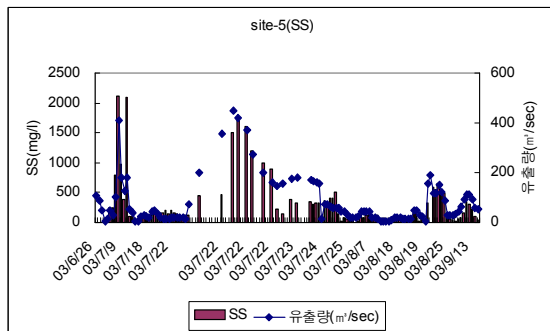


그림 11. 유출 및 부유토사 수문곡선(지점 5)

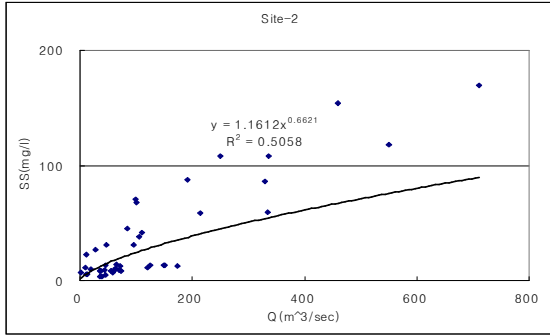


그림 12. 부유토사 ~ 유출량 관계(지점 2)

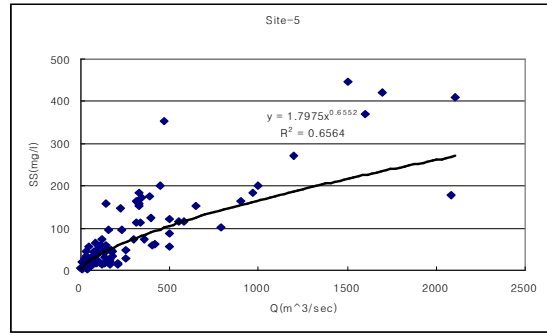


그림 13. 부유토사 ~ 유출량 관계(지점 5)

표 4. 부유토사 ~ 유출량 관계

지점	k	n	R <sup>2</sup>
2지점(방서교)	1.1612	0.6621	0.5058
5지점(문암동 철교)	1.7975	0.6552	0.6564

이것은 청주 도시지역을 지나오면서 유역에서의 토사발생량이 상대적으로 적게 나타나는 도시지역이 합류하여 오히려 유출량이 증가하는데 반해 토사발생이 적고, 따라서 이송되어 나오는 부유토사량도 적어진 것이 이와 같은 결과를 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

홍수기 초기의 부유토사 농도가 전 지점에 걸쳐서 고르게 높게 나타났으며, 이는 여름철 우기가 시작되는 시점으로 선행강우의 영향을 크게 받는 것으로 분석되었다.

또한 2지점(방서교)의 경우 최고 유출량 및 부유토사 농도가 약  $141m^3/sec$ 에서  $2,320.0 mg/l$ 로 나타나 무심천 유역의 부유토사량은 상류 유역의 영향을 크게 받는 것으로 분석되었다.

#### 4.3 유출량과 부유토사 농도 관계 분석

무심천 유역의 유출량과 부유토사 농도 관계는 5개의 관측지점 중에서 비교적 관측자료가 많은 방서교 지점(2지점)과 문암동 철교 지점(5지점)의 관측자료를 이용하여 분석하였다.

식(2)와 같이 나타낸 유량~유사량 관계곡선식은 그림 12, 그림 13 및 표 4와 같다.

부유토사 농도는 동일한 유량값에 대하여 상당히 분산되어 나타나는데 방서교 지점의 경우 유출량 약 350CMS에서 60~110mg/l 정도로 큰 편차를 보이고 있다. 이러한 분산은 출수시의 강우조건에 의한 하천 유출특성에 기인한다. 식(2)의 Q와 C는 주로 n의 값에 의해 결정되는데 이 n값의 변화는 유역의 크기 사면경사, 식생, 인간활동의 여부에 결정된다(Anderson, 1954; Collins, 1981). 그러나 n값이 동일한 유역에서 강우의 규모와 관련되어 어떻게 변화하는가에 대한 연구는 아직 알려져 있지 않다.

### 5. 결론

본 연구에서는 산지지역 및 농경지 지역 그리고 도시지역을 관류하는 무심천 유역에서 토지이용 특성에 따른 유출토사의 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

유역의 토지이용 특성을 분석결과 무심천



전체 유역면적의 69%를 차지하는 방서교 상류지역에서 농경지 및 산림지역의 토지이용 특성이 90.8%인 반면, 방서교 하류지역에서의 주거 및 상업, 공업지역 등 불투수면적 비율이 40.25%로 방서교 상류지역이 무심천 유역의 부유토사 농도에 영향을 클 것으로 판단되었다.

분석결과 홍수기 초기의 부유토사 농도가 전 지점에 걸쳐서 고르게 높게 나타나 선행강우의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

방서교 지점의 부유토사가 농도가 높게 측정되었고, 이후 도시지역을 관류하면서 문암동 철교까지 점차로 부유토사의 농도가 감소하는 것으로 나타나 실제로 무심천의 부유토사 농도는 방서교 지점 상류의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

무심천 유역에서의 부유토사의 영향은 도시지역에서의 영향보다는 산림 및 농경지역에서의 영향이 큰 것을 나타냈으며, 하천으로의 부유토사의 유입을 저감하는 방안으로 표토층 보호, 식생조성, 잔디 식재 등으로 빗물이 떨어지는 충격을 완화시키고 강우로 인한 침식물의 유출의 최소화시키는 방법 등 식재에 의한 표면 안정화 방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 공공기술연구회의 일반연구사업(사업명 : 위성자료 공공활용 연구 - 위성영상을 이용한 하천정보생산 및 활용에 관한 연구)의 연구비 지원과 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-2-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국립방재연구소(1998). 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I)
- 권순국, 김복영, 김진수, 김태철, 윤춘경, 정재춘, 홍성구(1998). 지역환경공학, 향문사, pp116.
- 김범철, 전만식, 최종수(2003). 상수원지역의 비점오염원 관리, 2003년 세계 물의 해 기념-지속가능한 물 이용을 위한 심포지움, pp179-214.
- 박종관(1994). SRC Method에 의한 산지 소유역의 부유토사 유출량 산정, 한국지형학회지 제1권 창간호, pp17-31.
- 한국건설기술연구원(1989). 하천 유사량 산정방법의 선정기준 개발
- 한국건설기술연구원(1992). 댐설계를 위한 유역단위 비유사량 조사연구.
- Anderson, H.W.(1954). Suspended sediment discharge as related to stream-flow, topography, soil, and landuse. *In: Erosion and Sediment Yield, Benchmark Papers in Geology*, 63. 161-174.
- Collins, M.B.(1981). Sediment yield of headwater catchments in Sussex. S.E. England *Earth Sur. Pro. Land.*, 6, 517-539.
- Forest Service(1965). Notes on Sedimentation Activities, *United States Bureau of Reclamation, Denver, Colo., U.S.A.*,
- Hadley, R.F., and L.M. Shown(1976). "Relation of erosion to sediment yield", *Proceedings Third Federal*

- Inter-agency Sedimentation Conference*, Denver, CO, U.S. Water Resources Council, Washington, DC, pp.1-132~1-139.
- Park, J. K.(1992). Suspended sediment transport in a mountainous catchment. *Science Rep. Ins. Geoscience*, Univ. Tsukuba, Section A, 13, 137-197.
- Wade, J.C, and E.O. Heany(1978). "Measurement of sediment control impact on agriculture", *Water Resources Res.* 14:1-8
- Walling, D. E.(1974). Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. In; *Fluvial Processes in Instrumented Watershed*, Ins. British Geogr. Special Publ. no. 6, 169-192.
- Williams, J.R., and H.D. Berndt(1972). "Sediment Yield Computed with Universal Equation", *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 98, No. HY12, Proc. Paper 9426, pp. 2087-2098.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith(1978). "Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning", *USDA, Agriculture Handbook* No. 537.
- Wood, P. A.(1977). Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England. *Sedimentology*, 24, 437-445