

## 대기천 유역에서의 강우기 유량-SS배출 특성 및 원인분석 연구

김종건·이수인\*·박병기·원철희\*\*·금동혁·최중대†

강원대학교 지역건설공학과  
\*국립환경과학원 유역총량연구과  
\*\*동성엔지니어링(주)

### Analysis of flow rate-SS discharges characteristics and causes during rainfall season in Daegi-cheon Watershed

Jonggun Kim·Suin Lee\*·Byeongki Park·Chulhee Won\*\*·Donghyuk Kum·Joongdae Choi†

Department of Regional Infrastructure Eng., Kangwon National University

\*Watershed and Total Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research

\*\*Dongsung Engineering Co., Ltd.

(Received : 10 October 2018, Revised: 02 January 2019, Accepted: 23 January 2019)

#### 요약

대기천 유역은 한강 상류에 위치하고 있으며, 대표적인 고랭지 채소재배단지 중의 하나로 강우기 대규모 탁수를 배출하여 한강 상류의 수질 및 수생태계에 심각한 영향을 미치고 있다. 효과적인 탁수관리 및 정책제안을 위해서는 강우기 하천유량과 탁수(SS)농도의 특성 및 원인분석이 우선시되어야 한다. 본 연구에서는 대기천 유역을 대상으로 강우기 유량과 SS농도 사이의 관계를 분석하고 이를 통해 탁수발생 특성을 분석하였다. 연구 결과 보통의 홍수유량상태에서는 다양한 주변 환경요소로 인해 임의적으로 변화하는 것으로 나타났다. 반면, 침투홍수량상태에서는 SS농도가 매우 높게 나타났으며, 이는 현장방문관측을 통해 농경지 발생원뿐만 아니라 침투홍수량에 따른 가파른 계곡과 사면의 붕괴에 의한 영향이 크게 기여한 것으로 판단된다. 따라서 통상적인 발생원관리대책과 함께 경지주변 사면안정과 하상유실을 제어할 수 있는 구조적 최적관리방법이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 대기천, SS 농도, 홍수유량, 구조적 최적관리방법, 발생원관리

#### Abstract

The Daegi-cheon watershed is located in the upper part of the Han River, which has the representative highland vegetable growing complexes. This watershed has a large impact on the water quality and aquatic ecosystem in the upstream of the Han River by discharging a large amount of turbid water during rainfall season. For proposing an efficient turbid water management and policy, the analysis of the characteristics of flow rate and SS and its causes needs to be carried out preferentially. In this study, the relationship between flow rate and SS concentration was analyzed in the Daegi-cheon watershed, and in turn the turbidity characteristics were analyzed. As a result of the study, in the normal flood flow condition, it was shown that SS concentration changed arbitrarily due to various environmental factors. On the other hand, the SS concentration was considerably high in the very high flow condition. Based on the field survey, this could be the reason why the effects of the steep valley and slope collapse according to the very high flow rate as well as the source in the agricultural fields were greatly contributed. Therefore, it is necessary to develop a structural best management practice that can stabilize the steep slope and reduce river bed loss along with the typical source managements plans.

Key words : Daegi-cheon, SS concentration, Flood flow rate, Structural Best management practice, Source control management

## 1. 서 론

기후변화와 함께 국지성 호우 및 강우강도가 증가하면서

비점오염물질 및 탁수 유출량이 증가하여 하천의 수질 및 수생태를 악화시키고 있다. 최근 탁수발생 현상은 과거와는 달리 장기화되면서 수중생물의 감소 등 다양한 문제를 야기시키고 있다(Kim and Jung, 2007). 강원도 지역은 우리나라 고랭지 밭의 63.4%를 차지하고 있으며 이중 15% 이상의 급경사 고랭지 밭의 비율이 47.7%이다(Koo et al.,

† To whom correspondence should be addressed.  
Department of Regional Infrastructure Eng., Kangwon National University  
E-mail: jdchoi@kangwon.ac.kr

2017). 이에, 환경부에서는 이러한 고령지 밭들로 인해 흙탕물 문제가 지속적으로 발생하는 지역들을 비점오염 관리 지역 지정하여 관리하고 있으며, 고령지 채소재배단지를 포함하는 크고 작은 하천에서 강우시 탁수의 영향과 이를 관리하기 위한 대책은 일부 발표되었다. Jeongseon County (2013)은 골지천 지류의 탁수와 유사로 인해 하천의 어류 군집 등 하천생태계가 심각하게 훼손되고 있으므로 고령지 밭이 다수 분포하고 있는 골지천을 비점오염원관리지역으로 지정하여 관리할 필요가 있다고 보고한 바 있다. 비점오염원저감사업의 최적관리방안을 지원하기 위하여 Lee et al. (2009)은 송천의 소유역별 비점오염원의 유출특성과 도암호의 수질에 미치는 영향을 평가하였다. Choi (2006)은 한국하천호수학회지의 자료를 활용하여 한강상류의 탁수관리를 유역관리를 통해 개선할 수 있는 정책을 제안하였으며, Lee et al. (2007)은 지방자치단체에서 환경보전지역을 설정할 때, 고령지 채소지역과 도로주변을 제척하거나 포함시키는 등 지역특성에 맞는 설정원칙이 필요하다고 제안하였다.

강원도 강릉시 왕산면 대기리를 중심으로 하는 대기천은 한강의 제3지류로 송천(제2지류)과 골지천(제1지류)을 거쳐 한강으로 합류하는 유역면적 53.39 km<sup>2</sup>, 유로연장 11.38 Km인 지방하천이다 (MOE, 2016). 대기천 유역은 강원도 백두대간의 안반데기(대기4리)를 포함하는 대표적인 고령지 채소재배단지 중의 하나로 강우기에 대규모의 탁수(흙탕물)를 배출하며 한강 상류수계의 수질과 수중생태계에 심각한 악영향을 주고 있다. 따라서 대기천 유역의 탁수제어와 기타 비점오염원의 관리는 한강 상류의 수질과 수생태계 보전을 위하여 매우 중요한 현안문제이다(Jung et al., 2009). 대기천은 지속적인 탁수문제로 인하여 수중생태계가 위협 받고 있다. Jung et al. (2009)은 한강 상류의 15개 하천에서 탁수의 광물분석을 수행한 결과 이들 하천에서 탁수의 발생은 심각한 상태였다고 보고하였으며, 특히 탁수가 심한 만대천, 자운천 및 대기천의 점토광물함량은 다른 하천에 비해 높았다고 발표하였다. Kim et al. (2007)은 탁수하천인 대기천을 대상유역으로 선정하여 탁수하천과 대조하천의 어류 서식지와 군집구조의 특성조사를 실시하였으며, 탁수가 어류군집을 충분히 변화시킬 수 있고, 이는 탁수가 생태독성으로 작용했기 때문이라고 보고한 바 있다.

그러나, 탁수문제의 심각성에 대한 연구는 지속적으로 문제가 제기되고 있는 반면, 대기천과 같은 국내 소규모 하천에서 강우시 하천유량에 따라 탁수의 농도가 어떻게 변하는지에 관한 연구는 매우 제한적이다. Park et al. (2007)은 임하댐 유역 내 수문 및 유사 거동의 시공간적 토양유실 및 탁수 발생거동에 대하여 연구하였으나, 이는 대규모 하천을 대상으로 모델을 이용한 모의 결과로서 소규모 하천의 유량에 따른 탁수거동을 파악하기에 한계가 있다. 또한 Park et al. (2011)은 충청남도 지류 하천의 유량 및 수질 분포 특성에 대한 분석을 실시한 바 있으나, 선행강우에 의한 영향이 없는 기간을 선정하여 하천의 오염물

질 거동을 분석한 결과로, 강우시 토양유실에 의한 탁수변화를 살펴보기에 제한적이다.

따라서 본 논문의 목적은 우리나라의 대표적인 탁수하천인 대기천을 대상으로 강우시 유량과 탁수농도 사이의 관계분석을 통하여 탁수발생특성을 분석하고 이를 바탕으로 탁수발생 원인 및 관리대책을 제시하는데 있다. 이를 통해 탁수제어기술과 정책개발에 기여할 수 있을 것이며, 대기천을 비롯하여 고령지 채소재배단지를 포함하는 하천유역의 강우시 탁수관리, 정책개발 및 지원을 위한 기초자료 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구 대상 지역

대기천은 강원도 강릉시 왕산면 대기리에 위치한 지방하천으로 송천과 골지천으로 합류 후 한강으로 유입한다(Fig. 1). 대기천은 하천연장 7.70 km, 유로연장 11.38 km이다. 대기천 유역은 표고 1,000 m 내외의 채소(배추)재배단지 약 60만평(198만m<sup>2</sup>)을 포함하는 안반데기(대기 4리)를 포함하여 대기 1, 2 그리고 3리 등으로 구성된다. 대기천 유역은 북쪽으로 안반데기의 고루포기산(1,238 m), 북서쪽은 옥녀봉(1,146 m), 서쪽은 석두봉(991 m), 그리고 남쪽은 사달산(1,187 m) 등으로 둘러싸인 매우 높은 고산지대이고, 경작지의 경사가 상대적으로 가파르다. 대기천 유역의 주요 토지피복별 면적은 산림 48.41 km<sup>2</sup>(90.7%)과 밭 4.98 km<sup>2</sup>(9.3%)이다(환경부, 2016). 대기천 유역에서는 지역의 특성상 고령지 배추, 무, 감자 등이 주로 재배된다. 그리고 최근에는 지구온난화의 영향으로 온도가 상승하면서 사과를 재배하는 농가가 증가하는 추세이다. 대기천 유역의 소유역인 안반데기천 유역은 10.34 km<sup>2</sup>(대기천의 19.4%)이며, 경사 분포는 0~55.5%이다. 대기 1, 2, 3리와 달리 대기4리(안반데기)에서는 20년 이상 배추만 재배하는 배추재배특화단지이다. 안반데기 밭의 토성은 압밀된 돌과 자갈이 많이

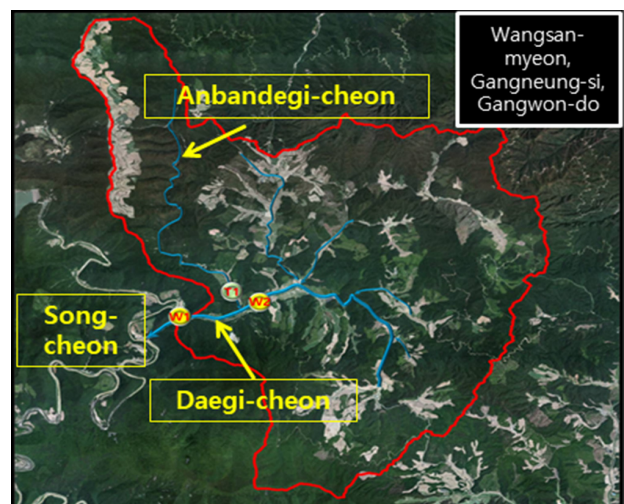


Fig. 1. Daegi-cheon watershed and monitoring sites

포함된 양질사토(loamy sand)이다. 반면에 상대적으로 저지대인 대기 1, 2, 3리의 발은 사질토(마사토)로 객토를 많이 하여 토양유실에 매우 취약한 사질토 토성이 많고, 재배 작목도 배추, 무, 감자 등 안반데기에 비하여 다양하다.

## 2.2 유량-탁수 모니터링 및 현장 조사

대기천은 대기 1, 2, 3리를 유역으로 하는 대기천 본류와 안반데기(대기4리)를 유역으로 하는 안반데기천으로 구분할 수 있다 (Fig. 1). 대기천과 안반데기천의 유량과 수질(탁수농도)은 두 하천의 합류점 인근의 다리에서 측정하였다. 대기천은 대림교(W2 지점) 그리고 안반데기천은 곰자리교(T1 지점)에 수위표의 설치, 하천횡단측량을 통한 횡단면도의 작성 등 유량측정에 필요한 작업을 수행하였다. 각 관측지점에서는 수위와 유량을 측정하여 수위-유량곡선을 도출하였다. T1과 W2 지점의 수위는 수위표로 측정하였고, 유속은 저수위시에는 유속계로, 고수위시에는 표면부자를 사용하여 측정하였다. 그리고 관측지점의 횡단면도, 수위 및 유속을 이용하여 유량을 계산하였다. 관측된 수위와 유량자료로 도출한 T1과 W2 지점의 수위-유량곡선은 각각 아래의 식(1)과 식(2)와 같다.

$$T1: Y = 18.136X^{3.3793}, R^2 = 0.9686 \quad (1)$$

$$W2: Y = 16.304X^{3.266}, R^2 = 0.9690 \quad (2)$$

여기서, Y는 유량(cms)이고 X는 수위(m)이다.

대기천이 송천과 합류하는 합류점(W1 지점)에서는 유량의 실측이 지형특성상 실질적으로 불가능하였기 때문에 T1과 W2 유량을 사용하여 비유량법으로 추정하였다. 탁수(SS)의 농도는 유량을 측정할 때마다 인력으로 수질시료를 채수하여 분석하였다. 수질측정 주기는 물환경측정망 설치·운영계획(2018)의 총량 측정망 지점을 기준으로 평시에는 8일에 1회씩 주기적으로 유량과 수질을 측정하였으며, 강우시에는 강우 발생 후 1시간에서 2시간 간격으로 등간격으로 모니터링하고 유출 지속시간이 24시간을 초과하는 경우 6시간 이상의 간격을 두고 채수하였다. 관측지점 인근에 상주하며 유량을 측정하고 수질시료를 채수하였다. 2017년 대기천 유역의 강우는 7월과 8월에 집중되었다. W1 지점에 대해서 강우시 19회와 비강우시 26회로 총 45회의 모니터링을 수행하였다. 각 관측지점에서 채수한 수질시료는 환경부의 수질오염공정시험방법 (MOE, 2004)에 따라 SS 농도를 분석하였다. 또한 W1 지점은 강원도의 정기적인 수질 모니터링 지점으로 강원도에서 약 1달 간격으로 수질조사를 수행하고 있다. 따라서 W1 지점에서 측정한 강원도와 본 연구에서 수집한 평시의 수질을 비교하였다.

T1과 W2 유역의 탁수 발생원 또는 탁수유발원인을 조사하기 위하여 강우시 19회, 비강우시 24회 그리고 봄철의 용설시에 대기천 유역을 6회 방문하며 관측하였다. 이와 같은 관측조사는 특정한 토지이용이나 탁수발생원의 정량화

조사보다는 목적에 의해 탁수유발원인과 발생원으로 평가할 수 있는 지역이나 지점을 확인하고 탁수발생원을 정성적으로 기술할 수 있도록 수행하였다. 강우로 유출이 발생하고 있을 때는 탁수발생현황, 강우 후 유출이 종료되었을 때는 농지의 토양유실 양상, 봄철의 용설기에는 용설유출과 토양유실(탁수발생) 양상, 용설기의 급경사 계곡 붕괴(사태) 상황, 특히 안반데기 발 주변 급경사 계곡의 사태현황 등에 관심을 두고 현장방문과 관측을 수행하였다. 그리고 본 연구에서 분석된 유량과 탁수농도의 특성을 고려하여 주요 탁수 유발물질의 발생원을 관리할 수 있는 적절한 대안을 제안하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 강우기 유량SS배출 모니터링 결과를 통한 탁수발생특성 분석

Fig. 2와 3은 본 연구와 강원도가 W1 지점에서 2015년 6월부터 2018년 4월까지 정기적으로 측정한 평시(비강우시)의 월별 탁수(SS)농도이다. 막대그래프가 없는 빈칸은 동절기 관측지점의 결빙으로 관측자료가 없음을 의미한다. Fig. 2와 3에 나타나듯이 6, 7 또는 8월을 제외한 평시의 대기천 탁수(SS)농도는 대부분 하천수질환경기준 1a(SS 25 mg/L 이하)보다 낮게 관측되어 물이 맑고 투명도가 높다. 강원도에서 측정한 3개의 자료가 25 mg/L를 초과했지만 물이 흐리다고 느낄 정도의 SS농도는 아니다. 평시에 측정한 본 연구와 강원도의 SS 농도 차이는 0.1~25.1 mg/L로 나타났다. 그러므로 평시 대기천의 부유사농도는 매우 낮기 때문에 수질(SS 기준)은 맑고 투명하다고 판단되었다. 이러한 결과에 기반하여 본 연구와 강원도에서 측정한 SS 농도 사이에는 큰 차이가 없다고 볼 수 있다. 그러나 관측일자에 따라 다르기는 해도 6, 7, 8월 홍수기의 정기관측 SS 농도는 두 관측자료 사이의 차이가 컸다. Fig. 3에서 2016년 7월 5일 SS는 2,880 mg/L로 측정되었으나 Fig. 2에서 7월 16일 측정한 SS는 681.3 mg/L로 2,198.7 mg/L의 SS 농도차이를 보였다. 두 관측자료의 6~8월 강우기의 SS 농도 차이는 0.4~2,198.7 mg/L로 관측일자에 따라 큰 차이를 보였다. 이로 인해 비강우시에는 관측일자에 따른 SS 농도에 큰 차이가 없으나 강우시에는 SS 농도 분석에 관측일자의 영향이 상당히 크므로 자료 분석에 신중을 기할 필요가 있음을 보여준다. 대기천 유역에는 2018년 2월과 3월에 눈이 비교적 많이 와서 적설심이 깊었고, 3월 중순에 온도가 급격히 상승하며 용설유출이 발생하였다. 용설유출이 발생한 3월 14일부터 17일 사이의 SS 농도는 T1 지점에서 40.5~743.8 mg/L 그리고 W2 지점에서 53.3~1,045.5 mg/L로 관측되었다. 이는 용설유출이 발생하기 전 본 연구와 강원도에서 W1 지점에서 정기적으로 측정한 3월의 SS 농도 3.2 mg/L와 16.2 mg/L보다는 매우 높다. 정기관측일자에 따라 SS 농도의 차이가 크게 발생하는 이유는 관측일자가 강우유출이나 용설유출로 유량이 증가하며 탁도가 높아지는 날짜와 우연하게도 겹치기 때문이다.

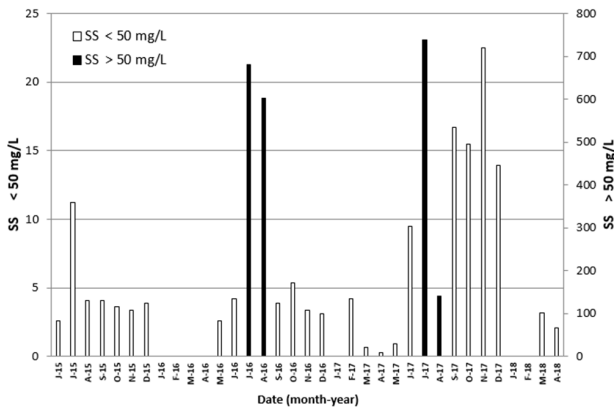


Fig. 2. Measured monthly SS concentration by this project at W1 monitoring site where Daegi-cheon discharges to Song-cheon, an upstream branch of the Han river

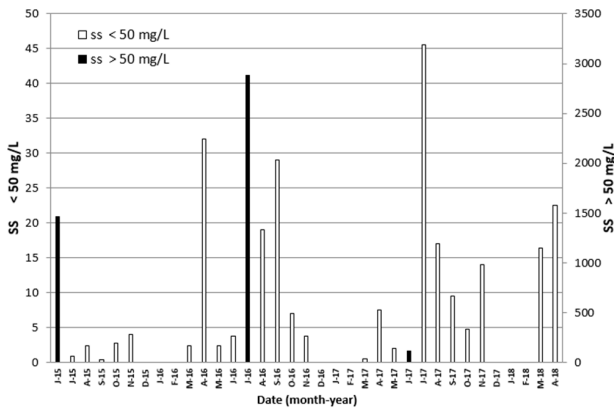


Fig. 3. Measured monthly SS concentration by Gangwon-do Province at W1 monitoring site where Daegi-cheon discharges to Song-cheon, an upstream branch of the Han river

월 1회 정도 관측하는 SS 정기관측농도는 평시의 하천유량에서는 큰 오차없이 대표 SS 수질로 활용할 수 있으나, 비가 많이 오는 홍수기나 용설유출이 발생하는 용설기의 하천유량에서는 상당한 농도차이가 있을 수 있으므로, 하천의 탁도를 대표할 수 있는 SS 농도로 활용하는데 문제가 있을 수 있다. 따라서, SS 농도자료의 활용에 세심한 주의를 기울일 필요가 있다.

Fig. 4, 5, 6은 T1, W2 그리고 W1 지점에서 관측한 강우 유출시 유출량과 SS 농도 사이의 관계를 월별로 보여주는 그래프이다. 각각의 그래프는 2017년 6월부터 8월 사이의 강우기에 하천유량이 증가하였을 때 측정된 유량과 SS 농도자료 36개로 작성되었다. 2015년과 2016년에 측정된 유량과 SS 농도자료는 배제하였다. 이는 하나의 홍수시즌에 36개의 유량과 SS 농도자료를 집중적으로 관측하였기 때문에 유역의 토지이용, 유사발생원의 형성과 유실 등 탁수에 영향을 미치는 인위적 및 자연적인 변수의 영향이 최소화되므로, 홍수유량과 SS 농도 사이의 특성을 잘 표현할 수 있다는 판단 때문이었다. 이들 그래프에서 SS 농도는 어느 일정한 유출량까지는 크게 증가하지 않았고 또한 유량과의 비례관계도 성립하지 않는 경향을 보였다. 그러나 어느 특정한 유출량 이상으로 증가하면 SS 농도는 직선적으로 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

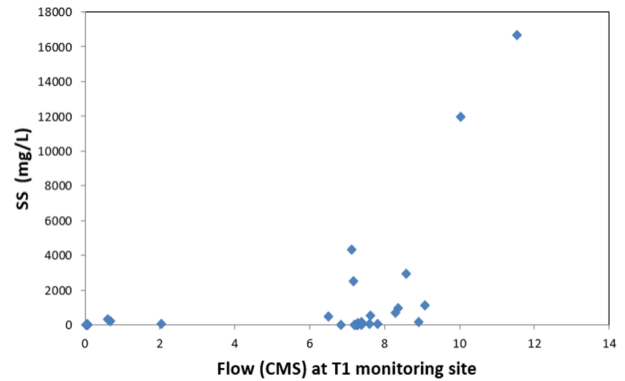


Fig. 4. Relationship between flow(CMS) and SS concentration (mg/L) during rainfall events at T1 monitoring site

안반데기천의 관측지점 T1의 유량은 대기천 관측지점 W2보다 작다. 이는 T1 지점의 유역면적이 10.34 km<sup>2</sup>로 W2 지점 유역면적의 약 1/4 정도로 작기 때문이다. T1 지점의 유량이 0~6 CMS(또는 m<sup>3</sup>/sec)이었을 때 SS 농도는 대체적으로 55 mg/L 이하로 비교적 맑은 수질을 보였다. 그러나 유량이 크지 않았음에도 2017년 8월 15일 측정된 2개의 SS 농도는 189 mg/L (유량 0.687 CMS)와 340.3 mg/L (유량 0.604 CMS)로 다소 높게 측정되었다. 그리고 8월 16일에는 유량이 2.036 CMS로 증가되었으나 SS 농도는 오히려 55 mg/L로 낮게 측정되었다. T1 지점의 유량이 6~9 CMS로 증가되었을 때의 SS 농도는 6.2~4,320 mg/L까지 변화의 폭이 매우 컸다. 그리고 유량이 10 CMS를 초과하는 매우 높은 유량조건에서 SS의 농도는 11,980~16,690 mg/L로 급격히 증가하였다. 이는 안반데기천의 경우 유량조건이 9 CMS까지의 SS 농도는 강우유출의 영향뿐만 아니라 인위적 및 자연적인 인자들의 영향을 많이 받는 것으로 판단되었다. 그리고 유량이 홍수 피크로 볼 수 있는 침투홍수량 상태로 판단되는 10 CMS 이상이 되면 SS 농도는 매우 급격히 증가하여 16,690 mg/L(유량 11.521 CMS)까지 관측되었다.

대기천 본류의 W2와 W1 지점에서도 안반데기천의 T1 지점과 유사한 양상을 보였다(Fig. 5). W2 지점에서 유량이 43.6 CMS까지 증가할 때, SS 농도는 1.0~541.3 mg/L 범위에서 변화하였다. 그리고 유량이 48.6 CMS와 49.6 CMS 등 침투홍수량 상태로 증가하면 SS 농도는 각각 6,240 mg/L와 4,820 mg/L로 급격하게 증가하였다. 그러나 대기천 본류인 W2 지점의 SS 농도는 안반데기천 T1 지점의 16,690 mg/L보다 낮게 관측되었다. 이는 안반데기 유역과 대기천 본류유역의 토성의 차이로 판단되었다. 안반데기천 유역은 점토성분의 세립자가 상대적으로 많은 양질 사토인 반면에 대기천 본류유역의 농경지 토성은 사질토(마사토)가 많다. 화강암이 풍화된 사질토는 SS 농도를 높이는 세립자보다 하천바닥을 구르며 흐르는 소류사(모래)가 많아 W2 지점의 SS 농도가 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다. 따라서 대기천 본류의 하상은 모래로 피복된 부분이 많은 반면 안반데기천 하상은 돌과 자갈이 많다. 이는

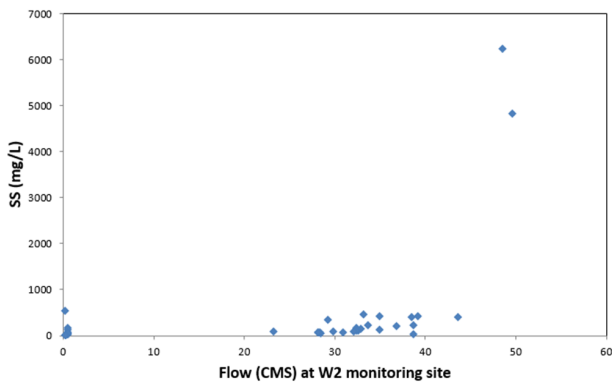


Fig. 5. Relationship between flow(CMS) and SS concentration (mg/L) during rainfall events at W2 monitoring site

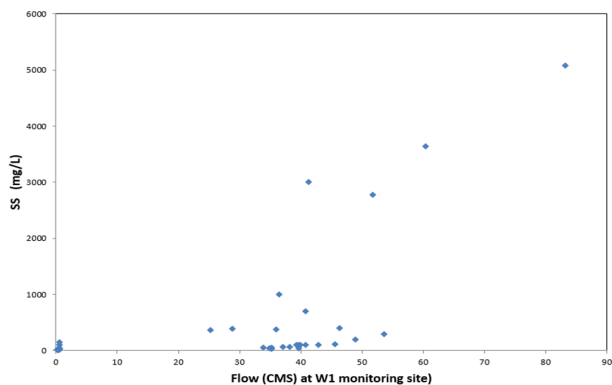


Fig. 6. Relationship between flow(CMS) and SS concentration (mg/L) during rainfall events at W1 monitoring site

대기천 본류의 SS 농도가 안반데기천의 SS 농도보다 낮을 지라도 하상이 모래로 퇴적되어 있기 때문에 안반데기천에서 하천생태계가 더 활발할 수 있다 의미가 될 수 있다.

Fig. 6는 대기천이 송천과 합류하는 W2 지점에서 유량과 SS 농도의 관계를 보여준다. W1 지점은 T1과 W2 지점에서 약 2.2 km 하류에 위치하고, 이 사이는 깊은 계곡으로 유역면적이 넓지 않고, 경사가 급한 밭이 많지 않다. 따라서 W1 지점과 T1-W2 지점사이의 유역에서 유량과 탁도를 증가시키는 않을 것으로 조사되었다. 반면에 이 지역의 유출은 T1과 W2 지점에 비해 상대적으로 맑은 유출이 되므로 T1과 W2의 탁도를 다소 희석할 수 있을 것으로 판단되었다. 그리고 W2 지점의 유역면적이 T1 지점의 유역면적보다 약 4배 정도 넓으므로 유량도 W2 지점이 T1 지점보다 약 4배 정도 크다. 이와 같은 이유로 W1 지점의 유량과 SS 농도는 W2 지점의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 모든 관측지점에서 침투홍수량시의 유량과 SS 농도의 관계를 고려했을 때 침투홍수량시의 SS 부하는 매우 높게 나타나는 경향이 있다. 예를 들어, 2017년 홍수기에 가장 많은 빈도로 측정된 안반데기천(T1 지점)의 유량은 7.0~8.0 CMS이었고, 이 때 SS 관측값의 평균농도는 601.8 mg/L이었다. 안반데기천의 홍수기 평균유량을 7.5 CMS로 가정하면, SS 부하는 4.5 kg/sec이다. 그리고 안반데기천의 관측최대유량 11.521 CMS일 때 SS 농도는 16,690 mg/L

이었고, SS 부하는 192.3 kg/sec이다. 따라서 유량은 7.5 CMS에서 11.521 CMS로 1.5배 증가했지만 SS 부하는 42.7배가 증가하였다. 이는 대기천의 경우 많은 수의 중소 규모 홍수유출에서 발생하는 SS 부하 못지않게 2~3회의 침투홍수량시 발생하는 SS 부하도 클 수 있음을 의미한다. 따라서 대기천 그리고 이와 유사한 유역하천의 탁수를 제어하여 수질을 개선하고 하천생태계를 복원하기 위한 지류 총량제와 같은 수질개선제도는 하천의 유량과 SS 농도를 잘 반영할 수 있도록 설계할 필요가 있다. 즉, 하천의 유출과 SS 농도(또는 부하)특성을 정밀하게 조사한 후, 보통의 홍수유량상태와 침투홍수량상태 등으로 구분하여 각 유량상태에 적합한 구조적 및 비구조적 최적관리방법을 도입하고 이를 정책적으로 시행할 필요가 있다. 이를 위해서는 각각의 홍수유량상태에서 SS 유발물질의 주요한 발생원을 조사해야 할 필요가 있다.

### 3.2 탁수발생 원인 및 관리대책

본 논문의 저자들은 보통의 홍수유량과 침투홍수량 상태에서 나타나는 SS 농도의 차이를 이론과 현장방문 관찰을 통해 정성적으로 설명하고자 노력하였다(Fig. 7과 8). 이론적으로 침투유량과 이에 버금가는 하천의 침투홍수량은 선행강우로 토양이 포화되어 있을 때 매우 높은 강우강도의 강우가 발생하여 농지와 산지의 유출량이 급격히 증가할 때 나타난다. 높은 강도의 강우시 유역조사에서는 고령지 밭과 밭두렁의 급경사 사면에서 많은 세류(trill)와 협곡(gully)이 빠르게 형성되며 많은 양의 토양유실을 초래하고, 농지, 농가, 도로 주변 배수로 등에 퇴적되어 있던 퇴적물, 농지주변 급경사 계곡사면의 사태로 계곡의 하상으로 물러앉은 토사, 그리고 거친 하상(하천바닥)에 퇴적되어 있던 퇴적토가 증가된 하천유량에 휩쓸리며 유실되고, 또한 하천 주변의 취약한 제방이나 사면이 유실되며 SS 농도를 증가시키는 것으로 관찰되었다. 특히, 침투홍수량시 안반데기천의 SS 농도가 W2 지점보다 매우 높았던 원인은 봄철 용설기에 밭 주변 급경사 사면에서 발생한 사태로 계곡하상으로 물러앉아 있던 토사, 가을철 배추 수확 후 밭을 정비할 때 배수로와 계곡으로 유실되어 쌓여있던 토사 외에 계곡사면과 하상의 일부까지 동시에 유실되며 고농도의 탁수가 발생한 것으로 판단하였다. 이는 홍수피크 전후 계곡을 방문했을 때 보통의 홍수유량상태에서는 나타나지 않았던 심각한 토양유실 현장을 관찰할 수 있었기 때문이다.

본 연구조사를 수행하면서 보통의 홍수유량상태와 침투홍수유량상태에서의 탁도 유발물질 발생특성은 다를 수 있다는 판단을 하게 되었다. 보통의 홍수유량상태에서는 탁도유발물질은 경사지 밭, 주택과 도로 주변의 배수로와 포장지역 등에서 주로 발생되고 급경사 계곡의 하상퇴적물의 유실은 크지 않은 것으로 조사되었다. 그러나 홍수피크나 이에 버금가는 침투홍수유량상태에서 탁도유발물질은 보통의 홍수유량상태에서 발생하는 발생원 외에 급경사 계곡의 토양유실이 추가된다는 판단을 하였다(Lee et al., 2014, Kal



Fig. 7. Pictures of farm road and drainage deposited with turbid substance



Fig. 8. Pictures of river slope collapse due to rainfall

et al., 2017). 그리고 침투홍수량상태에서 급경사 계곡의 토양유실량이 보통의 홍수량상태에서 발생하는 토양유실량보다 매우 크고 많기 크기 때문에 SS 농도가 급격히 증가하는 것으로 이해되었다. 따라서 침투홍수량시 안반데기천뿐만 아니라 대기천 본류의 극심한 탁도를 줄이기 위해서는 농지주변 급경사 계곡의 하상과 사면붕괴로 인한 토양유실을 완화시킬 수 있는 사방댐 또는 저사댐 등의 구조물을 연속적(계단식)으로 설치하는 구조적 최적관리방법을 도입할 필요가 있다. 보통의 홍수량상태에서 탁도를 줄이기 위한 최적관리방법으로는 동계피복작물재배, 지표피복, 과수원이나 다년생 약초작물로의 재배작물 전환, 가비온 옹벽 등 발의 발생원 관리, 주택과 도로 주변의 불투수층과 배수로의 토사퇴적물의 관리, 농업인 참여형 유역관리 거버넌스 도입 등 구조적 및 비구조적 방법이 동원될 수 있다. 그리고 안반데기천에는 현재 흐름이 저류되지 않고 빠져나가는 개방식 사방댐이 10여개 있다. 이들 개방식 사방댐을 사방댐 정상부를 월류해서 유하하는 저류형 사방댐으로 구조를 변경하여 보통의 홍수량상태에서 발생하는 유량을 일시적으로 저류하며 탁도유발물질을 제거하여 탁도를 상당부분 개선할 수 있을 것으로 생각되었다. 다만, 이 경우에는 매년 홍수전에 사방댐을 준설할 수 있는 준설계획이 동반되어야 한다.

#### 4. 결 론

한강 상류의 대표적인 탁수하천인 대기천의 유량과 SS 농도의 관계를 모니터링한 결과 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

매월 1회 정도 정기적으로 관측하는 평시의 대기천과 대

기천의 지류인 안반데기천의 SS 농도는 관측일자와 관측기관에 관계없이 대부분 하천수질환경기준 1a(SS 25 mg/L 이하)보다 낮게 관측되어 물이 맑고 투명도가 높았다. 그러나 강우기 홍수량이 발생하는 시기에는 관측일자와 유량 조건에 따라 SS 농도의 변화가 극심하게 나타나 월평균 대표 SS 농도로 활용하기 위해서는 매우 세심한 주의가 필요하다.

대기천 본류와 안반데기천의 SS 농도는 보통의 홍수량상태와 침투유량과 침투유량에 비금가는 침투홍수량상태에 따라 크게 변하였다. 보통의 홍수량상태에서의 SS 농도는 유량과 특정한 경향을 보이지 않았다. 반면에 침투홍수량상태에서의 SS 농도는 홍수량상태의 SS 농도보다 매우 높게 나타났다.

대기천의 침투홍수량상태에서 관측된 SS 농도는 4,820~6,240 mg/L이었고, 안반데기천에서는 11,980~16,690 mg/L이었다. 안반데기천의 SS 농도는 유역의 토성의 차이와 농지 등의 토양유실 발생원뿐만 아니라 가파른 계곡과 계곡사면의 붕괴와 유실이 크게 기여한 것으로 판단되었다. 또한 연간 2-3회 정도의 침투홍수량상태의 SS 부하는 그 외 다수의 보통홍수량상태의 SS 부하에 버금갈 수 있을 정도로 높게 나타났다.

대기천과 같은 탁수하천의 탁수를 제어하기 위한 지류총량제 등 수질대책은 보통의 홍수량상태와 침투홍수량상태의 SS 농도를 잘 파악하여 각 유량상태에 적합한 최적관리방법을 도입할 수 있도록 계획할 필요가 있다. 본 연구의 대상유역인 대기천 유역은 2018년 10월 강릉시 송천유역 대기지구 비점오염원 관리지역으로 지정될 정도로 탁수피해가 심각하다. 침투홍수량 상태에서 SS 농도가 매우 높게 나타난 안반데기천의 경우 통상적인 발생원관리대책과

함께 경지주변 급경사 계곡의 사면안정과 하상유실을 제어할 수 있는 사방댐(또는 저사댐) 등 구조적 최적관리방법이 필요하다.

## 사 사

본 논문은 환경부 국립환경과학원의 2016~7년 “소유역 관리를 위한 지류총량 시범적용 이행사항 평가 - 대기천” 학술용역, 강원대학교 “2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-52016 0189)” 및 한국연구재단 “2017년 이공학 개인기초연구지원사업(과제번호-2017R1D1A1B03029396)”의 공동지원으로 수행되었으며, 저자들은 이들 기관의 연구지원에 감사드립니다.

## References

- Choi, J. 2006. Effective turbid water management method in the upper Han River through watershed management. *J. of Kyeonggi Research Institute* 8(3):71-87. [Korean Literature]
- Jeongseon County. 2013. Study on the designation of Golji-cheon nonpoint source pollution management area - a report. Jeongseon County, Gangwon-do, Korea [Korean Literature]
- Jung, S., Choi, Y., Eum, J., Jang, C., and Kim, B. 2009. Runoff characteristics of nonpoint source pollution and study on the mineralogical of turbid water in the Han river watershed. KSEG conference(Aug., 2009), pp. 193-199. [Korean Literature]
- Kal, B., Park, J., Kwon, H., Im, T., and Lee, J., (2017). A study on the management of non-point source using peak water quality concentration. *J. of Wetlands Research*, 19(3):287-295, DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.3.287> [Korean Literature]
- Kim, J-K, Choi, J., Jang, J., Lee, K., and Kim, B. 2007. Effect of turbid water on fish community: Case studies of the Daegi stream and Bongsan steam. *Korean J. of Limnol.* 40(3):459-467. [Korean Literature]
- Lee, JM, Jung, Y., Park, Y., Kang, H., Lim, K. J., and Kim, H. 2014. Assessment of future climate change impact on groundwater recharge, baseflow, and sediment in steep sloping watershed, *J. of Wetland Research*, 16(2):173-185, DOI : [10.17663/JWR.2014.16.2.173](https://doi.org/10.17663/JWR.2014.16.2.173) [Korean Literature]
- Lee, S-J, Kim, J-C, Huh, B-N, Hyun, G-W, Huh, I-R, Jong, W-G, Lim, B-C, Koh, S-Y, Lee, T-W, Park, S-B, and Kim, Y-J. 2009. Runoff loading at the small watershed in Song River upstream and the affect reach to water quality of Doam-Dam. Report of Institute of Gangwon Health and Environ. 20:84-99. [Korean Literature]
- Lee, J-Y, Choi, J., Kim, J-K, Jang, Y-S, Lee, K-Y, and Kim, B. 2008. Ecological effect of Kungang Fat Minnow (*Rhynchocypris kumkwangensis*) on turbid water. *Kor. J. Eco.* 22(2):184-191. [Korean Literature]
- Lee, G-G, Sung, H-C, and Choi, J. 2007. Conservation area designation method for Natural environmental management in a rural local government. *J. Korean Env. Res. & Reveg.* 10(5):1-9. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE), 2004. Standard Methods for Water Quality Analysis. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE), 2016. Demonstration project of small sub-watershed Total Maximum Daily Load(TMDL) for small watershed water quality management. A report. [Korean Literature]