



## Review of applicability of Turbidity-SS relationship in hyperspectral imaging-based turbid water monitoring

Kim, Jongmin<sup>a</sup> · Kim, Gwang Soo<sup>b</sup> · Kwon, Siyoon<sup>c</sup> · Kim, Young Do<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Ph.D Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

<sup>c</sup>Postdoctoral Fellow, Center for Water and Environment, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, University of Texas at Austin, Austin, TX, U.S.

<sup>d</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

Paper number: 23-094

Received: 15 November 2023; Revised: 27 November 2023; Accepted: 29 November 2023

### Abstract

Rainfall characteristics in Korea are concentrated during the summer flood season. In particular, when a large amount of turbid water flows into the dam due to the increasing trend of concentrated rainfall due to abnormal rainfall and abnormal weather conditions, prolonged turbid water phenomenon occurs due to the overturning phenomenon. Much research is being conducted on turbid water prediction to solve these problems. To predict turbid water, turbid water data from the upstream inflow is required, but spatial and temporal data resolution is currently insufficient. To improve temporal resolution, the development of the Turbidity-SS conversion equation is necessary, and to improve spatial resolution, multi-item water quality measurement instrument (YSI), Laser In-Situ Scattering and Transmissometry (LISST), and hyperspectral sensors are needed. Sensor-based measurement can improve the spatial resolution of turbid water by measuring line and surface unit data. In addition, in the case of LISST-200X, it is possible to collect data on particle size, etc., so it can be used in the Turbidity-SS conversion equation for fraction (Clay: Silt: Sand). In addition, among recent remote sensing methods, the spatial distribution of turbid water can be presented when using UAVs with higher spatial and temporal resolutions than other payloads and hyperspectral sensors with high spectral and radiometric resolutions. Therefore, in this study, the Turbidity-SS conversion equation was calculated according to the fraction through laboratory analysis using LISST-200X and YSI-EXO, and sensor-based field measurements including UAV (Matrice 600) and hyperspectral sensor (microHSI 410 SHARK) were used. Through this, the spatial distribution of turbidity and suspended sediment concentration, and the turbidity calculated using the Turbidity-SS conversion equation based on the measured suspended sediment concentration, was presented. Through this, we attempted to review the applicability of the Turbidity-SS conversion equation and understand the current status of turbid water occurrence.

**Keywords:** Turbid water, Suspended sediment, Turbidity, Turbidity-SS conversion equation, Laser In-Situ Scattering and Transmissometry, Hyperspectral sensor

## 초분광영상 기반 탁수 모니터링에서의 탁도-SS 관계식 적용성 검토

김종민<sup>a</sup> · 김광수<sup>b</sup> · 권시윤<sup>c</sup> · 김영도<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>명지대학교 토목환경공학과 박사과정, <sup>b</sup>명지대학교 토목환경공학과 박사과정, <sup>c</sup>오스틴대학교 토목건축환경공학부 박사후 연구원,

<sup>d</sup>명지대학교 토목환경공학과 교수

### 요 지

우리나라의 강우 특성은 여름철 홍수기에 집중되어있다. 특히 이상강우 및 기상이변에 의한 집중강우의 증가 추세로 다량의 탁수가 댐 내에 유입될 시 전도현상으로 인해 탁수 장기화 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 탁수 예측을 통한 선제적 조치 방안 또는 댐 운영방안 마련에 많은 연구가 진행되고 있다. 탁수 예측을 위해서는 상류 유입부의 탁수 자료를 필요로 하지만 현재 시·공간적인 데이터 해상도는 부족한 실정이다. 시간적 해상도 개선을 위해서는 탁도-SS 관계식에 대한 개발을 필요로 하며 공간적 해상도 개선을 위해 다항목수질측정기(YSI), 레이저부유사측정기(Laser In-Situ Scattering and Transmissometry, LISST), 초분광 센서 등의 센서 기반 측정을 통해 선, 면 단위 데이터 측정을 통해 탁수에 대한 공간적 해상도를 개선할 수 있다. 또한 LISST-200X의 경우 입경 크기 등에 대한 자료 수집이 가능함에 따라 분율(Clay : Silt : Sand)에 대한 탁도-SS 관계식에 활용될 수 있다. 또한 최근 원격탐사 방안 중 다른 탑재체에 비해 공간해상도 및 시간해상도가 높은 UAV와 분광·방사 해상도가 높은 초분광 센서를 활용 시 탁수 발생에 대한 공간적인 분포를 제시할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 LISST-200X 및 YSI-EXO를 활용하여 실험실 분석을 통해 분율(Clay : Silt : Sand)에 따라 탁도-SS 관계식을 산정하였으며 UAV (Matrice 600), 초분광센서 (microHSI 410 SHARK)를 포함한 센서 기반 현장 측정을 통해 탁도와 부유사 농도, 측정된 부유사농도 기반 탁도-SS 관계식을 이용하여 산정한 탁도에 대하여 공간적 분포를 제시하였다. 이를 통해 탁도-SS 관계식에 대한 적용성 검토 및 탁수 발생 현황에 대하여 파악하고자 하였다.

**핵심용어:** 탁수, 부유사, 탁도, 탁도-SS 관계식, 레이저부유사측정기, 초분광센서

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-330-6407

E-mail: ydkim@mju.ac.kr (Kim, Young Do)

### 1. 서론

탁수는 강우에 의해 많은 양의 토사가 일시에 하천에 유입됨에 따라 발생하게 된다. 이는 저수지에서 수개월 체류하면서 하류 하천으로 방류된다. 하절기에 강우가 집중되어있는 우리나라의 강우 특성과 최근 기후변화에 따라 이상강우 및 기상이변으로 인한 집중강우의 영향이 크게 나타난다(Chung and Oh, 2006). 특히 과거 2000년대 ‘루사’, ‘매미’, ‘에위니아’ 부터 2020년대까지 ‘마이삭’, ‘하이선’ 등 태풍으로 인해 소양강, 임하댐에서 탁수 및 장기화 문제가 발생하였다. 이러한 탁수 발생은 댐의 탁수 장기화 문제로 이어져 댐 하류의 농·공업, 수생태, 등 사회·환경적 다양한 문제를 야기시킨다(Kim and Jung, 2007; Chung *et al.*, 2008). 이러한 탁수 발생에 따른 대응 방안 마련을 위해 호내 탁수 예측 정확도 개선을 위한 연구가 활발히 진행됨에(Kim *et al.*, 2006) 따라 상류 유입지점의 탁수 데이터를 필요로 한다. 또한 탁수 발생 시 댐 상류 탁수 발생과 분포에 따라 댐의 효과적인 운영 및 대응(Chung *et al.*, 2007)이 중요함에 따라 댐 상류의 지속적인 탁수 데이터뿐만 아니라 공간적인 탁수 분포 등을 파악하는 것 또한 중요하다. 특히 소양강댐의 경우 인북천 및 내린천의 합류 이후 하류 지점에 위치함에 따라 두 하천의 합류 이후 지점의 탁수 발생 현황 및 거동의 파악이 중요하다. 현재 부유사 모니터링 방법은 부유사 채집기, 채수 등을 통한 재래식 방식이 주로 이용되고 있으며 최근 레이저부유사측정기(LISST-200X)를 활용한 센서 기반 측정을 활용한 연구가 증가하고 있다(Kwak *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2012). 특히 LISST의 활용을 위한 검·보정 기법(Mikkelsen and Pejrup, 2001), 입경크기를 통한 SSC 산정, 채수를 통한 실험실 분석 기반 LISST의 적용성 검토 및 SSC (Suspended Sediment Concentration), PSD (Particle Size Distribution)(Ehrbar *et al.*, 2017) 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 이러한 점, 선 단위의 측정은 시·공간적으로 탁수의 현황 및 분포를 파악하기에는 한계점이 있다. 따라서, 시간적 해상도를 개선하기 위해 탁도-SS 관계식을 활용하여 실시간 모니터링이 가능한 탁도를 SS로 변환하는 방식이 활발히 사용되고 있으며(Chung *et al.*, 2011), 관계식 개선을 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다(Landers and Sturm, 2013).

탁수 분포의 공간적 해상도 개선은 주로 분광 영상을 활용하여 공간 분포를 취득하는 방식으로 많은 연구가 진행되고 있다(Kwon *et al.*, 2022; 2023). 원격 탐사를 위해 초분광 센서 및 다중분광센서는 위성이나 항공기 및 드론 등에 탑재되어 운용하여 토지 피복, 지질 상태, 작물의 성장 및 질병의 유무 및 토양의 수분 함유도 등의 연구에서 시작되어 최근 하천환

경에서 하천의 수리량, 수질, 유사량에도 활용되기 시작하였다(Gwon *et al.*, 2020). 이에 초분광영상을 활용한 원격탐사를 통해 하천 수질 모니터링 방법론을 개발하는 연구(Kisevic *et al.*, 2016), 수체 반사율의 현장 측정을 기반으로 수질의 초분광 원격감지 알고리즘 개발(Fan, 2014), 드론 기반 초분광 영상 활용 하천 수심 계측 기술 개발(You, 2018) 등 하천을 대상으로 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 탁도와 SS의 경우, 다른 물리량들에 비해 연구 사례가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 SS 항목을 측정 가능한 LISST-200X와 탁도를 측정하는 YSI를 활용하여 연속적인 데이터를 취득하여 시간적 해상도를 높일 수 있다는 장점을 활용하여 관계식을 개선하고자 체 거름을 이용한 탁수 시료 제작을 통해 탁도-SS 관계식을 산정하였다. 접촉식 센서로 실측된 탁도, SS와 더불어 탁도-SS 관계식으로부터 산정된 탁도를 UAV 및 초분광센서를 활용한 면 단위의 탁수 모니터링을 비교 분석하여 탁도-SS 관계식의 적용성 평가와 댐 상류 유입지점에 대한 탁수의 공간적 분포를 파악하고자 하였다.

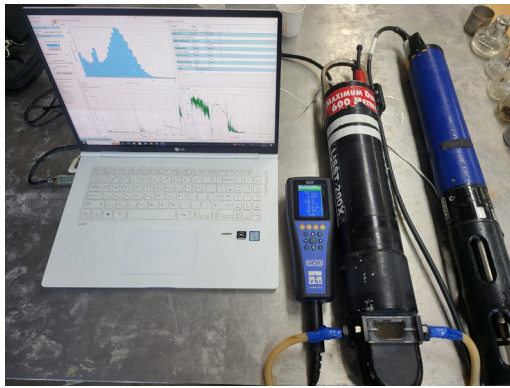
### 2. 연구 방법

#### 2.1 실내 실험 기반 탁도-SS 관계식 산정

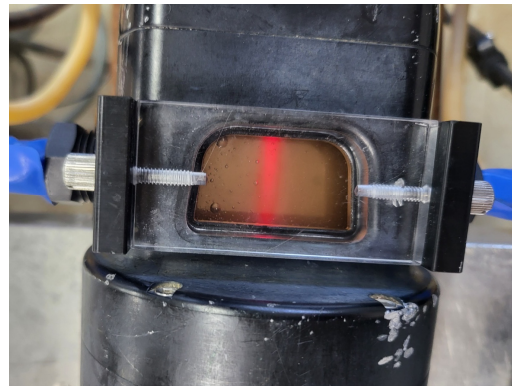
탁도-SS 관계에서 부유사의 입경 크기가 탁도에 큰 영향을 끼침에 따라 시중 황토의 체거름 분석을 통해 실제 하천 적용성을 검토하고자 하였다. 탁도-SS 관계식 산정을 위해 체 거름 분석에 이용한 체는 200, 100, 60번 체를 통해 75µm 이하, 75µm 이상 150µm 이하, 150µm 이상의 3 분류로 나누어 분율(Clay : Silt : Sand), 농도 별 시료를 제작하였다(Table 1). 시료에 대하여 LISST-200X를 통해 입경크기 별 농도와 YSI-EXO를 이용하여 탁도를 측정하였다(Fig. 1(a)). LISST-200X 측정 시 안정성을 높이기 위하여 소형 챔버를 활용하였다(Fig. 1(b)). 취득한 데이터의 경우 사분위 범위(Interquartile range, IQR)

Table 1. Sample production by fraction

Case	Proportion (Clay : Silt : Sand)
1	0.03 : 0.69 : 0.28
2	0.04 : 0.82 : 0.14
3	0.06 : 0.76 : 0.18
4	0.08 : 0.79 : 0.13
5	0.1 : 0.72 : 0.18
6	0.13 : 0.71 : 0.16



(a) Turbidity, SS measurement



(b) LISST small chamber

Fig. 1. LISST-200X, YSI-EXO measurement to Estimate Turbidity-SS relationship

를 이용하여 IQR의 1.5배 차를 이상치로 판단하여 제거 후 탁도, SS에 대한 상관성 및 관계식을 산정하였다.

**2.2 실내 실험 기반 탁도-SS 관계식 현장 계측 적용**

취득한 관계식을 적용하고자 한 대상지역은 소양호 상류 사구미교 지점으로 소양강댐 상류 약 59km에 위치 해있으며 인북천과 내린천 합류 이후 지점인 사구미교 직하류 지점에서 측정하였다(Fig. 2). 소양강댐은 북한강 수계에 위치하여 서울을 포함한 수도권 지역의 생활, 공업, 농업 용수 공급과 홍수 조절을 담당하는 인공호이자 다목적댐으로 소양강 댐 유역 면적은 2,703 km<sup>2</sup>으로 총 저수용량은 2,900 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 유효 저수용량은 1,900 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 저수면적은 70 km<sup>2</sup>이다.

실험실 기반 탁도-SS 관계식 적용을 위해 소양강 상류 사구미교 지점에서 YSI-EXO, LISST-200X, 초분광 센서를 통해 탁도, SS, 초분광영상을 취득하고 LISST-200X 측정 결과를 통해 입경 크기별 비율을 분석하여 탁도-SS 관계식 결과를 이용하여 탁도를 산정하였다. 탁도-SS 관계식으로부터 산정된 탁도, 실측 탁도와 부유사농도를 기반으로 초분광영상을 활용하여 각각 맵핑을 진행하였다. 실측 탁도와 탁도-SS 관계식 으로부터 산정된 탁도를 비교 분석하여 탁도-SS 관계식에 대한 적용성을 검토하고 부유사, 탁도를 포함한 탁수 모니터링 을 진행하였다(Fig. 3).

초분광 센서 기반 탁수 모니터링을 위해 소양강 상류 맵핑 대상 지점을 초분광 센서를 탑재한 UAV를 활용하여 촬영을 진행하였다. 탁도-SS 관계식 적용 및 탁도의 공간분포를 제시 하고자 LISST-200X와 YSI-EXO를 통해 일정 지점에 대하여 연속 데이터를 취득하였으며 UAV의 호버링을 통해 실측 지점에 대하여 초분광영상을 연속적으로 취득하였다(Fig. 4). 활용한 장비는 4 nm 간격으로 400~1000 nm의 측정이 가능한 초분광 센서(Corning사의 Micro HSI™ 410 Shark)(Cor-

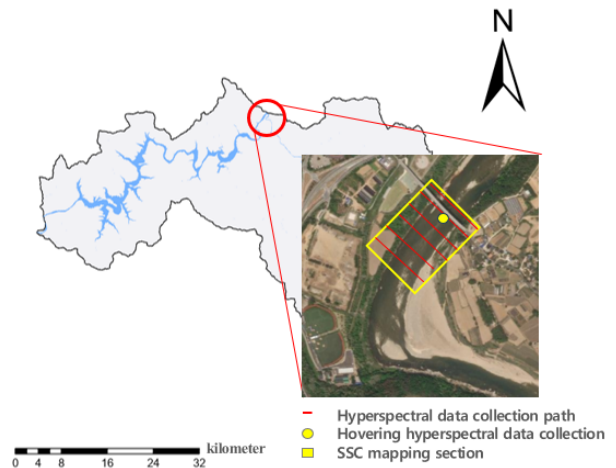


Fig. 2. Research and monitoring target points (Soyang River)

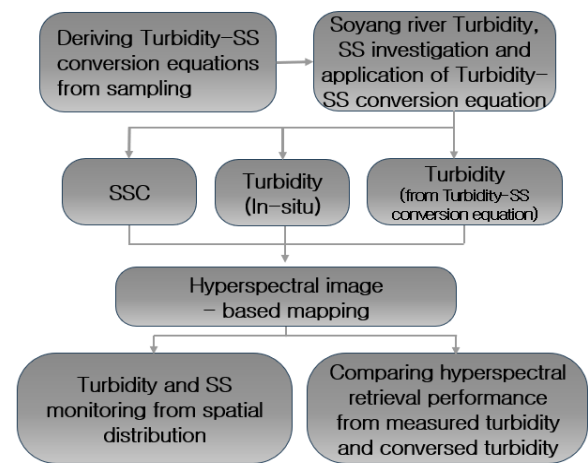


Fig. 3. Research schematic diagram

ning, 2017), 센서 탑재를 위한 UAV (DJI 사 Matrice 600), 촬영 각, 흔들림을 보정 해주기 위한 짐벌(DJI 사의 Ronin-MX)

을 이용하여 측정을 진행하였다(Fig. 5(a)). 또한 취득 영상의 분광 특성을 비교하기 위해 LISST-200X, YSI-EXO를 사구미교 교량에서 빛줄을 연결하여 교량법으로 측정하였다(Fig. 5(b)). 측정 시기는 2023년 8월 31일로 사전 누적 강수량은 2023년 8월 28일~2023년 8월 30일까지 총 43.3mm로 강수량이 많지는 않았으나 육안상 탁수가 확인되었으며 수위는 3.57m로 누적 강수량으로 인해 상승기로 나타났다.

측정방법은 초분광 센서의 경우 라인스캐닝 기법으로 촬영함에 따라 바람, 진동, 촬영각 등 흔들림에 취약한 센서의 움직임을 보정하기 위해 짐벌을 활용하였다. 또한 취득 영상의 방사 보정을 위해 일정한 반사율을 가지는 4종류(6%, 12%, 48%, 64%)의 반사천의 분광정보를 함께 측정하여 진행하였다. 취득된 초분광영상 분석을 위해 전처리 과정이 필요하다. 첫 번째로 초분광 센서가 라인스캐닝 기반으로 영상을 축적하

여 면 단위의 촬영이 됨에 따라 6개의 영상을 정합한 RGB 이미지 기반으로 영상정합을 진행하였다. 두 번째로는 영상의 대기흡수 및 산란 효과 제거를 위한 방사보정을 수행하였으며 식은 다음과 같다(Kim *et al.*, 2023)(Eq. (1)).

$$R = \lambda_{Gain} \times \lambda_{DN} + \lambda_{Offset} \tag{1}$$

이때,  $R$  :  $\lambda_{DN}$ 에 대한 반사율,  $\lambda_{DN}$  : 파장,  $\lambda_{Gain}$  : 반사율로 보정하기 위한 기울기,  $\lambda_{Offset}$  : 절편값이다.

초분광영상 측정된 탁도, 부유사농도, 탁도-SS 관계식으로부터 산정된 탁도의 농도 추정을 위해서 호버링 기법을 통한 분광 정보를 수집하여 접촉식 센서 실측 데이터 및 탁도-SS 관계식으로부터 산정된 데이터와 연계하였다. 이때, 초분광영상의 경우 1초에 120개의 데이터를 수집하며 접촉식 센서

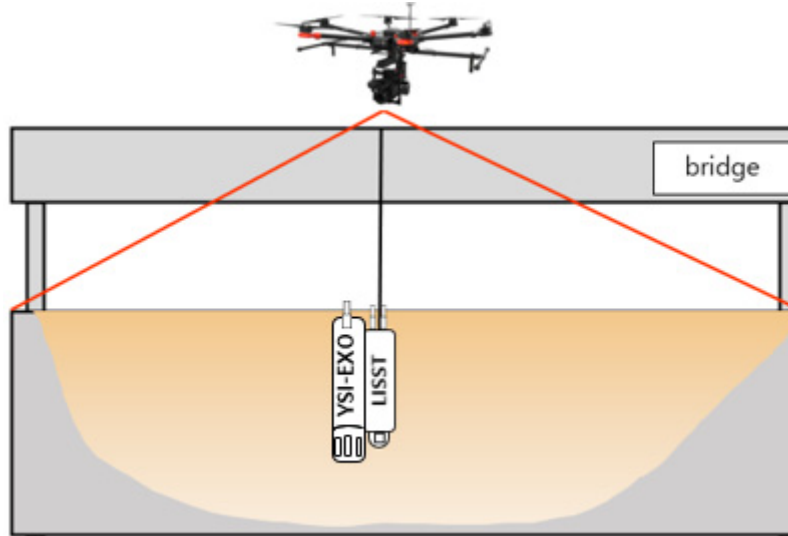


Fig. 4. Data acquisition schematic diagram



(a) UAV-mounted hyperspectral sensor operation

(b) LISST-200X equipment operation

Fig. 5. Building monitoring equipment

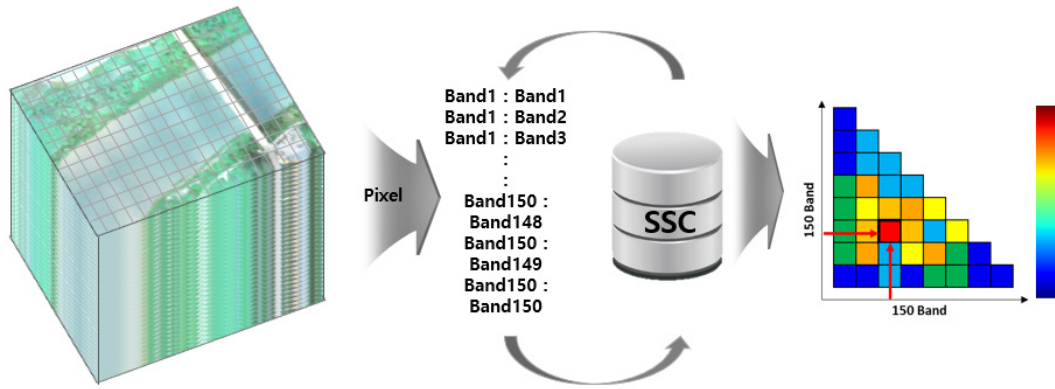


Fig. 6. Schematic diagram of OBRA (Optimal band ratio analysis) method

의 경우 1초당 1개의 데이터를 수집함에 따라 시간 동기화를 위해 초분광영상 1초 동안 측정된 120개의 초분광영상 데이터 평균을 통한 다운 스케일링을 진행하였다. 최적밴드탐색 기법(Optimal Band Ratio Analysis, OBRA)을 적용하여 부유사 농도와 최대 상관계수를 나타낸 두 개의 파장을 선택하여 분광 정보와 맵핑 항목(실측 탁도, 부유사 농도, 탁도-SS 관계식으로부터 산정된 탁도) 값 간의 회귀분석을 통해 오차 및 상관계수를 산정하였다. 선정된 두 파장의 광량을 서로 나눈 밴드비(Eq. (2))를 산정할 수 있으며 이를 이용하여 부유사 에 대한 공간적인 농도 추정을 진행하고자 하였다(Fig. 6).

$$\lambda = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) \tag{2}$$

### 3. 연구 결과

실험실 분석을 통한 Table 1의 탁수 샘플 케이스별 탁도-부유사 농도 그래프를 통해 상관성 및 탁도-SS 회귀식을 산정하였다(Fig. 7)(Table 2). 실제 하천의 LISST-200X를 통해 취득된 SS 데이터의 분율(Clay : Silt : Sand)이 0.03 : 0.62 : 0.35 나타남에 따라 Case1 번의 관계식을 적용하여 탁도를 산정하였다. 실측 탁도와 산정된 탁도의 결정계수는 0.887(Fig. 8)로 유의미하게 나타났으며 탁도-SS 관계식에 있어서 입경 크기에 따른 분율(Clay : Silt : Sand)의 영향이 매우 큰 것으로 판단되었다.

초분광영상 정합 과정에서 이미지 겹침으로 인한 줄이 생성된다는 한계점이 있었으며 전체 영상 전처리과정 결과는 다음과 같다(Fig. 9). 접촉식 센서를 통해 취득한 부유사 농도는 최대 221.50  $\mu\text{l}$ , 최소 114.15  $\mu\text{l}$ , 탁도는 최대 29.5 FNU, 최소 25.8FNU로 나타났으며 탁도-SS 관계식을 통해 산정된

탁도는 최대 32.9 FNU, 최소 25.2 FNU로 나타났다. 접촉식 센서 측정 결과 및 탁도-SS 관계식을 통해 산정된 값과 초분광영상 촬영 결과를 이용한 OBRA 수행 결과는 Fig. 10과 같으며, 분석 결과로부터 최대 상관계수를 나타낸 두 파장을 선택하였다(Fig. 10). SSC에 대한 두 파장에서의 상관성은 0.854 (Fig. 10(a)), 실측탁도에 대한 두 파장의 상관성은 0.911(Fig. 10(b)), 탁도-SS 관계식으로부터 산정된 탁도에 대한 두 파장 상관성은 0.854(Fig. 10(c))로 유의미한 결과를 나타냈으며 이를 통해 농도 산정 회귀식을 산정하였다(Table 3)(Eq. (3)).

$$Object = Gain \times \lambda_{(a)} + Offset \tag{3}$$

여기서, *Object*는 구하고자 하는 항목의 농도이며 *Gain*은  $\lambda_{(a)}$  반사율로 보정하기 위한 기울기 계수,  $\lambda_{(a)}$ 는 A의 반사율, *Offset*은 절편값이다.

정합된 초분광영상에 대하여 OBRA 결과 Eq. (3)를 적용하여 부유사와 탁도의 공간분포에 대한 맵핑을 진행하였다 (Figs. 10(a) and 10(b)). 공간분포 결과 검증을 위해 센서 측정 지점에 해당하는 초분광영상의 Pixel 농도와 실측값을 비교하였다. 동 시간대 실측 가능한 장비가 1대로 검증 데이터의 한계가 있었다. 부유사 실측 농도 132.2  $\mu\text{l}$ , 맵핑 농도 127.3  $\mu\text{l}$ 로 오차율은 4%로 나타났으며 전체 픽셀의 평균 농도는 108.52  $\mu\text{l}$ 로 나타났다. 탁도의 경우 실측 값 25.8 FNU, 맵핑 값 24.6 FNU로 오차율 5% 정도로 나타났으며 탁도-SS 관계식 기반 탁도 맵핑 결과 부유사 데이터에 대한 탁도-SS 관계식 적용으로 인해 비슷한 데이터 경향을 나타냈다. 이에 따라 부유사 OBRA 결과와 동일한 파장대를 선정함으로써 부유사 맵핑 결과와 유사한 결과로 나타났다. 관계식을 활용하여 산정된 탁도의 맵핑 시 실측 값 25.8 FNU, 맵핑 값 23.5 FNU로 9%의 오차로 나타났으며 실측 탁도의 경우 전체 픽셀 평균

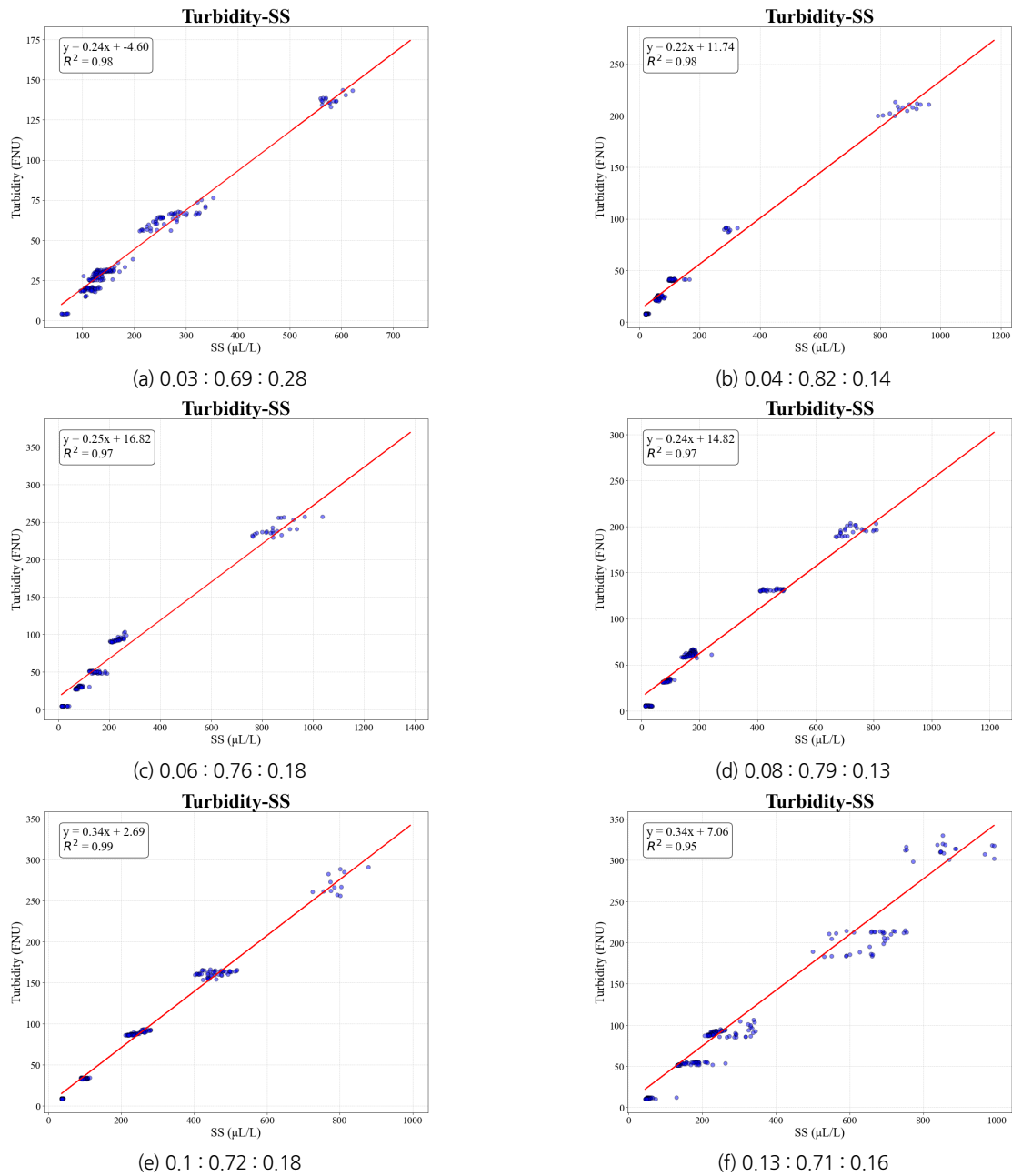


fig. 7. Comparison of scatter plot trends by particle size (Clay, Silt, Sand)

Table 2. laboratory analysis results

Case	Fraction (Clay : Silt : Sand)	Regression Equation	R <sup>2</sup>
1	0.03 : 0.69 : 0.28	y=0.24x-4.60	0.98
2	0.04 : 0.82 : 0.14	y=0.22x+11.74	0.98
3	0.06 : 0.76 : 0.18	y=0.25x+16.82	0.97
4	0.08 : 0.79 : 0.13	y=0.24x+14.82	0.97
5	0.1 : 0.72 : 0.18	y=0.34x+2.69	0.99
6	0.13 : 0.71 : 0.16	y=0.34x+7.06	0.95

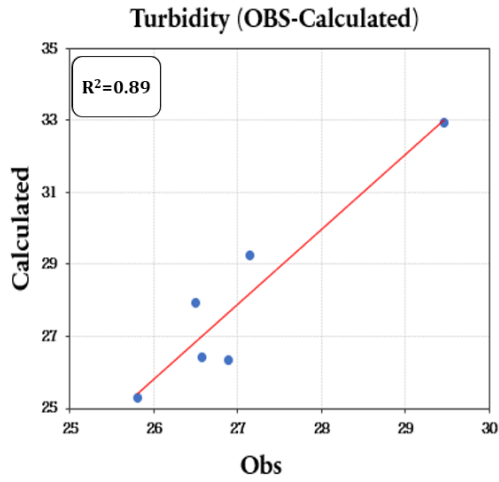
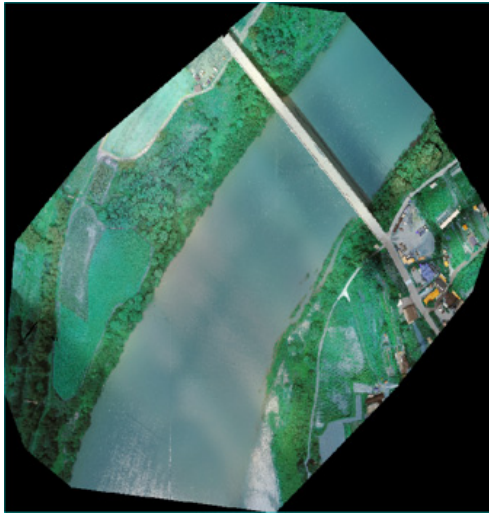
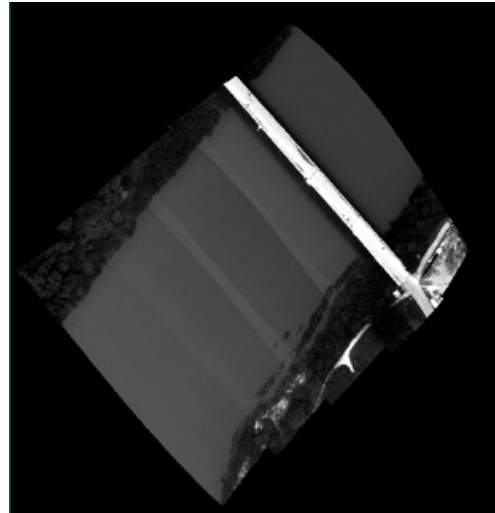


Fig. 8. Comparison between true and estimated values

농도 23.8 FNU로 전반적으로 부유사 및 산정된 탁도 맵핑 결과에 비해 낮은 농도 분포로 나타났다. 탁도-SS 관계식 검토를 위해 실측 탁도와 관계식 활용하여 산정한 탁도 맵핑 결과에 대해 비교하였다(Figs. 11(b) and 11(c))(Table 4). 실측 탁도를 활용한 맵핑과 동일 지점 10개의 픽셀에 대해서 추출하여 비교하였을 때 최소 2%에서 우안 측 1번의 경우 최대 52%까지 오차가 발생하였으나 우안을 제외하고는 유사한 것으로 판단되었다. 전체적으로 하천 중앙지점 좌안 측이 높게 나타난 이유는 강우 이후 양안에 비하여 중앙지점의 유속이 높으며 좌측방향 만곡부 직상류 지점에 위치함으로서 좌안 측이 높게 나타난 것으로 판단된다.

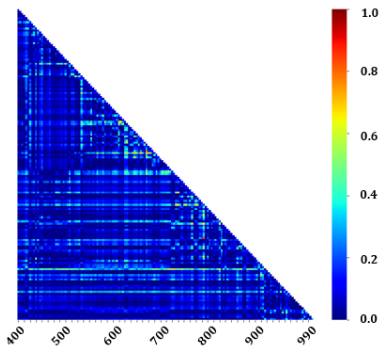


(a) Optical image registration

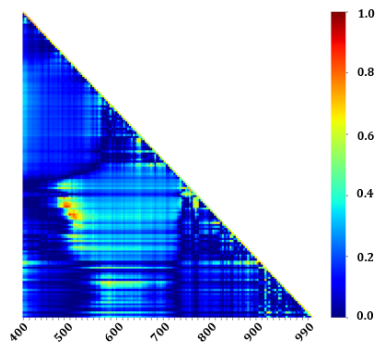


(b) Hyperspectral image registration

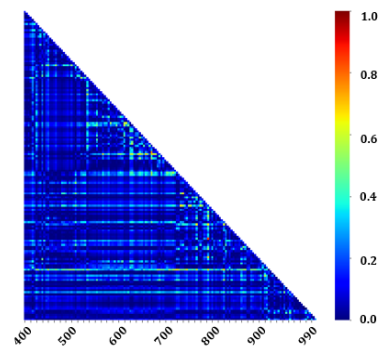
Fig. 9. Acquired image registration and preprocessing results



(a) SSC OBRA  
(Optimal band ratio analysis)



(b) Turbidity (Obs) OBRA  
(Optimal band ratio analysis)



(c) Turbidity (Estimated) OBRA  
(Optimal band ratio analysis)

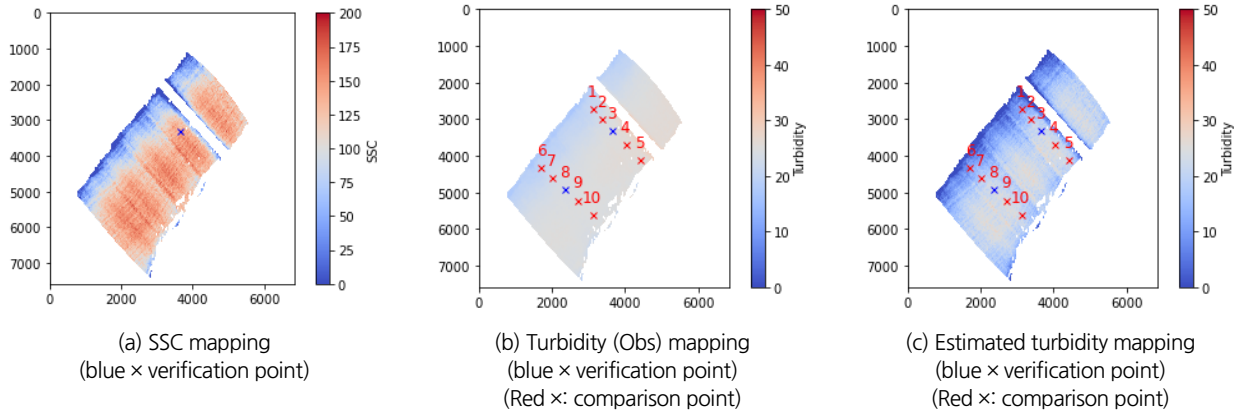
Fig. 10. OBRA correlation map results

**Table 3.** Turbid water measurement OBRA results

SSC	$\lambda 1_{(SSC)}$	837.88 nm
	$\lambda 2_{(SSC)}$	770.17 nm
	Gain	-1563.67 $\mu l$
	Offset	13.27 $\mu l$
	$R^2$	0.854
Turbidity (Obs)	$\lambda 1_{(Tur_{Obs})}$	646.70 nm
	$\lambda 2_{(Tur_{Obs})}$	571.03 nm
	Gain	-20.62 FNU
	Offset	23.35 FNU
	$R^2$	0.911
Turbidity (Estimated)	$\lambda 1_{(Tur_{Obs})}$	837.88 nm
	$\lambda 2_{(Tur_{Obs})}$	770.17 nm
	Gain	21.35 FNU
	Offset	26.49 FNU
	$R^2$	0.854

### 3. 결론

본 연구에서는 소양강댐 탁수 문제에 있어 상류 유역의 탁수에 대한 시·공간적인 데이터의 해상도를 취득하는 것이 매우 중요함에 따라 실험실 분석 기반 입경크기 별 비율에 따른 탁도-SS 관계식을 산정하였다. 산정된 탁도-SS 관계식에 대한 검증 및 적용성 검토를 위해 소양강댐의 상류 유입지점인 사구미교 지점에서 초분광 센서와 LISST, YSI를 통해 탁도, SS 데이터를 취득하였다. LISST 센서를 이용하여 취득한 SS 데이터와 유사한 입경 크기 별 분율(Clay : Silt : Sand)을 가진 케이스의 탁도-SS 관계식 적용을 통해 탁도의 공간분포를 산정하였다. 접촉식 센서를 이용하여 계측한 SS 및 탁도와 탁도-SS 관계식으로부터 산정된 탁도 총 3 항목에 대해 각각의 맵핑을 진행하여 탁수의 공간분포 파악을 파악하고 비교하여 탁도-SS 관계식의 적용성을 검토하고자 하였다. 실제 사구미교 직 하류에서 사전 누적 강수량 43.3mm, 약 12시간 이후 수위 상승기 시점에서 진행하였다. 접촉식 센서를 이용하여 점



**Fig. 11.** Hyperspectral image-based mapping for turbidity

**Table 4.** OBRA result

Comparison point	Measured turbidity	Estimated turbidity from OBRA	Relative error
1	21.1	10.2	52%
2	23.0	21.4	7%
3	26.8	23.5	9%
4	25.4	25.8	2%
5	25.3	20.0	21%
6	20.3	12.7	37%
7	22.3	23.0	3%
8	23.6	24.0	2%
9	24.3	26.0	7%
10	23.5	21.0	11%



단위의 연속 데이터를 취득하였으며 UAV에 탑재한 초분광 센서를 이용하여 센서 측정지점에 대한 영상을 취득하였다. 접촉식 센서를 이용하여 취득한 탁수 데이터와 초분광영상의 분광 정보를 이용하여 OBRA 분석을 수행하였으며 초분광영상의 분광 정보를 OBRA 분석을 통해서 최대 상관계수를 나타낸 두 개의 파장을 선정하였다. 이때, 두 파장과 실측한 부유사농도 및 탁도, 탁도-SS 관계식 기반으로 산정된 탁도의 상관계수는 각각 0.854, 0.911, 0.854로 높은 상관관계를 나타냈다. 선정된 두 파장을 이용한 밴드비를 통해 부유사농도 회귀식을 산정하였으며, 초분광영상을 활용한 부유사농도의 공간분포 맵핑을 위해 활용하였다. 측정 장비의 수량 및 안전성 문제로 인해 탁수 모니터링 결과 검증 데이터가 부족하다는 한계점이 있었으나 실측 데이터 비교하였을 시, 오차율 4%로 나타났다. 또한 탁도 실측 값 25.8 FNU, 맵핑 값 24.6 FNU로 오차율 5%로 나타났으며 탁도-SS 관계식 기반 탁도 맵핑 값은 23.5 FNU로 9%의 오차율을 보였다. 탁도-SS 관계식을 기반으로 산정된 탁도 맵핑 결과의 경우 SSC에 대한 회귀식을 통한 변환으로 인해 부유사 맵핑 결과와 공간적인 분포 특성이 유사하게 나타났다. 실측 탁도 기반 분석 결과 및 탁도-SS 관계식 기반 탁도 분석 결과 우안에서 다른 지점에 비해 오차가 크게 나타났으나 우안을 제외한 탁수 현황에 대한 결과는 유사하게 나타나 활용 가능할 것으로 판단된다. 해당 결과의 경우 사전강우량이 매우 많지 않았으며 강우 종료 후 약 12시간이 경과함에 따라 수체가 안정화 된 시점에서 측정됨에 따라 실험실 분석결과를 적용하였을 때 잘 일치한 것으로 판단된다. 초분광영상을 활용한 탁수 모니터링 기법의 경우 표면 부근 데이터만 취득 가능함에 따라 표층 탁수 현황에 대해서만 제시 가능하다는 한계점이 있으나 접촉식 센서를 함께 활용하여 개선 가능할 것으로 판단된다. 추후 측정 조건에 따른 추가 실험 및 실측농도, 입경분포에 대한 데이터 축적과 영상 전처리 및 보정 방법 개선 시 하천 전반적인 탁수 발생 현황에 대한 공간적 분포를 재현 하는데 있어 정확도가 상승할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원(2021003030002)에 의해 수행되었으며, 이와 같은 지원에 감사드립니다.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Chung, S.W., Jung, Y.R., Ko, I.H., and Kim, N.I. (2007). "Development and validation of a decision support system for the real-time monitoring and management of reservoir turbidity flows: A case study for Daecheong Dam." *Journal of the Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 3, pp. 293-303.
- Chung, S.W., Lee, H.S., and Jung, Y.R. (2008). "Turbidity modeling for a negative buoyant density flow in a reservoir with consideration of multiple particle sizes." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 24, No. 3, pp. 365-377.
- Chung, S.W., Lee, J.H., Lee, H.S., and Maeng, S.J. (2011). "Uncertainty of discharge-SS relationship used for turbid flow modeling." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 991-1000.
- Chung, S.W., and Oh, J.K. (2006). "River water temperature variations at upstream of Daecheong Lake during rainfall events and development of prediction models." *Journal of the Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 1, pp. 79-88.
- Corning (2017). Corning micro HSI 410 SHARK: Integrated, Coherent, Airborne Hyperspectral Imaging System, accessed 2 May 2020, <<https://www.corning.com/microsites/coc/oem/documents/hyperspectral-imaging/Corning-MicroHSI-410-SHARK-Brochure.pdf>>.
- Ehrbar, D., Schmocker, L., Vetsc, D.F., Boes, R.M., and Doering, M. (2017). "Measuring suspended sediments in periglacial reservoirs using water samples, laser in-situ scattering and transmissometry and acoustic Doppler current profiler." *International Journal of River Basin Management*, Vol. 15, No. 4, pp. 413-431.
- Fan, C.L. (2014). "Spectral analysis of water reflectance for hyperspectral remote sensing of water quality in estuarine water." *Journal of Geoscience and Environment Protection*, SciRes., No. 2, pp. 19-27.
- Gwon, Y.H., Kin, D.S., and You, H.J. (2020). "A standardized procedure on building spectral library for hazardous chemicals mixed in river flow using hyperspectral image." *Journal of Korea Water Resour. Association*, KWRA, Vol. 53, No. 10, pp. 845-859.
- Kim, B.C., and Jung, S.M. (2007). "Turbid storm runoffs in Lake Soyang and their environmental effect." *Journal of the Korean Society of Environmental Engineering*, KSEE, Vol. 29, No. 11, pp. 1185-1190.
- Kim, G.S., Choi, J.Y., Nam, S.H., Kim, Y.D., and Kwon, J.H., (2023).

- “A study on the development of a Blue-green algae cell count estimation formula in Nakdong River downstream using hyperspectral sensors.” *Journal of the Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 56, No. 6, pp. 373-380.
- Kim, T.W., Kim, Y.D., and Yi, Y.K. (2012). “A study on field experiment and numerical modeling for efficiency analysis of selective withdrawal in Imha reservoir.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. B32, No. 2B, pp. 113-121.
- Kim, W.G., Jung, K.S., and Yi, Y.K. (2006). “The variation of water temperature and turbidity of stream flows entering Imha reservoir.” *Korean journal of limnology*, Vol. 39, No. 1, pp. 13-20.
- Kisevic, M., Morovic, M., and Andricevic, R. (2016). “The use hyperspectral data for evaluation of water quality parameters in the river Sava” *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 25, No. 11, pp. 4814-4822.
- Kwak, S.H., Lee, K.S., Cho, H.I., Seo, Y.J., and Lyu, S.W. (2017). “Field measurement of suspended material distribution at the river confluence.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 37, No. 2, pp. 467-474.
- Kwon, S., Shin, J., Seo, I.W., Noh, H., Jung, S.H., and You, H. (2022). “Measurement of suspended sediment concentration in open channel flows based on hyperspectral imagery from UAVs.” *Advances in Water Resources*, Vol. 159, 104076.
- Kwon, S.Y., Gwon, Y.H., Kim, D.S., Seo, I.W., and You, H.J. (2023). “Unsupervised classification of riverbed types for bathymetry mapping in shallow rivers using UAV-based hyperspectral imagery.” *Remote Sensing*, Vol. 15, No. 11, 2803.
- Landers, M.N., and Sturm, T.W. (2013). “Hysteresis in suspended sediment to turbidity relations due to changing particle size distributions.” *Water Resources Research*, Vol. 49, pp. 5487-5500.
- Mikkelsen, O., and Pejrup, M. (2001). “The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity.” *An International Journal of Marine Geology*, Vol. 20, pp. 187-195.
- You, H.J. (2018). *Development of riverine bathymetry survey technique using drone-based hyperspectral image*. Ph.D Dissertation, Dankook University.