

밴드비를 이용한 저수지 토사의 탁도 관계식 추정

Estimation of Turbidity Relationship of Reservoir Sediment Using Band-ratio

신형섭*, 박종화**, 이규호***

Hyoung Sub Shin, Jong Hwa Park, Kyu Ho Lee

요 지

최근 들어 지구온난화의 영향 등 기후변화에 따라 호우의 빈도와 강도가 증가하여 홍수피해가 확대되고 토사재해, 댐과 저수지의 퇴사 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히 농업용저수지의 경우 체체가 노후화되고 유입토사에 의한 퇴사는 심각한 수준에 있다. 또한 도심중심의 다양한 공사 등은 토지 이용과 피복을 변화시켜 많은 토사 유출의 원인이 되고 있다. 이렇게 노출된 토사는 탁수발생원이 되고, 토사와 부유물로 형성된 탁수환경은 수중의 태양복사에너지 전달을 방해하여 수중생태계의 먹이사슬과 저서생물의 서식환경에 악영향을 미치고 있다. 특히 농업용 저수지는 반폐쇄성 수역으로써 탁수환경에 노출되기 쉬우며, 수질회복에는 많은 노력과 비용이 소요된다. 또한 탁수환경의 변화는 시·공간적으로 발생하고 지속적으로 일어나기 때문에 탁수환경에 미치는 토사에 대한 연구는 우선적으로 시행되어야 한다. 이러한 토사 정보의 추출 및 분석에 RS기법의 활용은 증대되고 있으나 우리나라에서는 아직 연구가 미진하여, 이에 대한 기초연구가 시급한 실정이다.

본 연구는 2단계로 진행하였다. 먼저 1단계는 탁도계(2100P turbidimeter)를 이용하여 토사농도 변화에 따른 탁도를 측정하여 탁도 관계식을 추정하였다. 2단계는 분광복사계(LI-1800)를 이용하여 토사농도 변화에 따른 분광반사율을 측정하고, 얻어진 결과는 도함수와 적분의 수치해석 방법으로 토사농도를 측정할 수 있는 최적밴드를 구하였다. 다음으로 각 밴드간의 비를 계산하여 탁수환경을 측정할 수 있는 가장 적합한 밴드 조합식을 구하였다. 얻어진 밴드 조합식은 1단계에서 추정한 토사농도에 따른 탁도 관계식과의 상관관계를 분석하여 분광복사계를 이용한 탁도 관계식을 추정하였다. 그 결과, 6개의 탁도 관계식이 추정되었으며 결정계수 R^2 는 0.67의 높은 상관성을 보였다.

핵심용어 : 원격탐사(RS), 분광반사, 탁도, 토사농도, 밴드비

1. 서 론

지구온난화에 따른 기후변화 등으로 강우패턴이 변화하고 각종 택지개발 및 하천공사 등은 토지 이용과 피복을 변화시켜 많은 토사 유출의 원인이 되고 있다. 이와 같은 개발과 자연재해로 노출된 토사는 강우와 흐름에 의해 유출되면서 하천과 저수지에 침전 또는 수송 및 퇴적 과정을 거치며 탁수발생원이 되고 있다. 또한 이렇게 형성된 탁수환경은 수중의 태양복사에너지 전달을 방해하여 수중생태계의 먹이사슬과 저서생물의 서식환경에 악영향을 미치기도 한다. 이렇게 발생하여 유송된 토사는 농업용 저수지, 하천, 댐 및 하구를 매워 수리구조물의 수명을 단축시키기도 하고,

* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 석사후연구원 · E-mail : hydsubi@kict.re.kr
** 정회원 · 충북대학교 지역건설공학과 교수 · E-mail : jhpak7@chungbuk.ac.kr
*** 정회원 · 충북대학교 지역건설공학과 석사과정 · E-mail : loki95@nate.com

수질을 악화시키는 원인이 되기도 한다(Amos 등, 1985; Clark, 1987). 그리고 홍수시 절개지와 공사 현장 등에서 유출된 토사는 범람하여 농작물을 덮어 막대한 경제손실을 가져오기도 하며 하천 범람과 제방붕괴의 원인이 되어 막대한 재산피해를 가져온다. 특히 농업용 저수지는 반폐쇄성 수역으로써 탁수환경에 노출되기 쉬우며, 회복에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 물속에 분포하는 토사 구성 물질의 종류와 양 및 공간적 분포 파악은 수질문제와 재난 예방 및 생물의 서식환경 문제를 파악하고 해결하는데 매우 중요하다. 이러한 토사 정보의 추출 및 분석에 RS기법의 활용은 증대되고 있으나 우리나라에서는 아직 연구가 미진하여, 이에 대한 기초연구가 시급한 실정이다.

본 연구는 RS기법인 분광복사계와 탁도계를 이용하여 최적 밴드 조합식을 구하고 토사농도에 따른 탁도관계식을 추정하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 연구방법

본 연구는 2단계로 진행하였다. 먼저 1단계는 탁도계(2100P turbidimeter)를 이용하여 토사농도 변화에 따른 탁도를 측정하여 탁도 관계식을 추정하였다. 2단계는 분광복사계(LI-1800)를 이용하여 토사농도 변화에 따른 분광반사율을 측정하고, 얻어진 결과는 도함수와 적분의 수치해석 방법으로 토사농도를 측정할 수 있는 최적밴드를 구하였다. 다음으로 각 밴드간의 비를 계산하여 탁수환경을 측정할 수 있는 가장 적합한 밴드 조합식을 구하였다. 얻어진 밴드 조합식은 1단계에서 추정한 토사농도에 따른 탁도 관계식과의 상관관계를 분석하여 분광복사계를 이용한 탁도 관계식을 추정하였다.

2.2 토사농도 변화에 따른 탁도 측정

토사에 의한 탁수환경의 정량적인 기준을 제시하고자 HATCH사의 탁도계를 사용하였으며, 탁도계의 측정범위는 0~1000 NTU이다.

실험 시료는 토사유출과 밀접한 관계를 갖고 있는 저수지 토사를 이용하였다. 채취 시료는 하천과 저수지에 유입되어 탁수환경을 이루는 토사의 일종이다. 토사의 농도변화에 따른 탁도는 탁도계를 이용하여 측정하였다. 탁도는 토사농도와 NTU와의 관계식 추정을 위해 체가름한 실트와 모래를 10,000~780,000 mg까지 농도를 증가시키면서 측정하였다. 동일한 수체공간에서도 탁도는 동일하지 않기 때문에 측정은 3~5번을 측정한 후 평균값을 사용하였다.

Table 4.1 Characteristics of 2100P turbidimeter

Name	2100P turbidimeter
Corporation	HATCH
Principle of operation	Nephelometric Ratio
Unit	NTU
Range	0~1000 NTU in automatic range mode
Accuracy	0~500 NTU(±2%)
	500~1000 NTU(±3%)

2.3 토사농도 변화에 따른 분광반사 측정

토사농도 변화에 따른 분광반사특성은 다음의 실험 장비를 이용하여 조사하였다. 분광반사 측정은 분광복사계 (Li-1800, Li Cor. Inc), Telescope/Microscope, 표준백색판 (BaSO₄ 교정판), 받침대, 노트북, 수조, 배수펌프 (PDV-270M)로 구성하여 실시하였다(Fig. 2.1). 실험용 수조는 모든 빛을 흡수하는 흑색 수조를 사용하였다. 수조는 저수지와 유사한 조건을 맞추기 위해 수조 바닥에 배수펌프를 설치하여 물이 계속 움직이는 환경을 조성하였다. 또한 실험 설계에서 수조의 규격은 분광

반사 측정에서 광 흡수에 영향을 주지 않는 범위를 설정하였다. 탁수환경은 깨끗한 물에 채가름 실험한 시료 실트, 모래를 정밀저울로 15,000 mg 씩 정확히 계량하여 300,000 mg까지 증가시키며 만들었다. 분광복사계의 측정과장 범위는 토사 종류와 농도를 추정하는데 유용한 400~900 nm까지의 과장범위를 선정하였다. 분광복사계를 이용한 시료의 분광반사 측정범위는 2 nm 간격으로 측정하였다. 분광복사계에 의한 자료의 수치해석은 MATLAB™ 을 이용하여 분석하였다.

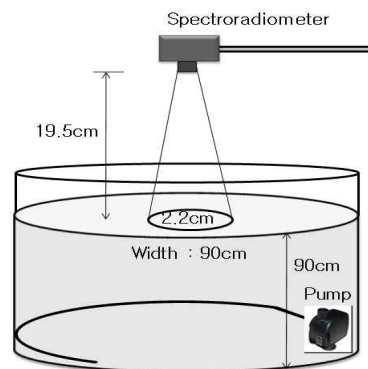


Fig. 2.1 Measurement of spectral reflectance

3. 분석 결과 및 해석

3.1 토사농도 변화에 따른 NTU 추정식

탁도와 SS와의 관계 파악을 위하여 실험을 하였다. 중량단위로 측정된 토사농도는 부피농도로 변환하여 나타내면 Table 3.1과 같다. 각각의 농도에 포함된 실트와 모래 성분의 함유량은 농도 증가와 함께 일정한 비율로 증가한다. 실험으로 얻어진 SS와 NTU의 측정 결과를 이용하여 실트와 모래의 농도에 따른 NTU_{estimation} 관계식을 추정하였다. 그 결과 식 (3-1)과 같은 2차 관계식이 성립하였다.

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (3-1)$$

여기서, $f(x)$ 는 탁도 (NTU_{estimation}), x 는 SS (mg/ℓ) 값이며 a , b , c 는 실험 결과 얻어진 계수이다(Table 3.2). 실트와 모래를 함유한 토사의 경우 토사농도와 탁도는 매우 높은 상관성을 갖는 것으로 확인되었다.

3.2 토사농도 변화에 따른 분광반사 특성

실트와 모래에 관한 분광반사는 탁도가 맑은 물 상태에서 각각의 시료를 15,000 mg 씩 계량한 시료 총 20가지를 조성하여 토사농도를 0~500 mg/ℓ 까지 증가시키면서 조사하였다. Fig. 3.1은 실트와 모래의 토사농도 변화에 따른 반사율을 400~900 nm과장 범위로 나타낸 결과이다.

실트와 모래 모두 토사농도가 높아질수록 모든 과장에서 반사율 변화 차이는 있으나 반사율이 높아지는 특징을 보였다. 실트와 모래의 반사정도를 비교하면 가시광선과 근적외선 과장영역에서 실트의 반사율이 모래보다 약 40~45 %정도 높게 나타났다. 이러한 원인은 각 토사의 광물조성과 토양 색 그리고 입자크기(표면적) 등의 영향이 반영된 결과로 해석된다. 또한 반사율은 실트질의 경우 토사농도 0 mg/ℓ(깨끗한 물)에서 300 mg/ℓ 까지 470~740 nm의 과장에서 큰 폭으로 높아지지만, 325 mg/ℓ 이후부터는 변화 폭이 낮아지는 특징을 갖는다. 모래의 경우 토사농도가 125 mg/ℓ 까지는 큰 변화를 보이거나 150 mg/ℓ 이후는 매우 적은 변화를 보인다. 근적외선영역의 반사율은

Table 3.1 Measurement NTU according to sediment concentration

Sample (mg)	SS (mg/ℓ)	NTU	
		Silt	Sand
10,000	16.7	5	5
20,000	33.3	10	10
40,000	66.7	24	21
60,000	100.0	37	30
100,000	166.7	N/A ^a	47
140,000	233.3	88	64
220,000	366.7	154	153
300,000	500.0	179	207
460,000	766.7	305	301
780,000	1300.0	677	579

^aNot available

Table 3.2 Coefficient of NTU formula

	a	b	c	R ²
Silt	0.00019	0.26528	6.86118	0.99
Sand	0.00006	0.36683	-6.00775	0.99

매우 낮은데, 이는 700~750 nm의 수분흡수 과장대에서 수분흡수 성질이 반영된 결과이며 800 nm 부근에서 다시 약간 높아지는 경향을 보인다.

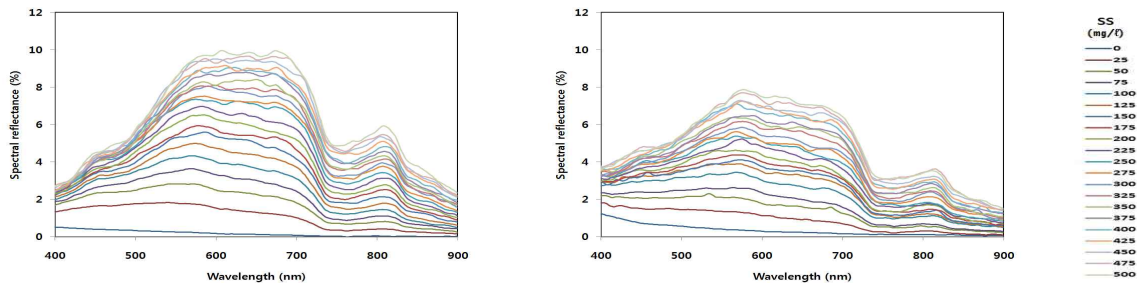


Fig. 3.1 Relationship between sediment concentration and spectral reflectance ; (a) Silt, (b) Sand

3.3 도함수와 적분해석을 이용한 최적밴드 추출

Fig. 3.2는 두 시료의 차이를 구분하기 위하여 도함수 해석을 한 결과이다. 토사농도 변화에 따른 각 과장영역에서의 1차 도함수 변화를 보면 실트와 모래 모두 510~600 nm의 Green 영역(D1) 과 730~790 nm의 Red edge 영역(D2), 790~830 nm의 Red영역(D3)에서 큰 변화를 나타내었다. 이 중 가장 큰 변화는 Red edge 경계(D2)에서 나타났다. 두 시료의 차이를 비교하면 모래는 실트에 비해 상대적으로 도함수 변화 폭이 적었으며, 두 시료 모두 토사 농도가 높을수록 도함수 변화 폭도 큰 특징을 보였다.

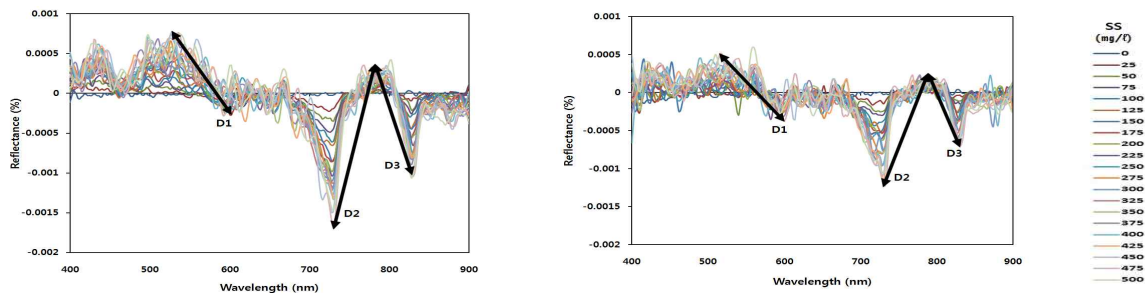


Fig. 3.2 Computed 1st derivative spectra for different sediment concentration ; (a) Silt, (b) Sand

Table 3.3은 토사 농도와 임의로 분류한 4개 영역 적분값의 상관관계를 구한 결과이다. 상관계수 값의 순서가 760~900nm(NIR), 620~700nm(Red), 520~620nm(Green), 400~520nm(Blue) 순으로 나타났다. 따라서 탁수환경의 분광반사정보 추출을 위해서는 상관계수가 0.90이상인 NIR 밴드와 Red, Green 밴드의 조합식을 활용하는 것이 매우 유용할 것으로 판단되었다.

Table 3.3 Correlation coefficients between the integral of reflectance and SS (n=21)

	Blue	Green	Red	NIR
Texture class	$\int_{400}^{520} R(\lambda)d\lambda$	$\int_{520}^{620} R(\lambda)d\lambda$	$\int_{620}^{700} R(\lambda)d\lambda$	$\int_{760}^{900} R(\lambda)d\lambda$

Silt	0.84	0.92	0.96	0.99
Sand	0.83	0.91	0.96	0.99

분석결과 탁수의 분광반사정보 추출에 가장 최적인 파장역역은 NIR>Red>Green 밴드순으로 나타났다. 그러나 탁수환경은 다양한 유기 및 무기 성분을 포함하기 때문에 하나의 관측 자료로부터 특정 성분에 대한 양적인 정보를 추출하는 것은 매우 어렵다(Goodin 등, 1993). 따라서 단일 밴드에 의한 탁도 추정보다는 다중 밴드 조합에 의한 탁도 추정이 현상 파악에 매우 유용한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 탁도 추정에 유용한 NIR, Red, Green 밴드의 조합식을 설정한 후 $NTU_{estimation}$ 과의 상관분석을 통해 탁수 추정에 유용한 조합식을 선정하였다.

Table 3.4 Correlation coefficient between NTU_{soil} and band-ratio

Band-ratio	$\frac{NIR}{Red}$		$\frac{Red}{NIR}$		$\frac{Red}{(Red+NIR)}$		$\frac{NIR}{(Red+NIR)}$		$\frac{Red}{(Red-NIR)}$		$\frac{NIR}{(Red-NIR)}$	
	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand
Soil Type												
Correlation coefficient	0.98	0.94	0.94	-0.89	-0.97	-0.93	0.97	0.93	0.98	0.95	0.98	0.95

Band-ratio	$\frac{NIR}{Green}$		$\frac{Green}{NIR}$		$\frac{Green}{(Green+NIR)}$		$\frac{NIR}{(Green+NIR)}$		$\frac{Green}{(Green-NIR)}$		$\frac{NIR}{(Green-NIR)}$	
	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand	Silt	Sand
Soil Type												
Correlation coefficient	0.98	0.96	-0.91	-0.88	-0.98	-0.95	0.97	0.95	0.99	0.98	0.99	0.98

그 결과 6개 밴드비 조합식에서 $r>0.95$ 의 높은 상관성을 보였다(Table 3.4). 실트(NTU_{silt})와 모래(NTU_{sand})의 탁도를 조합한 토사의 탁도(NTU_{soil}) 관계를 식으로 나타내면 식 (5-7)과 같다. 여기서, NTU_{silt} 와 NTU_{sand} 는 식 (3-2)을 이용하여 추정하였다.

$$SR \cdot NTU_{soil} = NTU_{silt} + NTU_{sand} \quad (3-2)$$

여기서, NTU_{silt} 는 실트의 탁도이며, NTU_{sand} 는 모래의 탁도, NTU_{soil} 은 토사의 탁도이다.

이상의 6개 밴드비 조합식(Table 3.4)과 NTU_{soil} (식 3-2)과의 상관분석을 이용하여 분광복사계를 이용한 SR- NTU_{soil} 관계식을 도출하였다. 회귀분석 결과 6개 밴드 조합식 모두 결정계수 0.67 이상의 상관성이 있는 것으로 나타났다(Table 3.5).

Table 3.5 Spectral reflectance indices used for the estimation of SR- NTU_{soil} relationship

Band-ratio(x)	SR- NTU_{soil}	R^2
$\frac{Red}{(Red-NIR)}$	$NTU_{soil} = 378.5x - 481.7$	0.74
$\frac{NIR}{(Red-NIR)}$	$NTU_{soil} = 378.5x - 103.2$	0.74
$\frac{NIR}{Green}$	$NTU_{soil} = 570.6x - 87.09$	0.71

$\frac{NIR}{(Green + NIR)}$	$NTU_{soil} = 994.6x - 142.7$	0.72
$\frac{Green}{(Green - NIR)}$	$NTU_{soil} = 242.9x - 267.1$	0.67
$\frac{NIR}{(Green - NIR)}$	$NTU_{soil} = 242.9x - 24.23$	0.67

4. 결 론

본 연구에서는 RS기법인 분광복사계와 탁도계를 이용하여 최적 밴드 조합식을 구하고 토사농도에 따른 탁도 관계식을 추정하고자 하였다. 연구 결과를 정리 요약하면 다음과 같다.

1. 탁도(NTU)와 SS와의 관계 파악을 위하여 실트와 모래에 대해 각각 실험 한 결과 두 시료 모두 2차식으로 높은 상관관계가 성립하였다.
2. 수치해석을 통해 높은 상관성을 보인 NIR 밴드와 Red, Green 밴드의 비를 이용하여 분석한 결과 $\frac{Red}{(Red - NIR)}$, $\frac{NIR}{(Red - NIR)}$, $\frac{NIR}{Green}$, $\frac{NIR}{(Green + NIR)}$, $\frac{Green}{(Green - NIR)}$, $\frac{NIR}{(Green - NIR)}$ 의 6개 밴드비에서 $r > 0.95$ 의 높은 상관성을 보였다.
3. 6개 밴드 조합식과 NTU_{soil} 과의 상관분석을 이용하여 분광복사계를 이용한 SR- NTU_{soil} 관계식을 도출하였다. 회귀분석 결과 6개 밴드 조합식 모두 결정계수 0.67이상의 상관성이 있는 것으로 파악되었다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대 홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 박종화(2003), "원격탐사(RS)기법을 이용한 충북지역 5개 토양과 갯벌토양의 식생피복 특성", 환경복원논총, 6(3), 9-16.
2. 신형섭 · 이규호 · 박종화(2009), "모래와 실트의 탁수에 대한 분광특성 분석", 한국농공학회지 논문집, 51(3), 37-43.
3. Amos, C. L. and B. S. Toplins(1985), "Discrimination of Suspended Particulate Matter in the Bay of Fundy using the Nimbus Coastal Zone Color Scanner," *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11, 85-92.
4. Clark, E. H.(1987), *Soil Erosion : Off-Site Environmental Effects. In Agricultural Soil Loss: Process, Policies, and Prospects*, edited by J. M. Harlim and G. M. Berardi, Westview Press, 59-90.
5. Goodim D. G., L. Han, R. N. Fraser, D. C. Rundquist, W. A. Stebbins (1993), "Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(4), 505-510.