

# 원격탐사 기술의 토사정보 활용방안

## - 토사에 의한 탁수 환경을 중심으로 -



신형섭 |

한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 석사후연구원  
hydsubi@kict.re.kr



박종화 |

충북대학교 지역건설공학과 교수  
jhpak7@chungbuk.ac.kr



김규호 |

한국건설기술연구원 하천·해안항만연구실 책임연구원  
khkim1@kict.re.kr

### 1. 머리말

최근 산업의 발달과 경제성장은 지속적인 인프라 구축을 요구하고 이로 건설되는 산업단지와 택지개발 및 도로공사 등은 토지이용·피복을 변화시켜 많은 토사를 발생시킨다. 또한 가뭄과 함께 발생하는 산불 및 홍수는 산림을 황폐화하고 토지피복 상태를 악화하여 토사발생과 유출의 원인이 되고 있다. 이와 같이 개발과 자연재해로 노출된 토사는 강우와 물의 흐름에 의해 유출되면서 하천과 저수지

에 침전 또는 수송 및 퇴적 과정을 거치며 이동하게 된다. 발생 토사중 입자가 큰 것은 유입지점 주위에 침전 또는 퇴적되지만, 미세한 토사는 난류 흐름과 브라운운동 등으로 서로 섞이면서 부유물의 형태로 이동한다. 이렇게 발생하여 유송된 토사는 농업용 저수지, 하천, 댐 및 하구를 메워 수리구조물의 수명을 단축시키기도 하고, 수질을 악화시키는 원인이 되기도 한다(Clark, 1987). 토사에 의해 형성된 탁수는 수서생물에 영양분을 제공하기도 하지만 탁수환경을 지속시켜 수중에 태양복사에너지 전달을 방해하여 수중생태계의 먹이사슬과 저서생물의 서식환경에 부정적인 영향을 주기도 한다. 특히 농업용 저수지는 반폐쇄성 수역으로써 탁수환경에 노출되기 쉬우며, 수질회복에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 탁수에 분포하는 토사 구성 물질의 종류와 양 및 공간적 분포 파악은 수질문제와 재난 예방 및 생물의 서식환경 문제를 파악하는데 매우 중요하다.

탁수환경은 시·공간적으로 변하기 때문에 조사 지점이 많을수록 대상지역 평가의 정확도는 높아지나 그에 따른 장비, 인력, 시간, 비용 등의 문제를 수반한다. 반면에 조사지점이 적으면 수역 전체의 탁수 분포를 알기 위한 데이터의 정밀도가 떨어진다. 이러한 문제해결을 위한 광역적인 탁수환경의 분석방법으로는 원격탐사(Remote Sensing, 이후 RS)기법이 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

위성영상과 항공영상의 활용은 저수지나 하천의 탁수환경변화를 시·공간적으로 분석하는데 매우 큰 이점이 있다. 그러나 중·저해상도 위성영상은 낮은 공간해상도(Landsat의 경우 30 m) 때문에 농업 저수지와 같이 규모가 작고 불규칙한 형태에 대한 정밀한 공간특성 파악에 어려움이 있다. 또한 고해상도 위성영상은 촬영주기와 구매비용 문제 때문에 적극적인 활용에 한계점을 갖는다. 이러한 이유 때문에 영상을 이용하여 어떠한 대상체를 분석하기 위해서는 그 사물에 대한 기초 데이터 즉 분광학적특성 연구가 선행되어야 한다.

현재 국내에서는 식생 및 토양특성과 같은 지표 피복물을 대상으로 하는 분광반사특성 규명에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으나 수역에 대해서는 부족한 실정이다. 수역은 대부분의 파장영역에서 높은 흡수율을 나타내므로 반사되는 분광특성이 뚜렷하지 않고, 또한 현장조사의 어려움 때문에 RS기법과 연계된 기반연구가 부족하다. 따라서 본 보고에서는 RS기술을 적용하여 측정하는 분광반사의 이론적 특성을 알아보고 수질을 분석한 국내의 사례에 대해 간단히 살펴보고자 한다. 또한 탁수환경에의 적용 및 성과 그리고 향후 연구방향에 대해 간단히 소개하고자 한다.

## 2. 분광반사특성이란?

지구상에 존재하는 모든 물체는 각기 다른 양의 전자파에너지를 흡수, 반사, 투과하는 특성을 가진다. 전자파에너지에 대한 물질 고유의 파장특성을 분광특성(spectral characteristics)이라 한다(Jensen, 2000). 모든 물질은 원자와 분자로 구성되어 그 조성은 물질마다 고유하다. 따라서 물질은 물질상태에 따른 고유한 파장의 전자파에너지를 반사 또는 흡수하게 된다. 이러한 물질에 따른 빛의 흡수, 반사, 투과 특성들은 물질 고유의 성질과 상태를 알 수 있게 해준다. 입사된 에너지가 반사되거

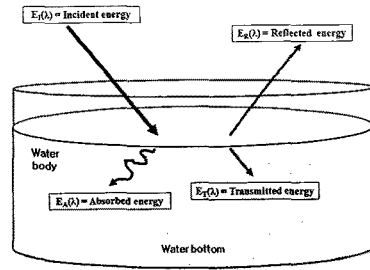


그림 1. 수체에서의 에너지 상호작용

나 흡수 또는 투과되는 비율은 지표물질의 형태 및 상태에 따라 변하며, 지표물질의 종류에 따라 그 비율이 다양하게 변화한다. 이러한 차이를 이용하여 지표면 물질들이 구분되어진다. 또한 동일 물질에서도 파장에 따라 에너지의 반사, 흡수 또는 투과되는 비율이 다르다. 특정 분광영역의 에너지특성을 이용하면 각 물질의 시간별 변화특성을 찾아낼 수 있다. 전자파에너지가 특정 지표물에 입사하였을 때, 기본적으로 지표물질은 그림 1과 같은 에너지 상호작용이 발생한다.

예를 들어 수체에 입사된 태양에너지는 그림 1과 같이 물에 의해 반사, 흡수되거나 투과된다. 에너지 보존법칙을 이용하여 수체에서의 에너지 상호작용을 나타내면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 파장,  $E_i$ 는 입사에너지,  $E_r$ 은 반사에너지,  $E_A$ 는 흡수에너지 그리고  $E_T$ 는 투과에너지이다. 이 때 모든 에너지 요소는 특정 파장  $\lambda$ 에 대해 발생하는 값이다. 이와 같이 지표면에 입사된 에너지와 지구관측위성 센서에 기록된 전자파에너지는 센서와 대상물 사이의 대기작용에 의해 차이가 난다. 태양광은 지표면에 도달할 때까지 대기물질에 의해서도 흡수·산란되어 전자파에너지는 감소한다. 또한 지표면에 입사한 전자파에너지는 대상물로부터 반사·산란된 광이 센서에 도달할 때까지도 흡수·산란된다. 그리고 지구관측위성 센서에는 대상물로부터 반사·산란된 광 이외에 대기 스스로 반사체로 작용하여 산란된 통과 복사휘도(Path

radiance)도 함께 입사한다. 이러한 대기효과를 수학적으로 표현하면 식 (2)와 같다(Lillesand, 1999).

$$L_{tot} = \frac{\rho ET}{\pi} + L_p \quad (2)$$

여기서,  $L_{tot}$ 는 인공위성 센서에서 측정되는 전체 분광 복사량,  $\rho$ 는 대상물체의 반사율,  $E$ 는 대상물체에 입사하는 복사량, 즉, 입사에너지  $E_i$ 이며,  $T$ 는 대기 투과율,  $L_p$ 는 대기에서 발생된 통과 복사휘도이다. 그러나 현장에서 휴대용 분광복사계를 이용하여 대상물체에 대한 반사율을 측정할 경우에는 대기에서 발생하는 통과 복사휘도나 대상물체에서 반사되는 전자기파 에너지가 대기의 영향을 거의 받지 않기 때문에 대기의 영향은 고려하지 않아도 된다. 즉  $L_p$ 는 무시되고  $\frac{\rho ET}{\pi}$  값만 측정되게 된다.

### 3. RS 기술을 이용한 토양특성과 수질관련 연구의 국내외 기술동향

국내에서 수행된 RS기술을 이용한 분광반사 특성 연구를 살펴보면, 정원교 등(2000)은 분광복사계를 이용하여 표토의 분광반사특성과 토양특성과의 상호관계를 규명코자 하였다. 그 결과 토양중 수분 및 총 탄소 함량이 높을수록 각 파장대 반사율이 낮게 나타나며, 각 수준별 통계적 유의차가 인정된다고 하였다. 박종화 등(2003)은 RS기법을 이용하여 토양의 분광반사특성에 관한 기초자료를 수집하고 이를 해석하였다. 그 결과 토양의 분광반사특성은 토양의 종류에 따라 토양 고유의 분광반사곡선을 가지며, 가시광선과 근적외 파장의 분광반사율 곡선은 파장이 길어짐에 따라 토양의 반사율이 증가한다는 것을 확인하였다. 또한, 토양조성성분의 영향이 에너지의 흡수와 반사특성으로 반영된다고 하였다.

국외의 경우 Bowers 등(1965)은 자연함수비 조건에서 Newtonian silt loam이 습한 상태로 변화

되거나 유기물함량이 2%를 넘으면 가시광선 파장대부터 근적외 파장대까지 반사율이 낮아진다는 것을 밝혀냈다. Piech 등(1974)은 토립자 크기에 따라 토양의 반사율이 달라지며 입자가 작을수록 반사율이 높아진다고 하였다. 특히 작은 토립자는 입자 공극을 적게 하여 표면을 평평하게 만들어 빛의 반사를 높이는 작용을 하며 굵은 토립자는 빛을 흡수하는 역할을 하여 반사율이 낮아진다고 하였다. Schiebe 등(1992)은 RS기법을 이용하여 부유사에 대해 연구하였으며, 수체에서 부유사의 분광 및 물리적 특성의 상관관계를 모델로 제시하였고, 이를 이용하여 부유사농도를 측정할 수 있는 모델을 개발하였다. Lodhi 등(1997)은 분광복사계를 이용하여 부유사 특성을 연구한 결과 580~690 nm의 가시광선 파장영역은 수표면 부유사의 종류와 정보를 제공할 수 있고, 714~880 nm의 근적외 파장영역은 부유성 미네랄이 다량으로 함유된 수표면의 부유 무기물 양을 추정하는데 유용한 파장영역이 된다고 하였다. Karabulut 등(2005)은 분광복사계를 이용하여 유기물 함량이 서로 다른 3종류의 토양에 대해 분광반사특성을 연구한 결과 400~900 nm 영역에서 탁도의 광범위한 변화를 모니터링 할 수 있다고 하였다. 이와 함께 유기물 함량이 높을수록 분광반사율도 높게 나타난다는 것을 증명하였다.

### 4. 탁수환경에서의 분광복사계 적용

기존에 수행되어온 연구를 종합해보면 분광반사 특성은 각 재료의 구조, 함수비, 구성성분 등에 따라 각기 다르게 나타난다는 것이 보고되고 있다. 따라서 탁수환경의 경우 수체와 연구하고자 하는 지역의 토사에 관한 분광특성 파악이 필요한 것으로 나타났다. 신형섭 등(2009)은 토사 재해 파악에 대한 기초연구로 분광복사계를 이용하여 농업용 저수지와 하천에 영향을 미치는 실트와 모래를 대상으로 토사농도와 분광반사특성의 상호관계를 파악하

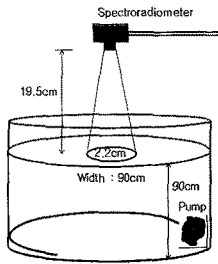


그림 2. 분광반사 측정

였다. 측정 장비에 대한 개요는 그림 2와 같다. 수조는 저수지와 유사한 조건을 맞추기 위해 수조 바닥에 배수펌프를 설치하여 물이 계속 유동하는 환경을 조성하였다.

대상 물체의 반사를 측정은 먼저 수체에서 반사되는 전자파에너지를 Telescope/Microscope로 받아 연결되어 있는 광케이블을 통해 휴대용 분광복사계로 보내준다. 보내진 전자파에너지 값은 분광복사계에서 파장대별로 분리되어 Text 형식으로 저장된다. 이 때 전자파에너지 값은 계절별, 시간대별로 태양복사에너지의 변화에 따라 변화하므로 여기서 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해 반사율개념을 도입한다(Nicodemus, 1977).

반사율  $R(\lambda)$ 는 99 %의 반사특성을 갖는 표준백색판 으로부터 반사되는 전자파에너지와 대상물체에서 반사되는 전자파에너지의 비로 계산하였다. 이 관계는 식 (3)과 같다.

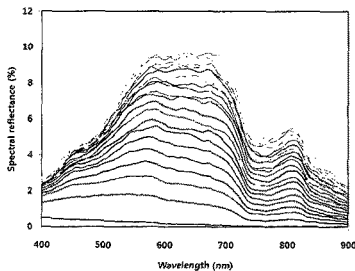
$$R(\lambda) = \frac{I_o(\lambda)}{I_r(\lambda)} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서,  $\lambda$ 는 파장,  $R(\lambda)$ 는 반사율,  $I_o(\lambda)$ 는 대상 물

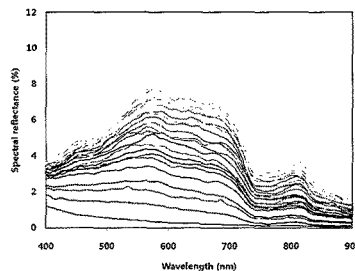
질로부터 반사되는 전자파에너지,  $I_r(\lambda)$ 는 표준 백색판으로부터 반사되는 전자파에너지이다.

저수지 토사에 의한 탁수환경 파악은 저수지 토사 채취 후 탁수환경을 제작하여 측정하고 분석하였다. 세류사와 부류사에 따른 영향을 검토하기 위하여 모래와 실트로 구분하고 토사농도 변화에 따른 분광반사특성을 조사한 결과를 나타내면 그림 3과 같다. 실트와 모래에 관한 분광반사는 탁도가 맑은 물 상태에서 각각의 시료를 15,000 mg씩 계량한 시료 총 20가지를 조성하여 토사농도를 0~500 mg/l 까지 증가시키면서 조사하였다. 그 결과 토사농도와 분광반사특성은 일정한 상관관계가 성립하는 것으로 나타났다.

토사 농도변화에 따른 실트와 모래에 대해 각 파장별 상관관계를 조사한 결과 그림 4와 같았다. 상관분석 결과 각 토사의 상관계수는 실트가 0.81~1.0의 범위를 보이고, 모래가 0.90~1.0으로 두 시료 모두 매우 높은 상관성을 보였다. 실트와 모래는 모두 500~900 nm영역에서  $r > 0.90$ 의 높은 상관성을 보였다. 특히 710~900 nm파장에서는 두 시료 모두  $r > 0.98$ 으로 상관성이 매우 높게 나타났다. 따라서 탁수에서 토사농도에 따른 영향을 분석하는데 710 nm이상의 근적외 파장영역이 매우 유용한 파장인 것으로 파악되었다. 한편 모래와 실트 두 시료를 비교한 결과, 가시광선과 근적외 파장영역에서 모래가 실트보다 높은 상관성을 갖는 것으로 확인되었다. 그러나 시료는 달라도 농도변화에 따른 분광반사는 매우 유사한 변화를 하는 것으로 파악



(a)실트(silt)



(b)모래(sand)

그림 3. 토사농도 변화에 따른 분광반사특성

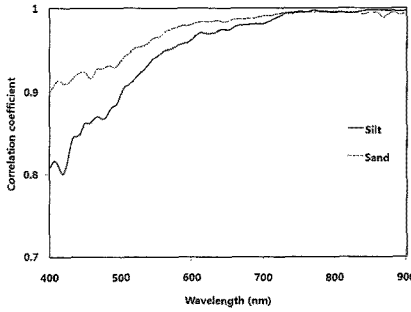


그림 4. 토사농도와 분광반사의 상관관계

되었다. 이와 같이 RS는 탁수환경 수체의 토사농도 변화 등에 관한 정보를 파악할 수 있는 장점을 갖는다. 따라서 아리랑위성(KOMPSAT) 등 과학위성 발사를 계기로 토사에 의한 탁수환경 모니터링에 RS기법을 적극적으로 활용해갈 필요성이 있을 것이다. 또한 이는 재해예방과 재난관리에 매우 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 맺는말

분광복사계를 이용하여 탁수환경을 측정할 결과 토사 종류와 농도변화에 따라 뚜렷한 차이가 있는 것이 확인되었고, 분광복사계의 활용 가능성을 확인하였다. 얻어진 결과 등을 토대로 몇 가지 향후 연구방향을 제시하고자 한다.

현재 우리나라는 KOMPSAT의 발사를 계기로 인공위성과 항공기로부터 지표상황을 관측하는 RS

기술과 얻어진 데이터를 이용목적에 따라 가공하는 영상처리기술은 비약적으로 발전하고 있다. 다만 분석하고자 하는 대상체의 분광학적 특성에 관한 선행연구가 이루어져야 위성 또는 항공영상을 이용할 경우 보다 정확하고 정밀한 정성적·정량적 정보추출 및 분석을 할 수 있다. 현재 많은 선진국에서 RS를 이용한 광역적인 수질환경 연구는 활발히 진행되고 있다. 특히 최근에는 고분광센서를 이용한 수질의 참조 자료연구가 활발히 진행되고 있는 추세이나 우리나라는 그렇지 못한 실정에 있다. 이는 항공기 탑재 고분광센서가 없는 국내에서 고분광 영상자료의 획득을 미국의 Hyperion이나 유럽의 CHRIS와 같은 고분광 센서에 의존할 수밖에 없기 때문이다. 그러나 고분광영상의 활용 잠재력을 감안한다면 수질의 분광반사특성 자료 확보와 정보 획득을 위한 제반 처리기술 개발이 시급하다. 본 보고에서 소개한 연구와 같이 정밀하게 조사된 탁수의 분광반사특성 데이터를 축적하고 위성 또는 항공영상에 적용하여 대상물을 분석한다면 더욱 정밀한 분석이 이루어질 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08 기술혁신FO1)에 의한 차세대 홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. ☺

## 참고문헌

1. 박종화(2003), "원격탐사(RS)기법을 이용한 충북지역 5개 토양과 갯벌토양의 식생피복 특성", 한국환경복원녹화기술학회지, 제6권, 제3호, pp. 9-16.
2. 신형섭·이규호·박종화(2009), "모래와 실트의 탁수에 대한 분광특성 분석", 한국농공학회지, 제51권, 제3호, pp. 37-43.
3. 정원교·임상규·홍석영·김무성(2000), "토양입자의 크기와 깊이에 따른 분광반사특성의 변화", 한국국제농업개발학회지, 제12권, 제2호, pp. 182-186.

4. Bowers, S. A. and R. J. Hanks(1965), "Reflection of Radiant Energy from Soil," Soil Science, Vol. 100, No. 2, pp. 130-138.
5. 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, pp. 59-90.
6. Jensen. J. R.(2000), Remote Sensing of The Environment, Pearson Prentice Hall, pp. 401-415.
7. Karabulut. M. and N. Ceylan(2005), "The Spectral Reflectance Responses of Water with Different Levels of Suspended Sediment in The Presence of Algae," Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences ,Vol. 29, pp. 351-360.
8. Lillesand, T. T. and R. W. Kiefer(1994), Remote Sensing and Image Interpretation(3rd ed.), John Wiley and Sons Inc, pp. 49-147.
9. Lodhi, M. A., D. C. Rundquist, L. Han, and M. S. Kuzila(1997), "The Potential for Remote Sensing of Loess Soils Suspended in Surface Waters," Journal of the American Water Resources Association, Vol. 33, No. 1, pp. 111-117.
10. Piech, K. R. and J. E Walker(1974), "Interpretation of Soils," Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 40, pp. 87-94.
11. Schiebe, F. R., J. A. Harrington, and J. C. Ritchie(1992), "Remote Sensing of Suspended Sediment: The Lake Chicot, Arkansas Project," International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, No. 8, pp. 1478-1509.