

모래와 실트의 탁수에 대한 분광특성 분석

Analysis of Spectral Reflectance Characteristics for Sand and Silt Turbid Water

신형섭* · 이규호* · 박중화**†

Hyoung Sub Shin* · Kyu Ho Lee* · Jong Hwa Park**†

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the basic relationships between spectral reflectance and varying concentrations of sediment in surface waters. An experimental method for determining suspended sediment concentration (SSC) in the water by use of a spectroradiometer above the water surface, in visible and near-infrared (NIR) wavelengths, is applied. The main advantage of the method is the direct comparison of spectral reflectance and the SSC, but it requires an accurate knowledge of the water body and sediment. Therefore numerous spectroradiometric measurements are carried out in situ measurements, for SSC, ranging from zero to 100 percentage and two types of sediment applied in the water tank. The results indicate that the suspended sediment causes increasing spectral reflectance response in waters. We observed that spectral reflectance increases with SSC, first at the lower wavelengths (430 - 480 nm), then in the middle wavelengths (570 - 700 nm), and finally, in the NIR domain (800 - 820 nm); a characteristic maximum reflectance appears at 400-670 nm. Relationships between the wavelength, integral value, and the SSC were evaluated on the basis of the regression analysis. The regression curve for the relation between the wavelength, integral value, and the SSC were determined ($R^2 > 0.98$). Finally, the specular wavelength can be estimated to recognize the sediment and to improve SC estimation accuracy in the water.

Keywords: Spectroradiometer; sediments; visible; near-infrared (NIR); spectral reflectance

1. 서 론

최근 가뭄과 함께 발생하는 많은 산불은 산림을 황폐화하고 토지피복 상태를 약화하여 많은 토사와 나뭇잎 등을 떠내려가게 하는 원인이 되고 있다. 또한 산업의 발달과 경제성장은 많은 인프라 구축을 요구하고 이로 인해 건설되는 산업단지와 택지개발 및 도로공사 등은 토지 이용/피복을 변화시켜 많은 토사를 발생시킨다. 개발로 인해 나지로 노출된 토사는 강우와 흐름에 의해 유출되면서 하천과 저수지에 침전 또는 수송 및 퇴적 과정을 거치게 된다. 발생 토사중 입자가 큰 것은 유입지

점 주위에 침전 또는 퇴적되지만, 미세한 토사는 난류 흐름과 브라운운동 등에 의해 혼합되어 부유하면서 부유물의 형태로 이동하게 된다. 이렇게 발생하여 유송된 토사는 농업용 저수지, 하천, 댐 및 하구를 메워 수리구조물의 수명을 단축시키기도 하고, 수질을 악화시키는 원인이 되기도 한다 (Amos and Toplins, 1985; Clark, 1987). 홍수시 절개지와 공사 현장에서 유출된 토사는 범람하여 농작물을 덮어 막대한 경제손실을 가져오기도 하며 하천범람과 제방붕괴의 원인이 되어 막대한 재산피해를 가져온다. 또한 유입 토사는 탁수환경을 지속시켜 수중에 태양복사에너지의 전달을 방해하여 수중생태계의 먹이사슬과 저서생물의 서식환경에 많은 영향을 주고 있다 (Bhargava and Mariam, 1990). 이와 같이 저수지와 하천수는 상류유역의 흐름 조건에 따라 다양한 탁수환경을 이룬다. 이러한 탁수는 수서생물에 영양분을 공급하는 역할을 하기도 하지만 자연재해의 원인이 되기도 하고 수질을 악화시키기도 한다. 따라서 물속에 분포하는 부유성 물질의 종류와 양, 공간적 분

* 충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과 대학원

** 충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2577

Fax: +82-43-271-5922

E-mail address: jhpak7@cbnu.ac.kr

2009년 4월 29일 투고

2009년 5월 15일 심사완료

2009년 5월 18일 게재확정

포 파악은 수질문제와 재난 예방 및 생물의 서식환경 문제를 파악하고 해결하는데 매우 중요하다.

탁수는 물속의 클로로필과 밀접한 관계를 가지고 있어 수역의 생산성과 관련이 깊은 것으로 보고되고 있다 (Quibell et al., 1991; Goodin et al., 1993; Han, 1997). 따라서 수역의 광역 특성파악을 위해서는 물이 갖는 특성 분석과 토사가 갖는 분광반사특성을 면밀하게 분석하여 활용하는 것이 유용할 것이다. Lodhi et al. (1997)은 분광복사계를 이용하여 부유사의 특성을 연구한 결과 흙의 종류와 부유사의 농도를 추정할 수 있는 파장대를 추정하였다. Kameyama et al. (2001)은 일본 북해도연안 구시로 지역의 Landsat TM 영상을 대상으로 분광혼합분석을 이용한 Water Turbidity Index (WTI)와 탁도 추정 모델을 개발하였다. 그러나 국내에서의 부유사에 관한 연구는 실측 장비구입 등 여러 가지 불리한 현장여건 때문에 현장실험 및 실측 연구가 활발하지 못한 실정이다 (Lee et al., 2006). 현재까지 개발된 실측 장비로는 시·공간적으로 변동하는 부유사 농도의 특성을 충분히 관측하고 이해하는 데 한계가 있다 (Cho et al., 2002).

한편, 인공위성이나 항공기 또는 현장에서 직접 취득되는 지표 피복물에 대한 분광학적 특성 자료는 태양광의 파장대별 반사 특성을 수치화한 자료로서 위성데이터를 효율적으로 분석하고 해석하는데 필요하다. 이와 함께 인공위성과 항공기로부터 지표 상황을 관측하는 원격탐사기술과 얻어진 데이터를 이용목적에 따라 가공하는 영상처리기술은 비약적으로 진화하고 있다. 토사 정보의 정량적 정성적 추출 및 분석에 원격탐사기법의 활용성이 증대되고 있으나 우리나라에서는 실측에 의한 연구가 활발하게 진행되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 토사 재해 파악에 대한 기초연구로 분광복사계를 이용하여 농업용 저수지와 하천에 영향을 미치는 실트와 모래를 대상으로 토사농도와 분광반사특성의 상호관계를 파악하고자 하였다. 또한 최대반사파장과 적분치 분석 방법을 이용하여 토사농도를 추정할 수 있는 최적의 파장영역을 추출하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료

실험 재료는 토사유출이 많이 발생할 수 있는 개발지의 토사를 이용하였다. 시료는 충북 청주시 흥덕구 개신동소재 충북대학교 산림지 공사 현장에서 채취하였다. 채취시료는 하천과 저수지에 유입되어 탁수환경을 만드는 절개지 토사의 일종이다. 채취 토사는 체가름을 실시하여 모래 (2.0~0.075 mm)와 실

트 (0.075~0.002 mm)로 분류하여 각 시료에 대한 물리적 특성분석과 분광반사특성을 조사하였다.

2. 실험방법

분광반사 측정 장비는 분광복사계 (Li-1800, Li Cor Inc), Telescope/Microscope, 표준백색판 (BaSO₄ 교정판), 받침대, 노트북, 수조, 배수펌프 (PDV-270M)이다. 실험용 수조는 Fig. 1과 같이 모든 빛을 흡수하는 흑색 수조를 사용하였다. 수조는 저수지와 유사한 조건을 맞추기 위해 수조 바닥에 배수펌프를 설치하여 물이 계속 움직이는 환경을 조성하였다. 또한 실험설계에서 수조의 규격은 분광반사 측정에서 광의 흡수에 영향을 주지 않는 범위를 설정하였다. 탁수환경은 수돗물에 체가름 실험 한 시료 (실트, 모래)를 정밀저울로 15 g 씩 정확히 계량하여 300 g까지 증가시키며 조성하였다. 실험은 탁수환경이 제대로 만들어지는지를 확인하기 위하여 토사 침강을 자유롭게 한 경우와 균일한 탁수환경 조성을 위하여 수중펌프를 수조내부에 설치한 경우로 나누어 실시하였다.

물과 토사의 분광반사특성 파악을 위해서는 파장영역의 선정 또한 매우 중요하다. 분광복사계의 측정파역은 300~1100 nm 이나, 수면 측정시 300~400 nm의 파장과 900 nm이후의 파장영역에서는 반사특성이 불규칙하거나 물의 흡수특성이 반영되어 매우 낮은 반사율을 갖는다. 따라서 파장영역은 부유물질의 종류와 농도를 추정하는데 유용한 400~900 nm까지의 파장범위를 선정 (Lodhi et al., 1997)하였으며, 분광복사계를 이용한 시료의 분광반사는 2 nm 간격으로 측정하였다.

실험 방법은 먼저 태양복사에너지를 99 % 반사하는 표준백색판을 측정한 후 설정 탁수환경에서 물 표면에서 반사되는 반사에너지를 측정하였다. 모든 시료에 대한 측정을 끝낸 후

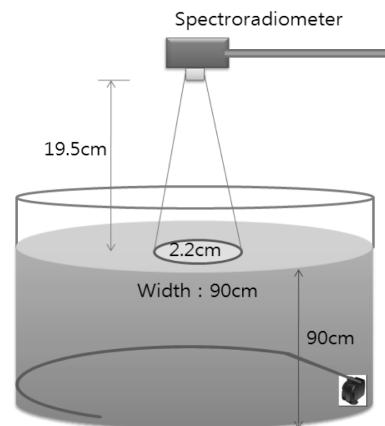


Fig. 1 Schematic diagram of spectral reflectance measurement system

다시 표준백색판을 측정하여 실험하는 동안의 태양에너지 변화를 조사하였다.

실험 조건은 수조의 토사농도 (sediment concentrations, 이후 SC)가 증가되는 과정을 가정하여 설정하였다. 즉 토사농도 0 %는 맑은 물 상태이며, 15 g 씩 계량한 시료를 총 20개 조성하여 5 %씩 증가시켜 100 %까지 만들어 실험하였다.

3. 분광 반사율 (spectral reflectance) 계산

탁수환경의 분광반사율은 태양의 전자파 복사에너지 99 %의 반사특성을 갖는 표준백색판에서 반사되는 양과 대상 탁수환경에서 반사되는 분광반사에너지의 비로 계산하였다. 이 관계를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$Reflectance(\%) = \frac{Soil_o(\lambda)}{Sun_T(\lambda)} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 Reflectance (%)는 반사율, λ 는 파장, $Soil_o(\lambda)$ 는 탁수 환경에서 반사되는 분광반사에너지, $Sun_T(\lambda)$ 는 표준백색판의 반사 태양복사에너지이다.

4. 적분 (integral) 분석

채가름 시료에 대해 분광반사율을 측정한 다음 탁수 특징을 가장 잘 표현해주는 파장을 구하기 위하여 첫째 400~900 nm 파장영역에 대한 적분과, 둘째 가시광선에서 색의 특징을 갖는 3개 파장영역과 근적외선 특징을 갖는 2개 밴드로 분류한 5개 밴드에 대해 각각 적분분석을 실시하였다. 파장별로 분류한 5개 밴드는 각각 Blue (400~500 nm), Green (500~600 nm), Red (600~700 nm), NIR-1 (700~800 nm) 및 NIR-2 (800~900 nm)이다. 각 파장영역의 적분은 식 (2)와 같이 구하였다.

$$Int. = \int R(\lambda) d\lambda = \sum_{i=k}^N R\left(\frac{1}{2}[\lambda_i + \lambda_{i+1}]\right) \Delta\lambda \quad (2)$$

여기서, $Int.$ 는 각 파장영역의 적분치이다.

III. 결과 및 고찰

1. 토사 농도변화에 따른 분광반사율

농업용 저수지나 하천 및 댐 등에 유입되는 토사는 토사발생 원에 따라 다양한 농도와 입도분포를 갖는다. 이러한 토사가

갖는 특성을 정확하게 추출하기 위해서는 무엇보다 실험조건외의 확립이 중요하다. 토사가 갖는 분광특성 확인을 위하여 실트 및 모래 농도를 차례로 증가시켜 수중모터를 사용하지 않은 조건에서 측정된 탁수환경의 반사율은 두 시료 모두 가시광선과 근적외선 파장영역에서 거의 비슷한 양상을 보였다. 그러나 실트질의 경우 반사율이 일정하지 않고 곡선이 파형으로 변화하여 특성 파악이 어렵다. 이러한 현상은 입자가 상대적으로 작은 실트질의 경우 난류 흐름 등의 영향을 받아 반데르발스 인력 (Van der Waals forces)이 작용하여 입자간 브라운 운동이 활발하게 진행된 결과를 반영한 결과로 해석된다 (Parsegian, 2005). 이에 반해 모래는 토사 중력이 부력보다 커 빠른 침강으로 파형은 실트보다 훨씬 적게 나타났다. 따라서 이러한 문제 해결을 위하여 수중모터를 사용한 결과 매우 균질인 탁수환경이 조성되었다. 분석은 이렇게 얻어진 결과를 이용하여 실시하였다.

또한 실트와 모래에 관한 분광반사는 탁도 0 % 즉 맑은 물

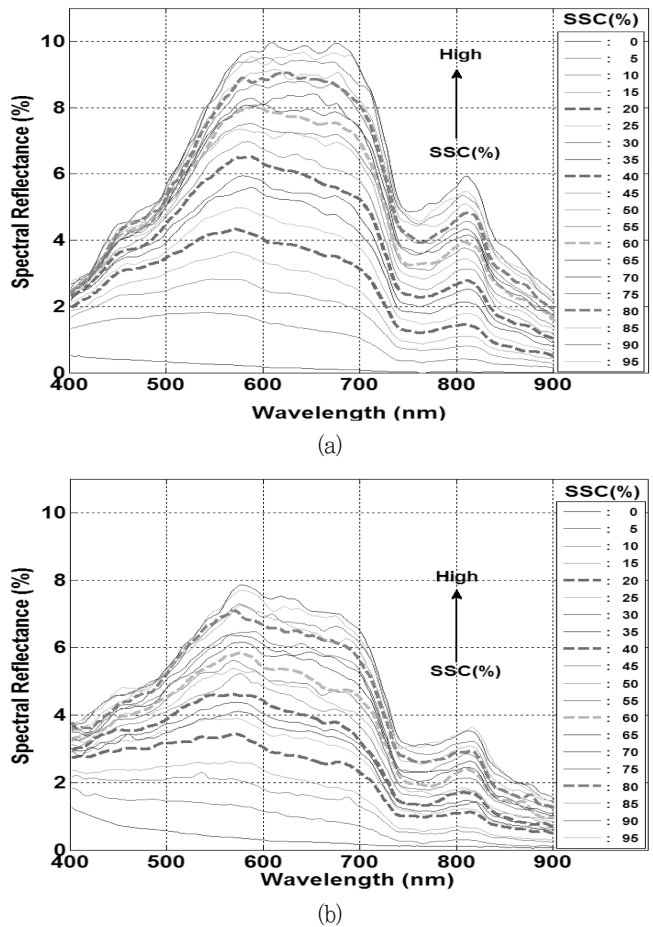


Fig. 2 Relationship between SSC and spectral reflectance; (a) Silt, (b) Sand

상태에서 각각의 시료를 15 g 씩 계량한 시료 총 20가지를 조성하여 토사농도를 5 %씩 증가시켜 100 %까지 만들어 조사하였다. Fig. 2는 실트와 모래의 토사농도 변화에 따른 반사율을 400~900 nm파장 범위로 나타낸 결과이다. 실트와 모래 모두 토사농도가 높아질수록 모든 파장에서 반사율 변화 차이는 있으나 높아지는 특징을 보였다. 실트와 모래의 반사정도를 비교하면 가시광선과 근적외선 파장영역에서 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 % (물)에서 60 %까지 470~740 nm의 파장에서 큰 폭으로 높아지지만, 65 %이후부터는 변화 폭이 낮아지는 특징을 갖는다. 모래의 경우는 토사농도 25 %까지는 큰 변화를 보이거나 30 % 이후는 매우 적은 변화를 보인다. 두 시료의 차이는 입자가 큰 모래의 경우 토사농도 30 %를 경계로 얇은 토사농도에서는 물과 모래의 영역이 같이 반영되나 30 %지점부터는 모래의 반사특성이 지배요인이 되어 물의 반사특성이 매우 적게 반영된 결과로 해석된다. 근적외선영역의 반사율은 매우 낮는데, 이는 750 nm의 수분흡수 파장대에서 수분흡수 성질이 반영된 결과이며 800 nm 부근에서 다시 약간 높아지는 경향을 보인다.

2. 최대반사파장 분석

토사농도 변화에 따라 최대반사파장에서 어떠한 차이가 있는지를 분석하였다. 그 결과 Fig. 3과 같이 두 시료 모두 가시광선 영역인 400~670 nm 파장영역에서 최대반사를 보였다. 토사농도가 높아질수록 최대반사파장도 높은 파장으로 이동하였다. 최대반사파장은 토사농도가 낮은 10 %미만의 경우 Blue 파장에서 나타나지만, 농도 10 %이상은 Green 파장으로 이동하는 특징을 보인다. 토사농도가 100 %일 때 모래는 580 nm, 실트는 600 nm 부근에서 가장 높은 반사율을 보였다. 두 시료를 비교하면 실트가 모래에 비해 모든 토사농도에서 약간 높은 최대반사를 하였으며, 실트의 경우 토사농도 70 % 이상에서 Red 영역이 최대반사를 나타냈다. 이와 같은 결과는 탁수도 실트와 모래의 중량이 같을 경우 실트가 모래보다 높은 파장에서 분광반사 반응을 나타내는 것으로 파악되었다.

실트와 모래의 최대반사파장의 상호관계는 Fig. 4와 같이 2차식으로 높은 상관성이 파악되었다. 그 관계는 식 (3)과 같다.

$$Sand_{max} = 0.032Silt_{max}^2 + 0.37Silt_{max} + 1.1 \quad (3)$$

여기서 $Silt_{max}$ 와 $Sand_{max}$ 는 각각 실트와 모래의 최대분광반사율이다.

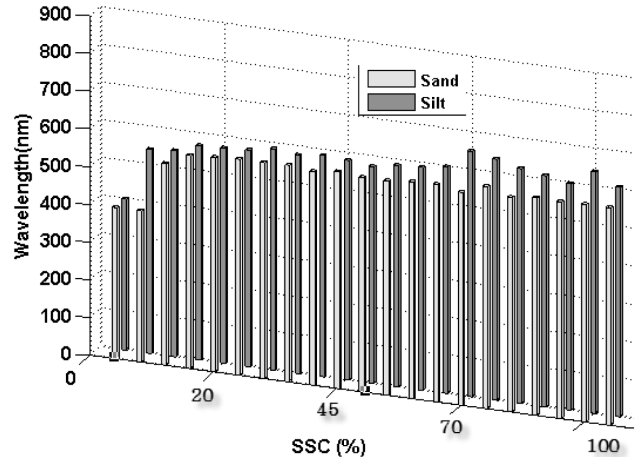


Fig. 3 Spectral positions of peak reflectance with varying SSC

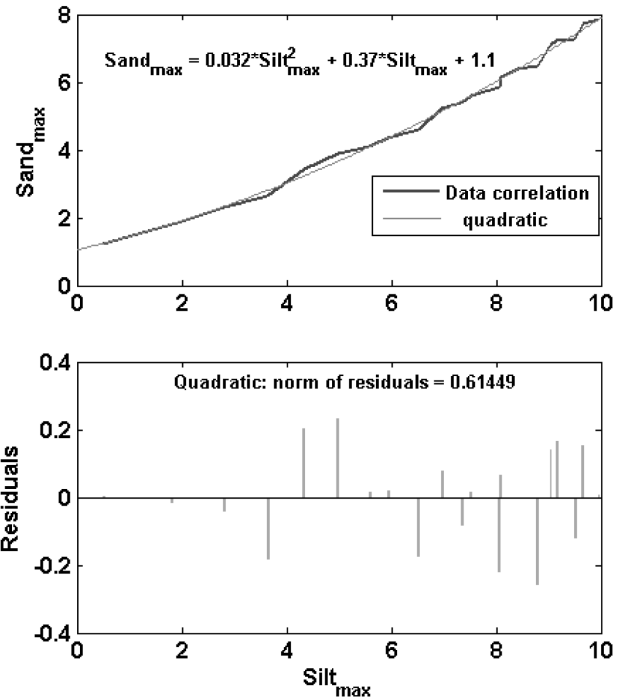


Fig. 4 Relationship between $Silt_{max}$ and $Sand_{max}$, and residuals

3. 분광반사의 상관분석

토사 농도변화에 따른 실트와 모래 각 파장의 상관계수는 Fig. 5와 같다. 상관분석 결과 각 토사의 상관계수는 실트가 0.81~1.0의 범위를 보이고, 모래가 0.90~1.0로 두 시료 모두 매우 높았다. 실트와 모래 모두 500~900 nm 영역에서는 $r > 0.90$ 의 높은 상관성을 보였다. 특히 710~900 nm까지는 두 시료 모두 0.98 이상으로 상관성이 매우 높게 나타났다. 따라서 탁수에서 토사농도에 따른 영향을 분석하는데 710 nm이

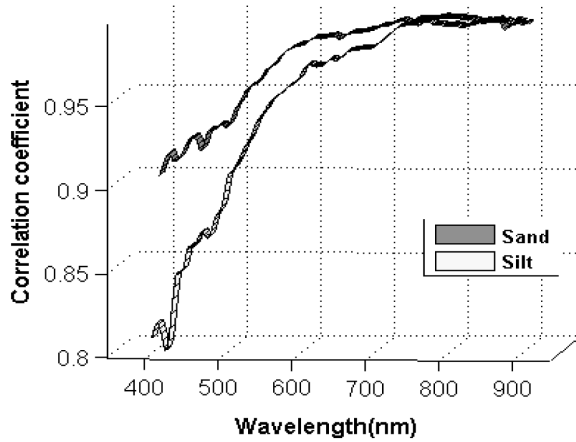


Fig. 5 Correlation between SSC and spectral reflectance

상의 파장영역이 매우 유용한 파장인 것으로 해석된다. 한편 두 시료를 비교한 결과 가시광선과 근적외선 파장영역에서 모래가 실트보다 높은 상관성을 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 시료는 달라도 농도변화에 따른 분광반사는 매우 유사한 변화를 하는 것으로 파악되었다.

4. 토사 농도변화에 따른 적분해석

먼저 탁수의 특징을 가장 잘 표현해주는 파장을 추출하기 위하여 400~900 nm 파장영역의 분광반사 값에 대한 적분을 실시하였다. 그 결과 Fig. 6과 같이 두 시료 모두 토사농도와 2차 함수식으로 매우 높은 상관성을 보였다. 그 근사식은 식 (4)와 같은 관계가 성립하였다.

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

여기서, x 는 토사농도이며, $f(x)$ 는 실트와 모래의 분광반사 적분치이다. a , b , c 는 각 조건에 따른 계수이다. 실트의 경우 (a : -0.002356, b : 0.5176, c : 2.923, SSE: 10.88, R^2 : 0.9933, RMSE: 0.7775)이며, 모래는 (a : -0.001323, b : 0.3446, c : 3.161, SSE: 9.688, R^2 : 0.9893, RMSE: 0.7336)이다.

또한 두 시료의 농도변화에 따른 적분치의 상호상관관계를 분석한 결과 Fig. 7과 같이 선형으로 매우 높은 비례 관계가 성립하였다.

한편 가시광선에서 색의 특징을 갖는 3개 파장영역과 근적외선 파장영역에서 특징을 갖는 2개 파장을 선정하여 Blue, Green, Red, NIR-1 및 NIR-2 로 구분한 5개 밴드에 대해 식 (2)를 이용하여 적분분석을 실시하였다. Fig. 8은 토사농도와 임의로 분류한 5개 밴드 (Blue, Green, Red, NIR-1, NIR-2)

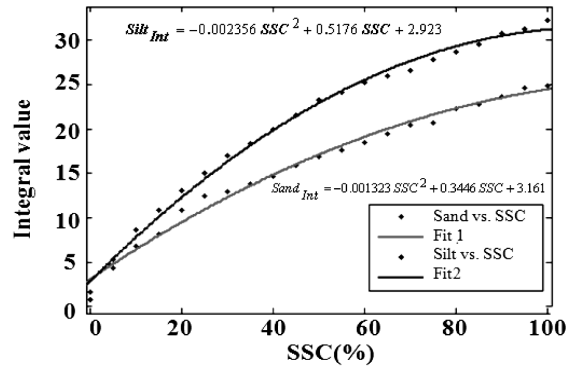


Fig. 6 Correlation and fit curves between SSC and Integral value

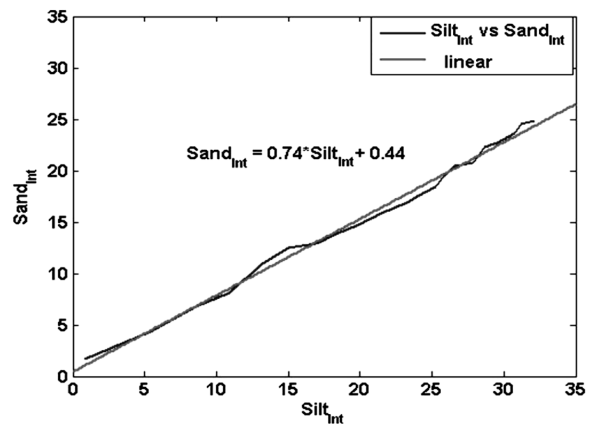


Fig. 7 Relationship between SiltInt and SandInt

의 분광반사 적분치 관계를 나타낸 그림이다. 토사농도가 0 % 일 때는 Blue 영역의 적분치가 가장 크게 나타났는데 이 특징은 물의 전형적인 성질로, 순수한 물의 흡수율이 460 nm 영역에서 가장 작기 때문에 분광반사 적분치는 가장 큰 것으로 해석된다. 두 시료의 5개 파장영역 적분치는 토사농도의 증가와 함께 계속적으로 증가하는 특징을 보인다. 또한 토사농도가 100 %일 때 Red 영역의 적분치가 가장 높는데 이는 분광반사율이 580~600 nm 부근에서 가장 높은 결과를 반영한 결과로 생물체를 포함하지 않는 토양의 색정보가 반영된 결과로 해석된다.

토사농도 변화에 따른 파장 영역별 적분치의 상관관계를 구한 결과 r 값은 NIR-1,2 (실트, 모래: 0.99) > Red (실트: 0.97, 모래: 0.98) > Green (실트: 0.94, 모래: 0.96) > Blue (실트: 0.86, 모래: 0.92) 순으로 나타난다. 이러한 연구결과는 Lodhi et al. (1997)와 Simis et al. (2005)이 도출해 응용한 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 탁수환경의 분광반사정보 추출을 위해서는 NIR-1,2 파장과 Red 파장을 활용하는 것이 매우 유용할 것으로 판단되었다.

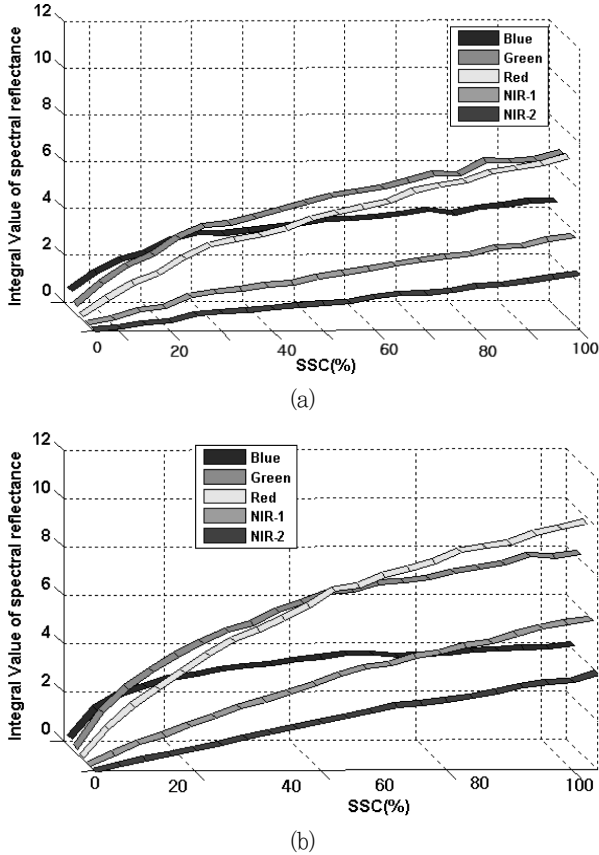


Fig. 8 Integral of spectral reflectance with varying SSC ; (a) Silt, (b) Sand

IV. 결론

본 논문에서는 원격탐사기법을 이용하여 농업용 저수지와 하천에 영향을 미치는 실트와 모래의 토사농도와 분광반사특성의 상호관계를 파악하고자 하였다. 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 실트와 모래 모두 토사농도가 높아질수록 모든 파장에서 반사율이 높아지는 특징을 보였다. 반사정도는 가시광선과 근적외선 파장영역에서 실트의 반사율이 모래보다 약 40~45%정도 높았다. 이 원인은 토사의 광물조성과 색 그리고 입자 크기 (표면적) 등의 영향이 반영된 결과로 해석된다.
2. 탁수환경에서 실트와 모래의 중량이 같을 경우 실트가 모래보다 높은 파장에서 분광반사 반응을 보이는 것으로 파악되었다. 또한 실트와 모래의 최대반사파장의 상호 상관관계는 2차식으로 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다.
3. 상관분석결과 상관계수는 실트 0.81~1.0, 모래 0.90~1.0로 두 시료 모두 매우 높았으며, 실트와 모래 모두 500~900 nm 영역에서 $r > 0.90$ 의 높은 상관성을 보였다. 특히 710

~900 nm까지는 두 시료 모두 0.98 이상으로 상관성이 매우 높았다.

4. 두 시료 비교 결과 가시광선과 근적외선 파장영역에서 모래가 실트보다 높은 상관성을 갖는 것으로 확인되었다. 시료는 달라도 농도변화에 따른 분광반사는 매우 유사한 변화를 하는 것으로 파악되었다.

5. 토사농도 변화에 따른 파장 영역별 적분치의 상관관계를 구한 결과 r 값은 NIR-1,2 (실트, 모래: 0.99) > Red (실트: 0.97, 모래: 0.98) > Green (실트: 0.94, 모래: 0.96) > Blue (실트: 0.86, 모래: 0.92)순으로 나타났다. 따라서 탁수환경의 분광반사정보 추출은 NIR 과 Red 파장을 활용하는 것이 매우 유용할 것으로 판단되었다.

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

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. *Can. J. of Remote Sensing* 11: 85-92.

Bhargava, D. S., and D. W. Mariam, 1990. Spectral reflectance relationships to turbidity generated by different clay materials. *Photo. Eng. and Remote Sensing* 56: 225-229.

Cho, H. Y., B. O. Kim, and B. J. Cho, 2002. Observation of SS Concentration on Coastal Waters off the Gaduk Island. *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 224-231 (in Korean).

Clark, H. E., 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.

Goodin, D. G., L. Han, R. N. Fraser, D. C. Rundquist, W. A. Stebbins, and J. F. Schalles, 1993. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. *Photo. Eng. and Remote Sensing* 59: 505-510.

Han, L., 1997. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters, *Photo. Eng. and Remote Sensing* 63(6): 701-705.

- Kameyama, S., F. Nakamura, and M. Kaneko, 2001. Development of WTI and turbidity estimation model using SMA-Application to Kushiro Mire, Eastern Hokkaido, Japan, *Remote Sensing of Environment* 77 (1): 1-9.
- Lee, J. S., B. J. Myeng, and Y. K. Cha, 2006. Measurements of Vertical Profiles in Suspended-Load Concentration Using the ASM-IV, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 6(1): 83-95 (in Korean).
- 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. *J. of the American Water Resources Association* 33(1): 111-117.
- Parsegian, V. A., 2005. Van Der Waals Forces, Cambridge Univ. Pr.
- Quibell, G., 1991. The effect of suspended sediment on reflectance from freshwater algae. *Int. J. of Remote Sensing* 12: 177-182.
- Simis, S. G. H., S. W. M. Peters, and H. J. Gons, 2005. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water, *Limnology and Oceanography* 50(1): 237-245.