

원격탐사기법에 의한 소양호의 표층수온과 엽록소 분포

정 종 철

남서울대학교 지리정보공학과

Distribution of Surface Temperature and Chlorophyll-a in Lake Soyang using Remote Sensing Techniques

Jeong, Jong-Chul

Dep. of Geoinformatics Engineering, Namseoul University

Abstract

The Landsat Thematic Mapper (TM) has suggested that spatial and spectral characteristics would be suited to evaluate water quality of lake. But, TM has not been commonly used for the analysis of in-land water quality, such as surface water temperature, chlorophyll-a, suspended sediments, and Secchi depth in domestic research.

This paper summarizes the analysis of Landsat 5 - TM image collected on 22 Feb 1996 for evaluation of chlorophyll-a and surface temperature in the Lake Soyang. And, field measurements collected in the Lake Soyang were used to obtain water optical algorithms for calibration of satellite data.

It is concluded that we can assess chlorophyll-a with remote sensing reflectance and surface temperature with thermal band in lake Soyang. However, surface temperature calculated with thermal band of Landsat TM are underestimated.

Relationship between remote sensing reflectance and chlorophyll-a using the ratio of TM band 1 and band 3 is as follows; $Y = 17.206 - 6.4711 * (Rrs(band1) / Rrs(band3))$ $R^2=0.8762$ and, using the ratio of TM band 1 and band 2 as follows; $Y = 57.77 - 35.771 * (Rrs(band1) / Rrs(band2))$ $R^2=0.8317$.

Keyword: Landsat TM, Chlorophyll-a, Surface Temperature, Remote Sensing

I. 서론

위성자료를 이용한 표층수온 분포, 엽록소 분

포에 관한 연구는 Landsat TM을 이용하여 내륙의 호수나 연안해역에 대하여 이루어져 왔다 (Mayo, 1995)¹⁾.

내륙의 거대호수나 연안 담수호의 수질관리를 위한 분석방법의 하나로 원격탐사기법의 적용은 수질의 공간적인 분포를 관측하기에 용이하고, 현장실측치에 의한 점 측정(point sample)자료를 공간적인 범위에서 해석하는 것이 용이하다. 때문에, Dekker(1995)⁴⁾가 제시한 바와 같이 국외에서는 많은 지역의 실측치와 위성자료의 분석으로 호수의 수질관리와 모니터링에 원격탐사기법이 적극 활용되고 있으나, 국내의 경우 원격탐사기법을 이용한 수질평가 연구는 미약한 실정이다.

원격탐사기법을 이용한 수질평가는 위성에서 얻어진 자료를 기하보정과 대기보정을 통하여 전처리하고, 각 밴드의 분광특성을 고려하여 엽록소, 표층수온, 부유사의 정량적인 해석을 위한 밴드비율 방법을 적용한다. 이렇게 얻어진 위성자료를 실측치와 비교하여 선형 회귀식을 만들고, 여기서 얻어진 결과를 통해 조사대상지역의 수질을 공간적으로 평가한다.

특히, 본 연구는 엽록소와 표층수온을 평가할 수 있는 원격탐사기법을 제시하고 이를 통해 소양호의 수질을 평가하는데 연구의 목적이 있다.

II. 연구방법 및 범위

본 연구에서는 Landsat TM을 이용하여 소양호의 수질을 공간적으로 해석하고자 하였다. 소양호는 평균 50m의 수심과 많은 가지형 구조로 형성되어 있어서 조사지점에 따른 수질변화가 클 것으로 판단된다(황, 1996)²⁾.

육상의 토지이용변화, 지형관측, 식생관측에 용이한 Landsat TM(Path/Low : 116/034)은 1996년 2월 자료를 이용하였다.

현장실측은 표층수온, 투명도(Secchi depth), 엽록소, 부유물질의 항목으로 수심별 자료를 획득하였다. 또한, 현장조사지점의 실측치와 분석된 위성자료를 비교하기 위해 획득된 위성자료를 기하보정하였으며, 취득된 위성자료의 전처리 단계

로서 대기의 영향을 최소화하기 위해 밴드 3과 밴드 4에 의한 대기보정 방법을 적용하여 대기효과를 제거하였다. 위성영상 분석은 현장조사와 같은 지점의 영상신호(Digital Number와 Normalized Radiance)를 획득하여 각 수질 항목을 정량적으로 해석할 수 있는 방법을 적용하였으며, 위성자료 분석을 통해 얻어진 결과와 현장실측치를 비교하였다.

본 연구에서는 위성자료에서 획득 가능한 수질평가 항목으로 판단되는 표층수온, 엽록소, 부유사를 정량적으로 해석하고자 하였고, 각각의 항목을 분석하기 위한 분석기법은 Lathrop and Lillesand(1992)⁸⁾, Tassan(1993)¹⁶⁾, Mayo(1995)¹¹⁾의 방법을 적용하였다.

수체에서 올라오는 신호는 육상의 산림, 토지 등에서 올라오는 신호에 비해 상대적으로 매우 미약하여 수중의 구성성분을 정량적으로 해석하기 어렵다. 이는 대기 중의 수증기와 미세입자에 의한 대기효과가 위성자료에 포함되기 때문이다.

일반적으로 수중에서 올라오는 신호[L_w(λ)]는 다음 (식 1)과 같이 나타낼 수 있으며, TM의 경우 밴드 3과 밴드 4를 이용하여 대기보정하였다. 밴드 4(844 nm)의 경우 근적외선 영역으로 태양광의 대부분이 수심 10cm 내에서 흡광되어 맑은 수역의 경우 수신되는 영상 신호값은 0을 나타낸다. 하지만, 대기중의 수증기에 의한 반사나 미세입자에 의한 산란으로 수신되는 영상신호는 수체에서 올라오는 신호 이외의 값을 지닌다.

$$L_w(\lambda) = 1 / T(\lambda) \{ L(\lambda) - L_R(\lambda) - \epsilon(\lambda, \lambda_0) [L(\lambda_0) - L_R(\lambda_0) - L_w(\lambda_0)T(\lambda_0)] \} \quad (\text{식 1})$$

where,

T = Diffuse transmittance of the atmosphere

L_R = Rayleigh path-radiance

L_w = Normalized water leaving radiance

λ = Central wavelength of the sensor band

대기중의 에어로졸을 위성자료에서 보정하기 위해 다음 (식 2)와 같은 대기보정 상수를 이용

Table 1. Ratio of aerosol optical thickness at 485 and 589nm to 844nm, i.e. $\epsilon(485,844)$ and $\epsilon(589,844)$.

Investigation approach	$\epsilon(485,844)$	$\epsilon(589,844)$
Use of TM band 3 and 4 to derive Angstrom exponent	0.8254	0.9104

하여 분석하고자 하는 영상에서의 대기오차를 제거하였다.

$$\epsilon(\lambda, 844) = \frac{L_T(\lambda) - L_R(\lambda) - L_W(\lambda) E_O(844) T_{OZ}(\lambda)}{L_T(844) - L_R(844) - L_W(844) E_O(\lambda) T_{OZ}(\lambda)} \quad (\text{식 2})$$

where,

$T_{OZ}(\lambda)$ = ozone transmittance at wavelength λ

$E_O(\lambda)$ = mean extraterrestrial solar flux at λ

(식 2)를 통해서 얻은 대기보정 상수는 Table 1과 같다.

위성자료에서 몇 개의 픽셀을 위와 같이 적용하여 조사대상지역의 대기잡음을 제거하고, 기하보정된 영상에서 현장실측지점의 영상자료 값을 추출하였다. 추출된 영상자료의 값들은 표층수온, 엽록소 검출 알고리즘을 통해 정량화하고, 각각의 값들을 실측치와 비교하였다. 또한, 각 방법에 의한 계산식과 실측치의 RMSE(Root Mean Square Error)를 구하였다.

III. 표층수온, 엽록소 검출방법

위성영상에 의한 표층수온 분포 분석은 열적외선 측정에 의한 방법으로 이루어진다. 태양의 복사에너지는 주로 단파장에 분포하지만 지구에서 방출되는 열복사는 $10\mu\text{m}$ 부근에서 최대값을 가진다. 따라서, 10 - $12\mu\text{m}$ 파장대를 관측하면 수면에서 방출되는 복사에너지를 측정할 수 있고, 이를 통해 수면의 온도를 추정할 수 있다.

Landsat TM은 열적외선 밴드를 가지고 있으며, 120m의 공간해상력을 지닌다. Landsat TM에 의한 표층수온 분석은 Markham and Baker (1986)¹⁰⁾가 제시하고 있는 방법이 주로 사용되는데, Landsat TM의 열적외선 밴드를 이용하여 수

온을 검출하기 위해 현장에서 실측된 온도와 위성에서 수신된 영상자료의 분석에 의한 밝기온도 사이의 관계를 통해 다음 (식 3)을 제시하였다. 이 계산식을 통해 절대온도 (K)를 얻을 수 있으며, 계산식에는 태양고도에 의해 보정된 Normalized Radiance 값과 열 적외선 보정계수 K_1 , K_2 가 사용된다.

$$T = \frac{K_2}{\ln[(K_1/L_\lambda) + 1]} \quad (\text{식 3})$$

T = Effective at-satellite temperatures in Kelvin

K_2 = Calibration constant 2 in K from Table 2

K_1 = Calibration constant 1 in $\text{mWcm}^{-2}\text{ster}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$

L_λ = Spectral radiance in $\text{mW cm}^{-2}\text{ster}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$

여기서, 본 연구에 적용된 Landsat 5 TM의 열적외선 밴드 보정계수는 Table 2와 같이 적용하여 취득된 위성영상 자료로부터 절대온도를 얻을 수 있으며, Markham and Baker (1986)¹⁰⁾는 TM의 Solar Exoatmospheric Spectral Irradiances 값에 의해 Spectral radiance를 구하였다.

호수의 엽록소를 위성자료를 이용하여 정량적으로 해석하기 위해서는 위성자료에서 얻어지는 각 밴드별 영상신호와 호수 내에 존재하는 엽록소, 부유물질, 용존유기물 등의 밴드별 흡광과 산란특성을 이해하여야 한다.

수중 구성물질의 존재형태와 존재 비율 등에 의한 수중광의 흡광과 산란의 정도를 구분한 연구로는 Morel(1977)¹²⁾과 Bukata(1995)³⁾, Hamilton et al.,(1993)⁶⁾의 연구가 있는데, 이들의 연구를 바탕으로 분광특성에 의한 엽록소와 부유사의 정량화 연구가 지속되었다. 특히, Morel(1977)¹²⁾은 블루워터(Blue Water)와 다양한 그린워터(Green

Table 2. Landsat TM Thermal Band Calibration constant

Satellite	constant 1 K_1 (K)	constant 2 K_2 $\text{mW}/(\text{cm}^2\text{ster}\mu\text{m})$
Landsat - 4	67.162	1284.3
Landsat - 5	60.776	1260.56

Water)로 수체를 구분하여 순수한 수체의 경우 엽록소와 부유물질의 농도가 낮아 물에 의한 흡광이 가장 크게 영향을 미쳐서 450~520 nm 영역의 블루가 높은 반사를 나타내어 물의 색이 블루를 나타낸 경우와 수체 내에 엽록소와 부유물질이 높은 농도로 존재하여 엽록소의 흡광 영역인 443 nm와 680 nm 이외의 분광영역에서 상대적으로 높은 반사치를 나타내어 물의 색이 그린을 나타내는 경우로 구분하였다.

또한, Bukata(1995)³⁾, Ekstrand(1992)⁵⁾은 순수한 물, 총 부유물질, 엽록소, 용존유기물의 흡광 특성과 산란특성을 비교하여 각 구성물질의 정량적인 구성비율에 따른 분광스펙트럼을 작성하고, 각 파장대별 반사치를 계산하였다.

Tassan(1993)은 연안해역에서 엽록소와 부유사 농도를 정량적으로 해석하기 위해 CZCS(Costal Zone Color Scanner)와 Landsat TM을 적용하여 다음 (식 4)와 같은 알고리즘을 제시하였다.¹⁶⁾

$$\begin{aligned} \text{CZCS } \log(C) &= 0.48 - 1.79 \log(R(443)/R(550)) \log(C) \\ \log(C) &= 0.74 - 8.84 \log(R(520)/R(550)) \log(S) \\ &= 2.5 + 1.82 \log(R(550)) \\ \text{TM } \log(C) &= 0.74 - 2.43 \log(R(485)/R(570)) \\ \log(S) &= 2.55 + 1.79 \log(R(570)) \quad (\text{식 4}) \end{aligned}$$

where,
chlorophyll-a (C, mg/m³)
Suspended Sediment (S, g/m³)

소양호에서 실측된 엽록소, 부유물질의 농도는 엽록소의 경우 1.0 - 5.4 mg/m³, 부유물질의 경우 1.2 - 4.6 mg/l의 범위를 나타내고 있어서 빈영양화 상태이다. 따라서, Table 3에 제시된 바와 같은 엽록소와 부유물질 농도범위에 적용된 알고리즘과는 다른 분광영역을 이용하여 소양호의 엽록소와 부유물질 농도를 정량적으로 해석하였다.

IV. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Landsat TM을 이용하여 소양호의 표층수온과 엽록소 분포를 분석하기 위해 TM의 열적외선 밴드를 이용하여 표층수온을 분석하였고, 반사치 밴드비율을 이용하여 엽록소 농도를 추출하였다.

Fig. 1은 소양호에서 추출된 위성자료의 각 밴드별 최소값, 최대값, 평균을 밴드별로 나타낸 것

Table 3. Landsat TM band algorithms for detecting of water quality parameter

Water body	data type	Para-meter	Range	band	Authors
Green Bay Lake Michigan	Rrs	DW	1-33	3/1	Lathrop (1992)
		SD	15-900	3/1	
15 Lakes	DN	Chl	4-258	2	Dekker and Peter (1993)
		DW	1-44	2	
		SD	20-310	3	
16 Lakes	DN	Chl	44-270	1+2-3	Roeters and Buiteveld (1993)
		DW	14-57	1-2-4	
		SD	15-60	2-4	
Lake Soyang	DN Rrs	Chl	1-5.4	1/2	This study
		DW	120-460	2	
		SD	190-550	1/2	

1. Data type : DN, digital number; Rrs, reflectance; Lrs, upwelling radiance at the sensor
2. Water quality parameters : DW, suspended sediment measured as dry weight (mg/l); Chl, chlorophyll-a concentration (mg/m³); SD, Secchi disk transparency (cm)

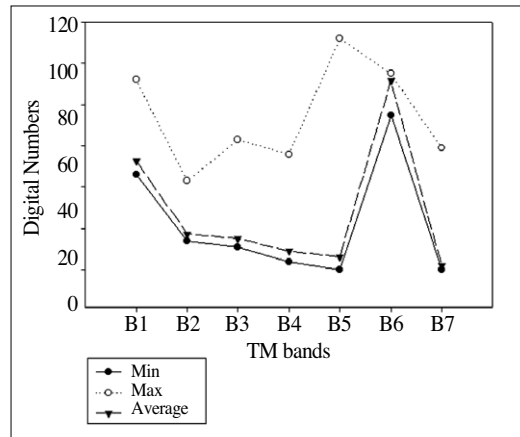


Fig. 1. Averaged digital value of each band in lake Soyang

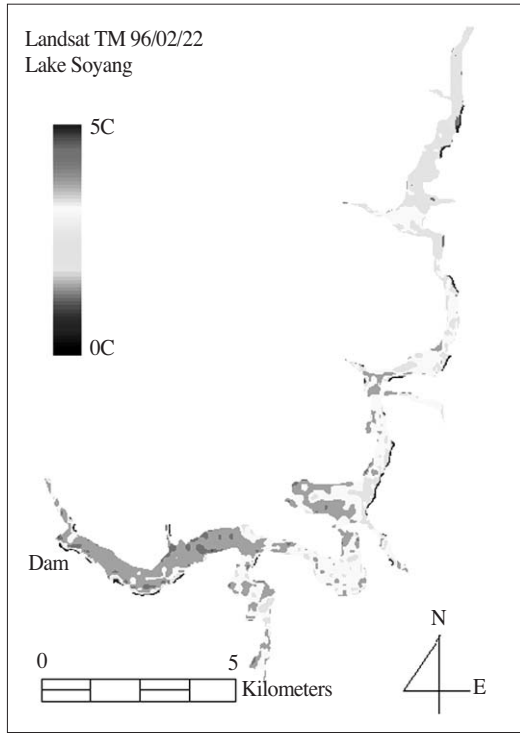


Fig. 2. Distribution of the surface temperature in the Lake Soyang.

이며, 각 밴드에서 얻어진 값들의 평균은 최소값의 경향을 나타내고 있다. 수중에서 얻어진 신호의 정량적인 변화 경향은 특정한 몇 개의 신호의 분포에 적은 영향을 나타낸다.

소양호의 표층수온 분포는 Fig. 2와 같다. 조사 시점의 소양호 표층수온은 0~5°C 범위를 나타내었다. 본 연구에서 적용한 표층수온 검출방법을 통해 얻어진 소양호의 표층수온 분포는 상류의 양구에 비해 소양댐 앞이 2~3°C 높게 나타나고 있다. Fig. 3은 위성이 지나가는 시점에 실측된 표층수온과 동일지점의 TM에 의한 표층수온을 비교한 것이다. 실측치에 비해 계산치는 낮은 값을 나타내고 있는데, 이는 실측기기 오차와 관측시간과 위성통과 시간의 차이에 의해 나타난 결과이다. 위성자료를 획득한 오전 10시 30분 이후로 태양고도가 높아진 시점에서 얻어진 실측치는 실

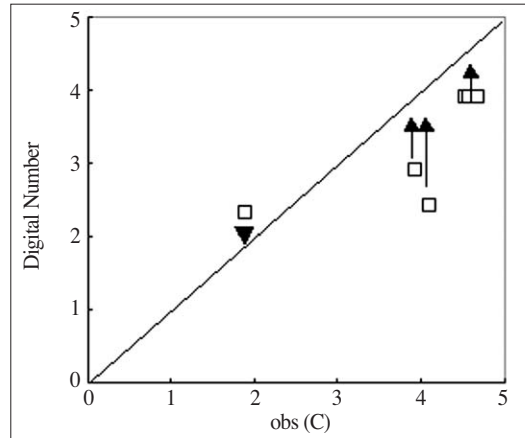


Fig. 3. Relationship between calculated and observed of surface temperature

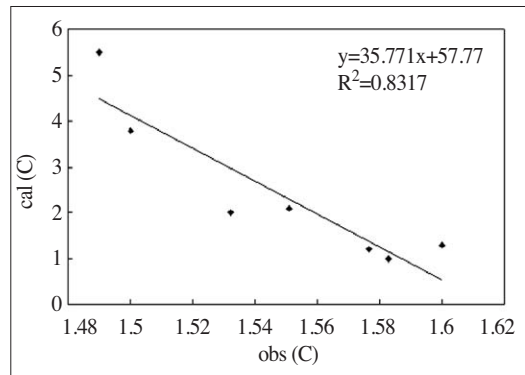


Fig. 4. Relationship between Rrs(b1/b2) and observed chlorophyll-a

측치가 계산치 보다 높게 나타났다.

TM자료에 의한 엽록소 농도 추출은 밴드 1과 밴드 3의 밴드비율에 의한 선형회귀식을 통해 구하였다. Fig. 4는 TM 반사치의 밴드 1과 밴드 2의 밴드비율과 실측 엽록소 농도를 비교한 것이며, Fig. 5는 밴드 1과 밴드 3의 밴드비율에 의한 관계식을 통해 얻은 결과이다. 소양호는 엽록소 농도가 중·하류부에서 높은 농도를 나타내고 있는데 Fig. 6과 같다. 0.5에서 7.5 $\mu\text{g}/\text{l}$ 의 소양호 엽록소 농도분포는 30 \times 30(m²)의 픽셀 단위로 계산되었다.

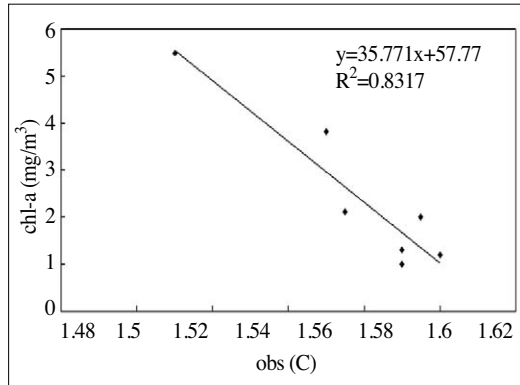


Fig. 5. Relationship between Rrs(b1/b3) and observed chlorophyll-a

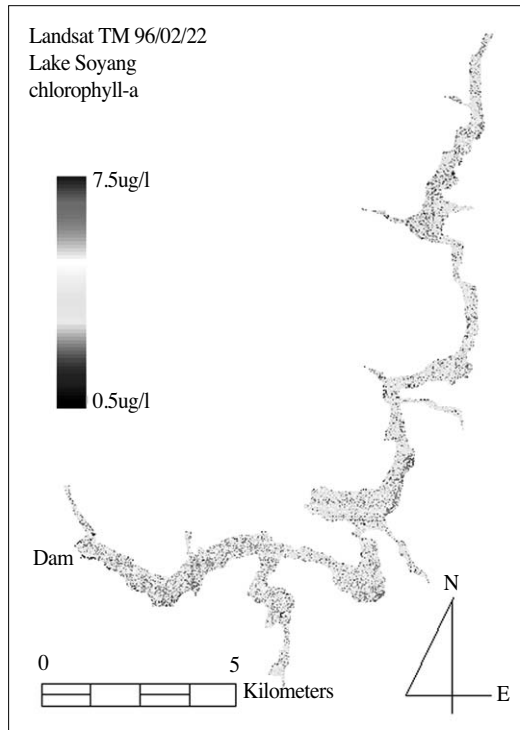


Fig. 6. Distribution of chlorophyll-a in Lake Soyang

V. 결론

위성자료에 의한 호수의 표층수온과 엽록소를 정량적으로 평가하기 위해서는 위성자료의 전처리 과정에서 대기보정과 기하보정이 분석결과와의

정확한 해석을 위해 중요하다. 특히 반사치를 엽록소 농도로 계산할 수 있는 경험식의 구축은 다른 시점의 위성자료에 의한 표층수온과 엽록소의 정량적인 해석을 위해 반드시 요구된다.

그러나, 동일한 시점의 현장관측치와 위성자료를 확보하기 어렵고, 현장관측시간의 오차로 인해 분석치와계산치의 오차는 표층수온의 경우 2°C의 큰 오차를 나타내고 있다. 엽록소의 정량적인 해석에 있어서도 인접 픽셀 간의 오차가 커서 수체의 명확한 구분이 어렵다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 연구방향을 제시할 수 있다.

첫째, 위성자료에 의한 소양호, 팔당호, 대청호의 광범위한 수표면 온도와 표층 엽록소 농도를 정량적인 분포 범위로 해석할 수 있다.

둘째, 위성 통과시간을 고려한 현장관측치의 수집으로 위성자료와 현장실측치의 비교 분석을 용이하게 한다.

셋째, 호수의 유입하천과 하천유역의 비점오염원과 점오염원 유입부하량을 산정하고, 이를 위성자료에서 분석된 엽록소 분포와 비교하여 호수수질의 관리방안을 제시한다.

본 연구는 96년 2월의 한 시점에 의한 관측자료와 위성자료에 의한 분석으로 분석결과에 대한 정확한 검증은 할 수 없었다. 그러나, 본 연구는 소양호의 표층수온 분포와 엽록소 분포를 동시적 관측결과로 해석으로 공간적인 분포도를 제시함으로써 조사선에 의한 시간적 오차를 줄이고, 원격탐사에 의한 호수의 수질 모니터링의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

1. 한국해양연구소, 1994, 보령화력 주변해역 인공 위성 원격탐사 자료현상 및 판독: 1-4.
2. 황길순, 1996, 소양호의 일차생산력과 부영양화에 관한 연구, 강원대학교 이학박사학위논문

- 문: 13-44.
3. Bukata, R. P., J. H. Jerome, K. Y. Kondratyev, 1995, Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters, CRC press, 135-162.
 4. Dekker, A. G., and S. W. M. Peters, 1993, The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes : a case study in the Netherlands, *Int. J. Remote Sens.*, 14, (5): 799-821.
 5. Ekstrand, S., 1992, Landsat TM based quantification of chlorophyll-a during algae blooms in coastal waters, *Int. J. Remote Sens.*, 13, (10): 1913-1926.
 6. Hamilton, M. K., Davis, C. O., Rhea, W. J., and Pilorz, S. H., 1993, Estimating chlorophyll content and bathymetry of lake Tahoe using AVIRIS data, *Remote Sens. Environ.*, 44: 217-230.
 7. Huh, O. K., and T. Sim, 1987, Satellite observation of surface temperatures and flow patterns, Sea of Japan and East China sea, late march 1979, *Remote Sens. Environ.*, 22: 379-393.
 8. Lathrop, R. G., 1992, Landsat Thematic Mapper monitoring of turbid inland water quality, *PE&RS*, 58, (4): 465-470.
 9. Malm, J., and L. Jonsson, 1993, A study of the Thermal Bar in Lake Ladoga Using water surface temperature data from satellite images, *Remote Sens. Environ.*, 44: 35-46.
 10. Markham, B. L., and J. L. Baker, 1986, Landsat MSS and TM post calibration Dynamic ranges, Exo-atmospheric Reflectances and At-satellite Temperature, *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1: 1-8.
 11. Mayo, M., Gitelson, A., Yacobi, Y. Z., 1995, Chlorophyll distribution in lake Kinneret determined from Landsat TM data, *Int. J. Remote Sens.*, 16, (1): 175-182.
 12. Morel, A., and Prieur, L., 1977, Analysis of variation in ocean color, *Limnol. Oceanogr.*, 22, (4): 709-722.
 13. Ritchie, J. C., C. M. Cooper, and F. R. Schiebe, 1990, The Relationship of MSS and TM Digital Data with Suspended Sediments, Chlorophyll, and Temperature in Moon Lake, Mississippi, *Remote Sens. Environ.*, 33: 137-148.
 14. Schumugge, T. J., 1991, Spectral emissivity variances observed in airborne surface temperature measurements, *Remote Sens. Environ.*, 35: 95-104.
 15. Stewart, R., 1985, Methods of satellite oceanography, Univ. of california press: 134-135.
 16. Tassan, S., and Ribera d'Alcala, M., 1993, Water Quality Monitoring by TM in Coastal Environments-A performance Analysis of local biooptical Algorithms and Atmospheric Correction Procedures, *Remote Sens. Environ.*, 45: 177-191.