

LANDSAT TM 영상자료를 이용한 호수 수질 관측

Monitoring of Lake Water Quality Using LANDSAT TM Imagery Data

김 태 근*	김 광 은**	조 기 성***	김 환 기***
Kim, Tae Geun	Kim, Kwang Eun	Cho, Gi Sung	Kim, Hwan Gi

要 旨

광역수계에서 현재의 수질평가 방법은 시간과 장비 등의 제약으로 오염물질 분포, 이동 및 전반적인 수질현황을 파악하기가 어렵기 때문에 최근에는 대상수역의 수질을 동시적이고 공간적으로 측정을 할 수 있는 원격탐측 적용 연구가 증가추세에 있다. 따라서 본 연구에서는 위성 원격탐측기법으로 호수 수질을 관측하고자 1995년 6월 20일과 1996년 3월 18일에 Landsat 5호 위성의 대청호 상공 통과시간에 맞춰 대청호에서 부영양화 관련 수질인자를 측정하여 위성데이터와 수질 실측치간의 상관관계 분석 및 회귀모델을 유도하였고 모델의 정밀도를 검증하였다. 연구결과 TM데이터로부터 수질에 관한 많은 정보를 얻을 수 있었는데, 투명도, 탁도, 부유물질 및 클로로필은 높은 상관성을 보였으나 분광특성이 뚜렷하지 않은 총인, 총질소는 원격탐측 적용이 어려운 것으로 나타났다.

ABSTRACT

The conventional monitoring of water quality constrained by time and equipment produce neither complete nor synoptic geographic coverage of pollutant distribution, transport, and water quality. To circumvent these limitations in temporal and spatial measurements, the use of remote sensing is increasingly being involved in the lacustrine environmental research.

Consequently, satellite remote sensing, with its synoptic coverage, is used to obtain the eutrophication-related water quality parameters in Daecheong reservoir in this study. The approach involved acquisition of water quality samples from boats of 15 sites on 20 June 1995 and 30 sites on 18 March 1996, simultaneous with Landsat-5 satellite overpass.

Regression models have been developed between the water quality parameters and Landsat Thematic Mapper(TM) digital data. The best regression model was determined based on the correlation coefficient which was higher than 0.6.

As a result, satellite remote sensing can provide meaningful information on water quality parameters. The regression models developed in this study show good relationship for transparency, turbidity, SS, and chlorophyll, but not for TN and TP because their spectral characteristics are not well defined.

1. 서 론

과거 수십년간 공업화, 도시화가 지속되어 내륙 수

계 뿐 아니라 해양의 수질도 날로 오염되어가고 있고, 점차 광역화되는 수질오염 문제는 새로운 수질관리 방안을 필요로 하게 되었다. 호수 및 해양과 같은 광

*국립환경연구원 금강수질검사소
***전북대학교 토목환경공학부

**한국자원연구소

역수역의 오염물질 농도나 분포는 조류(潮流), 바람, 하천으로부터의 오염물질 유입 및 강우 등에 의해 쉽게 변할 수 있는데, 이런 순간적이고 공간적인 변화 때문에 기존의 시료채취 방법으로는 오염물질의 분포 상태와 이동을 계속적으로 관찰하기가 어렵다. 이러한 측면에서 수질인자의 동시적이고 공간적인 분포상태를 신속하고 주기적으로 파악할 수 있는 위성 원격탐측기법은 외국에서 새로운 수질관리 방안으로 그 가능성이 인정되어 현재에도 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

지표상의 모든 물질은 각자의 구성원자나 분자구조에 따라 태양에너지를 흡수 또는 반사하거나 특정량의 내부에너지를 방사(放射)하는 특성이 있는데, 위성 원격탐측은 이런 에너지를 위성에 탑재된 센서에서 감지하여 지상 수역의 수질에 대한 정보를 얻고 있다.1) 위성 데이터로부터 작성된 디지털 영상은 지상 지역과 공간적으로 일치하는 픽셀들로 정렬되어 있으며, 픽셀에 나타난 수치는 지상자료를 전자기 스펙트럼에서의 분광특성으로 나타낸다. 따라서 오염물질이 불규칙한 분포를 나타낸다 하더라도 분광특성이 뚜렷한 수질인자에 대해서는 센서에서 감지할 수 있고, 이들의 분포도를 작성할 수 있어 재래식 시료채취 방법에 의한 수질 평가보다 종합적인 분석을 할 수 있다.

한편 본 연구의 대상지역으로 선정한 대청호는 우리나라 중부지역에 생활용수와 공업용수를 공급하는 중요한 수자원으로서 유역면적이 넓고 수리학적 체류시간이 길어 부영양화 발생 가능성이 매우 높아 수질을 보전하기 위한 종합적인 수질관리 방안의 일환으로 원격탐측기법을 적용하였다.

류지점에 위치하고 있고 소양호와 충주호에 이어 저수용량에 있어 우리나라에서 세번째로 큰 인공호수이며, 대청호의 제원은 Table 2.1과 같다.

대청호의 주요 기능으로는 홍수조절, 전력생산, 금강 중·하류지역에 하천 유지용수와 관개용수 공급, 대전광역시와 충청남·북도 일부지역에 생활용수와 공업용수 공급 등 수자원으로서 매우 중요한 역할을 하고 있다.

Table 2.1. Specification of Daechong reservoir.

구 분	현 황
유역면적	4,134km ²
호수 면적	72.8km ²
호수 길이	86km
총 저수용량	1,490 x 10 ⁶ m ³
유효 저수용량	790 x 10 ⁶ m ³
연평균 유입량	2,677.4 x 10 ⁶ m ³
계획홍수위	EL. 80m
상시만수위	EL. 76.5m
저수위	EL. 60m

2.2 수질자료

대청호 전역의 수질현황을 파악하기 위해 Landsat 5호 위성이 대청호 상공을 통과하는 1995년 6월 20일과 1996년 3월 18일에 선박을 이용하여 시료를 채취하였으며, 시료 채취는 Landsat 5호 위성의 통과시간인 오전 10시 15분을 전후로 하여 09:00~13:00시 사이에 실시하였다.

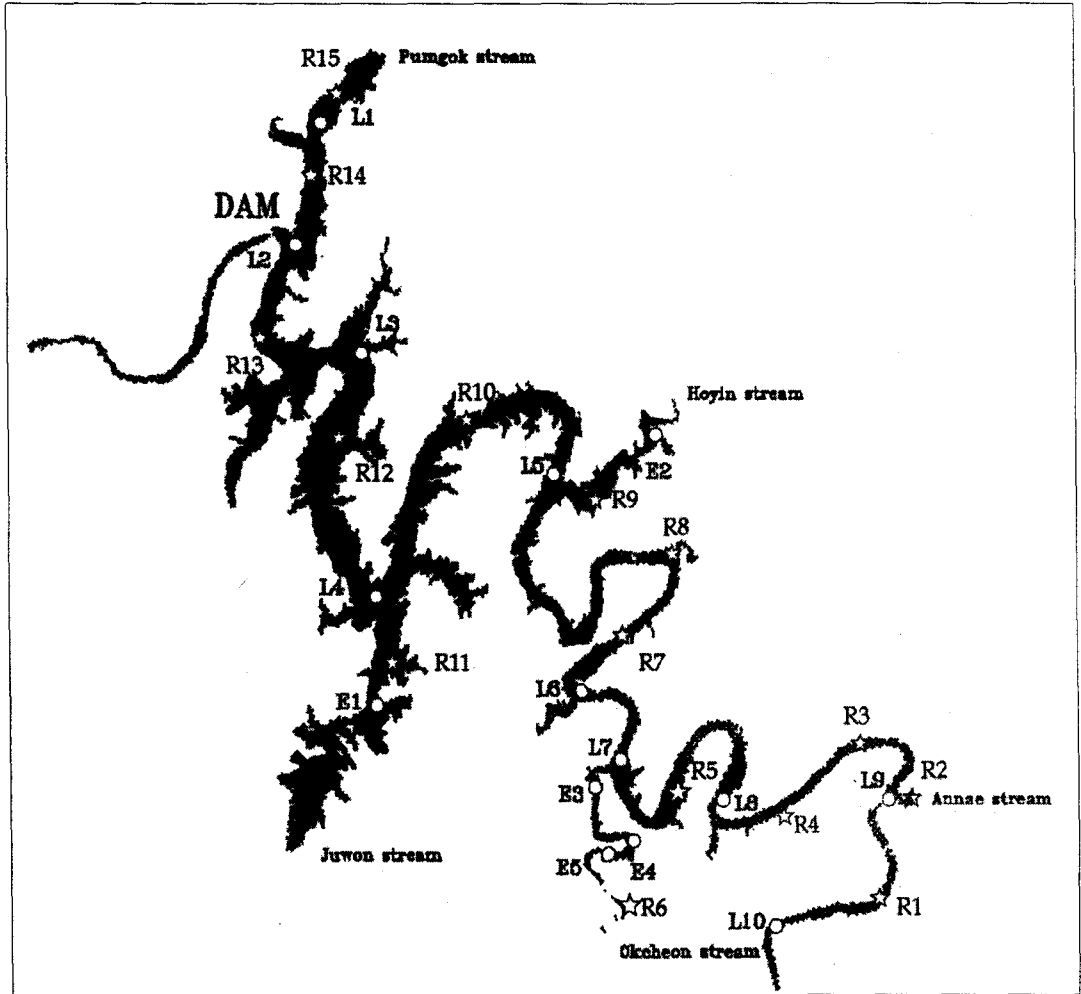
대청호에서의 수질 조사 지점은 1995년

2. 연구 방법

2.1 연구지역

대청호는 금강 수계의 수자원을 이용할 목적으로 1980년에 축조된 호수로서 금강 하구로부터 150km 상

Fig. 2.1 Location map of water quality sampling sites in Daecheong reservoir. Sampling sites on 20 June 1995(O) and additional sites on 18 March 1996(☆) are shown.



6월에 15개 지점(O), 1996년 3월에는 1995년 6월의 채취지점에 15개 지점(☆)을 추가한 30개 지점으로 그 위치를 Fig. 2.1에 나타내었다. 시료 채취지점 선정은 호수 본류 구간 중 유하거리에 따라 수질 변화가 예상되는 지점과 지천이 유입되는 만입부 및 본류와 만입부가 합류되는 지점을 대상으로 하였다. 조사항목으로는 부영양화 관련 수질인자 중 수온, 탁도, 투명도,

부유물질, 클로로필 a, 페오파이틴 a, 총인, 총질소 등 8개 항목을 대상으로 Standard Method2)와 수질오염 공정시험방법3)에 의해 측정하였다. 또한 위성영상을 분석할 때 위성영상 좌표와 실측지점을 정확히 일치시키기 위하여 시료 채취시 GPS(Global Positioning System, GARMIN SRVY 100, USA)를 이용하여 채수지점의 좌표를 구하였다.

2.3 위성데이터

(3.1)

본 연구에 사용된 위성데이터는 1995년 6월 20일과 1996년 3월 18일에 일본 RESTEC에서 제공한 Landsat TM(Thematic Mapper)데이터를 이용하였다. 이 자료는 Landsat 5호의 path 115, row 35에 해당하는 지역 중 대청호를 포함한 영상(중심 경위도: N 36° 26' 50", , E 127° 32' 50")으로서, BIL(Band Interleaved by Line)방식으로 데이터가 포맷된 플로피 디스크를 영상처리 소프트웨어인ENVI(Environment for Visualizing Images, USA)로 처리하였다.

L_{λ} : Spectral Radiance ($mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

$LMIN_{\lambda}$: Spectral Radiance at QCAL=0

$LMAX_{\lambda}$: Spectral Radiance at QCAL=max

$QCALMAX_{\lambda}$: Range of Rescaled Radiance in Digital Numbers

QCAL : Digital Numbers

3. 분석 및 고찰

Table 3.1 Spectral radiances of $LMIN_{\lambda}$ and $LMAX_{\lambda}$ for TM bands.

3.1 방사도(radiance) 및 반사도(reflectance) 산정

Band	$LMIN_{\lambda}$	$LMAX_{\lambda}$
TM 1	-0.15	15.21
TM 2	-0.28	29.68
TM 3	-0.12	20.43
TM 4	-0.15	20.62
TM 5	-0.037	2.719
TM 6	0.1238	1.5000
TM 7	-0.015	1.438

위성에서 촬영한 날씨가 다르거나 서로 다른 센서로부터 생산된 위성데이터를 하나로 통합하여 사용하기 위해서는 각 밴드의 DN(Digital Number)값이 실제 지표면에 의한 반사도를 정량적으로 나타낼 수 없기 때문에 DN값을 반사도로 변환시켜야 한다. 이러한 변환은 각 밴드의 DN값을 같은 물리적인 차원으로 변환시켜 그 값을 직접 비교할 수 있으므로 데이터의 표준화를 위해 사용되고 있다.4) 지표면의 반사도는 촬영시기에 따라 태양 고도각 및 지표면의 광학적인 특성 등이 변하므로 태양 고도각을 보정해 주어야 지표면의 광학적인 특성을 정확하게 알아내어 측정 신뢰도를 높일 수 있다.

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \tag{3.2}$$

ρ_p : Unitless effective at-satellite planetary reflectance

L_{λ} : Spectral radiance at sensor aperture in $mW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

d : Earth-Sun distance in astronomical units

$ESUN_{\lambda}$: Mean solar exoatmospheric irradiance in $mW \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$

θ_s : Solar Zenith angle in degrees

$$L_{\lambda} = LMIN_{\lambda} + \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{QCALMAX_{\lambda}} \cdot QCAL$$

Table 3.3 Correlation matrix between band reflectances and water quality parameters on 20 June 1995, 18 March 1996.

	REF B1	REF B2	REF B3	REF B4	REF B5	REF B7	REF B2/1	Trans.	Turb.	SS	Chl.	TN	TP
REF B1	1.0	0.79	0.83	-0.05	0.75	0.67	0.39	-0.44	0.58	0.55	0.33	-0.40	0.26
REF B2		1.0	0.93	0.36	0.54	0.58	0.88	-0.71	0.86	0.85	0.27	-0.09	0.47
REF B3			1.0	0.33	0.63	0.73	0.74	-0.59	0.87	0.84	0.18	-0.11	0.50
REF B4				1.0	0.03	0.11	0.59	-0.48	0.33	0.42	0.90	-0.46	0.36
REF B5					1.0	0.73	0.24	-0.38	0.32	0.22	-0.08	-0.47	-0.03
REF B7						1.0	0.35	-0.38	0.52	0.41	-0.07	-0.29	0.40
REF B2/1							1.0	-0.73	0.75	0.80	0.66	0.16	0.48
Trans.								1.0	-0.59	-0.60	-0.52	-0.03	-0.37
Turb.									1.0	0.97	0.30	0.08	0.68
SS										1.0	0.86	0.18	0.63
Chl.											1.0	0.52	0.37
TN												1.0	0.34
TP													1.0

(REF B=Reflectance of Band, Trans.=Secchi depth, Turb.=Turbidity, Chl.=Chlorophyll a + Phaeophytin a)

3.2 수질 및 TM데이터 분석 결과

원격탐측을 이용하여 지상수역의 수질상

Table 3.2. TM solar exoatmospheric spectral irradiances.

Satellite Band	Landsat 4	Landsat 5
TM 1	195.8	195.7
TM 2	182.8	182.9
TM 3	155.9	155.7
TM 4	104.5	104.7
TM 5	21.91	21.93
TM 7	7.457	7.452

태를 파악하기 위해서는 위성데이터와 수질 실측치간의 상관성이 높아야 자료로서 가치가 있다. 따라서 수질인자와 TM데이터의 상관관계를 파악하기 위하여 이들간의 상관관계 매트릭스를 작성하였다. 상관관계 분석은 1995년 6월 20일과 1996년 3월 18일에 측정된 수질자료와 TM데이터의 DN값으로부터 변환된 반사도(reflectance)를 이용하였으며, 또한 여러 개의 밴드를 조합하여 수질인자와 상관관계를 분석한 결과 투명도, 탁도, 부유물질, 클로로필 등과 상관성이 좋은 2밴드/1밴드를 포함시켜 실시하였다.

TM 밴드의 DN값으로부터 변환된 반사도와 45개 지점의 수질 실측치를 이용하여 작성된 상관관계 매트릭스는 Table 3.3과 같으며, 반사도 변환을 하지 않은 밴드 6과수온은 제외하였다.

수질자료와 TM데이터와의 통계처리는 수질인자에 대한 상관계수가 0.6이상인 밴드를 선정한 후 수질인자를 종속변수로 밴드별 반사도를 독립변수로 하여

다중회귀분석을 하였고, 상관계수가 0.6이상인 밴드가 없을 경우에는 7개 밴드 중 상관계수가 높은 밴드를 취하여 회귀분석을 실시하였다.

표에 의하면 수질인자에 대한 정보와 가장 밀접한 파장대로 알려진 가시광선 영역의 밴드 1, 2, 3 중 밴드 1은 수질인자와 상관성이 낮게 나타났는데, 밴드 1은 다른 밴드에 비하여 물에 대한 투과력이 높아 수중에 수직으로 분포된 물질의 전체량에 대해 반사도를 나타내지만⁶⁾ 본 연구는 수표면에서 시료를 채취하여 농도를 측정하였기 때문에 상관성이 낮아진 것으로 판단된다.

상관관계 분석 결과 물의 혼탁도와 밀접한 관계가 있는 투명도, 탁도, 부유물질 등은 가시광선 파장대인 밴드 2, 3 및 밴드 2/1과 상관계수가 높은 것으로 나타났고, 클로로필은 밴드 4 및 밴드 2/1과 좋은 상관성을 보였다.

하절기인 1995년 6월 20일에 15개 지점, 봄철인 1996년 3월 18일에 30개 지점에서 측정한 대청호의 전반적인 수질현황을 살펴보면 1995년 6월에는 겨울부터 지속된 가뭄으로 수위가 낮았고 호수의 만입부 지역에서 조류가 대량 증식하는 부영양화 현상이 진행 중이었다. 1996년 3월에는 대청호 상류지역에 약 50mm의 비가 내리고 2일이 경과하여 본류 및 지천 유입지점 부근은 토사가 혼입된 물이 유입되고 있었고, 이에 따른 영향으로 대청호의 전반적인 수질상태도 1995년 6월에 비해 탁도가 상당히 증가되었으나 수온이 낮아 조류 발생량은 현저히 감소한 상태였다.

3.2.1 투명도

투명도는 수표면 상태, 태양의 각도, 대기의 청명도 그리고 부유물질의 형상과 크기에 따라 다르기 때문에 색도에 영향을 미치는 용해성물질이 수중에 존재하여도 정확한 투명도 측정을 방해하게 된다.

위성데이터 분석 결과 투명도와 상관계수가 0.6 이상인 밴드는 2/1과 2로써 이들을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과 다음과 같은 회귀모형을 구하였다.

$$\text{Trans. (m)} = 12.8 - 43.2(\text{REFB2}) -$$

$$10.3(\text{REFB2/1}) \quad (R^2=0.56) \quad (3.3)$$

한편 수질인자의 농도와 각 밴드의 DN값에 Ln을 취하여 상관계수를 구하면 다른 수질인자의 상관계수는 낮아지는 반면 투명도의 상관계수가 높아졌으며, Ln을 취하여 회귀분석한 결과 상관결정계수가 0.72로 향상된 회귀모형을 구하였다.

$$\text{Ln Trans. (m)} = -8.33 - 2.97\text{Ln}(\text{REFB2}) - 2.97\text{Ln}(\text{REFB2/1}) \quad (R^2=0.72) \quad (3.4)$$

3.2.2 탁도

수중의 부유물질은 탁도를 유발시키는데 탁도는 투사광의 산란과 흡수에 의해 일어나며, 빛의 산란은 부유물질의 분포, 크기, 모양 그리고 입자의 구성물질에 따라 다르게 된다. 일반적으로 증류수에서는 빛의 흡수가 가시광선 영역의 적색파장과 근적외선 영역에서 일어나며 물에 부유물이 없으면 입사광을 대부분 흡수하고 위성 이미지에선 진한 청색 또는 검정색으로 나타나게 된다.

물이 점점 탁해지면 가시광선 영역의 적색파장과 근적외선 영역에서 빛의 산란과 반사가 증가하게 되는데,⁷⁾ 본 연구에서는 녹색과 적색파장인 밴드 2와 밴드 3에서 0.86 이상의 높은 상관성을 보인 반면 근적외선파장인 밴드 4에서는 0.33의 낮은 상관계수를 얻었다. 또한 탁도와 부유물질의 상관계수는 0.97로써 탁도가 부유물질 농도에 절대적으로 기인함을 알 수 있었고 상관계수가 0.6이상인 밴드 2, 3 및 2/1을 독립 변수로 한 회귀모형은 식 (3.5)와 같다.

$$\text{Turb. (NTU)} = -55.6 + 139(\text{REFB2}) + 556(\text{REFB3}) + 32.6(\text{REFB2/1}) \quad (R^2=0.78) \quad (3.5)$$

3.2.3 부유물질

물에 의한 빛의 반사는 부유물질의 농도 뿐만 아니라 입자의 크기 및 구성성분에 따라 산란 특성이

다르기 때문에) 이들에 대한 조사가 동시에 이루어져야 하나 본 연구에서는 농도만을 조사하여 이들에 의한 영향은 파악하지 못하였다.

부유물질에 대한 밴드별 상관관계 분석 결과 탁도와 유사한 경향을 보였으며, TM밴드 중 부유물질과의 상관계수가 0.6 이상인 밴드 2, 3 및 2/1을 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

$$SS(mg/L) = -60.4 - 168(REFB2) + 511(REFB3) + 71.5(REFB2/1) \quad (R2=0.77) \quad (3.6)$$

3.2.4 클로로필 (클로로필 a + 페오파이틴 a)

클로로필은 부영양화와 직접적인 관계에 있는 항목으로 광합성을 하는 조류에게 절대적으로 필요한 요소이며 클로로필 a가 조류(藻類)내 유기물 건조중량의 약 1.5%(2)를 차지하기 때문에 수중의 클로로필 a 농도를 측정하여 수체의 조류량을 파악하는 지표로 사용하고 있다.

본 연구에서 클로로필의 조사는 조류의 현존량에 대한 척도인 클로로필 a 및 클로로필 a의 잠재형태이며 조류 군집의 소멸상태를 알 수 있는 지표인 페오파이틴 a의 농도를 조사하였다.

수질분석 결과 1995년 6월에는 조류의 성장에 필수적인 영양염류와 수온이 높아 호수의 만입부에서 조류가 많이 번식하여 클로로필 a 및 페오파이틴 a 농도가 높았으나, 1996년 3월에는 수온이 전 지점에서 9°C 이하로 낮아 하절기인 1995년 6월에 비하여 클로로필 a 농도가 낮아졌고 페오파이틴 a는 검출되지 않았다.

상관관계 분석 결과 클로로필과 높은 상관성을 가진 TM밴드는 근적외선 파장인 밴드 4와 2/1로서 이들 밴드를 이용하여 얻은 클로로필의 회귀모델은 (3.7) 식과 같다.

$$Chl.(mg/m3) = -24.6 + 401(REFB4) + 15.3(REFB2/1) \quad (R2=0.83) \quad (3.7)$$

3.2.5 총인, 총질소

총인과 총질소는 호수의 부영양화 제한인자로 작용하며 주로 생활하수, 축산폐수, 농경지 및 임야의 유출수 등에 의하여 영향을 받는데, 대청호 수질조사에 관한 최근의 보고(9)를 보면 대청호와 같이 유역 내에 인구밀도가 낮고 농경지와 산림이 많은 면적을 차지하는 지역에서는 수체내의 영양염류 농도 변화는 강우 후에 특히 증가한다고 하였다.

1996년 3월 18일은 강우 2일 후로서 1995년 6월에 비해 측정지점에 따라 영양염류의 농도 차이가 크게 나타났는데, 특히 총인의 경우 1996년 3월에 옥천천 유입지점인 R6가 다른 지점에 비하여 현저하게 높았다. 이는 우리나라의 다른 호수와 마찬가지로 호수에 유입되는 영양염류는 강우 특성과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이러한 오염물질의 유입은 강우 후에 집중됨으로써 수질문제가 더욱 심화되는 경향을 보이고 있다. 따라서 대청호의 수질관리는 비점오염원의 발생 특성과 이동특성 분석 및 이에 대한 대책이 상당히 중요한 비중을 차지하고 있기 때문에 비점오염원을 효율적으로 관리할 수 있는 지리정보시스템(GIS)과 원격탐측을 병합한 새로운 수질관리 시스템이 필요할 것으로 판단된다.

한편 영양염류인 총인과 총질소에 대한 원격탐측 적용사례는 많지 않지만 Lillesand 등(10)은 Landsat MSS의 밴드 4와 밴드 5, 6, 7의 DN값에 체공을 취한 값인 52, 62, 72 및 밴드 4/5를 총질소에 적용하였을 때 0.90의 높은 상관결정계수를 구할 수 있었고 밴드 4, 5, 6, 7 및 4/5와 총인의 상관결정계수는 0.73이었으며, Baban(11)은 총인과 TM 2밴드로부터 0.61의 상관결정계수를 얻었다. 그러나 본 연구에서는 총인과 총질소에 대해 상관성이 가장 좋게 나타난 TM 밴드 3과 6을 이용하여 회귀분석 하였을 때 상관결정계수가 모두 0.34 이하로 낮은 상관성을 보여 이들 항목에 대한 원격탐측의 적용은 어려운 것으로 나타났다. 이런 결과가 나타난 것은 두 항목 모두 광학적 특성이 뚜렷하지 않아 TM센서에서의 탐지가 어렵기 때문인 것으로 판단되고, 상관관계 분석결과 총인은 밴드 3, 2/1 그리고 총질소는 밴드 4, 5가 다른 밴드에 비하여 상

관계수가 높았으며 이들을 이용한 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$$TP(mg/L) = -0.0825 + 0.676(REFB3) + 0.0915(REFB2/1) \quad (R2=0.28) \quad (3.8)$$

$$TN(mg/L) = 1.21 + 79.8(REFB4) - 88.6(REFB5) \quad (R2=0.45) \quad (3.9)$$

이상으로 서로 다른 계절에 구한 TM데이터의 반사도와 수질 실측치간의 관계를 분석한 결과 광학적 특성이 뚜렷한 수질인자에 대한 정보를 가장 많이 제공해주는 밴드는 가시광선 파장대의 밴드 2, 3 및 2/1과 근적외선 파장인 밴드 4로 나타났다. 또한 수질인자별 회귀모델에서는 투명도, 탁도, 부유물질 및 클로로필의 상관결정계수가 0.7 이상으로 산출되어 이들 수질인자의 측정 신뢰도가 높게 나타난 반면 용해성 물질인 총인, 총질소는 TM 밴드와의 상관결정계수가 낮게 나타났다.

3.3 수온 측정

수온은 수생식물의 분포, 용존물질의 화학반응과 반응속도 및 수체의 이동 등에 영향을 미치며, 수온이 높아지면 생화학 반응속도가 증가하는 반면 수중의 산소량은 감소하게 된다. 호수의 수질 평가에서 수온 분포가 중시되는 이유는 수온이 부영양화의 원인이 되는 조류의 증식과 관계가 깊는데 있다. 즉 수온이 15℃ 이상이 되면 조류성장에 적합한 온도 조건이 되므로 부영양화 발생 가능성이 높아진다.

표면온도와 TM 밴드 중 상관성이 가장 높은 밴드는 열적외선 파장인 밴드 6이라는 사실이 지금까지 많은 연구자에 의해 보고되었는데, Lathrop 등(6)은 TM 6밴드가 표면 온도를 1~2℃까지 정확하게 감지할 수 있기 때문에 밴드 6을 수온에 적용하였을 때 0.987의 높은 상관결정계수를 얻었으며, Pearce 등(12)은 보정식을 사용하여 오차범위를 0.6℃까지 줄일 수 있다고 하였다.

본 연구에서 TM데이터를 이용한 수온 측정은 NASA에서 개발한 모델을 사용하였는데, NASA의 Markham과 Barker는 밴드 6의 방사도를 이용하여 위성에서 측정된 온도를 알아낼 수 있는 모델을 식 (3.8)과 같이 제시하였으며, 여기에 사용되는 상수는 Table 3.4와 같다.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (3.10)$$

T : 온도 (K)

K1, K2 : 보정상수

Lλ : 밴드 6의 방사도(mW · cm⁻² · sr⁻¹ · μm⁻¹)

Table 3.4 Landsat TM thermal band calibration constants.

Satellite	K1 (K)	K2 (mW · cm ⁻² · sr ⁻¹ · μm ⁻¹)
Landsat-4	67.162	1284.3
Landsat-5	60.776	1260.56

한편 NASA 모델에 의해 산출된 절대온도를 섭씨로 환산한 수온과 1995년 6월 및 1996년 3월에 45개 지점에서 실측된 수온과의 관계를 Fig. 3.1에 나타내었다. 그림에서 NASA모델로 산출한 수온과 실측수온의 관계는 실측값에 비해 모델 산출값이 약 4.2℃ 정도 낮게 산정되었는데, 이는 실제 온도보다 위성에서 감지한 온도가 약 4.2℃ 정도 낮은 것을 의미한다. 이러한 현상은 대기 중에 존재하는 수증기나 미립자 등에 의하여 지표면으로부터 방사되는 열에너지의 감쇄(12)와 본 연구에서 Landsat 위성의 통과시간보다 수온 측정시간이 늦어져 수온 측정값이 증가된 결과로 판단된다.

위성에서 측정된 온도와 실제 온도를 정확히 일치

시키기 위해서는 다양한 기상조건에 따른 온도 보정 계수가 필요하며, 또한 위성 통과시간과 거의 일치된 시간에 측정된 수온자료가 있어야 가능할 것이다.

3.4 회귀모델의 정밀도 분석

수질인자의 측정치와 TM밴드의 반사도로부터 유도한 회귀모델의 정밀도를 분석하기 위하여 각 조사 지점의 반사도를 회귀모델에 적용시켜 산정한 수질인자의 예측치와 실측치간의 관계를 Fig. 3.2~Fig. 3.7에 나타내었으며, 이들간의 잔차평균제곱과 잔차제곱합(Residual Sum of Squares, RSS)을 구하여 Table 3.5에 정리하였다.

투명도의 예측치와 실측치의 관계를 보면 투명도가 2.5m 이하에서는 예측치가 높게 산정이 되었으나 2.5m를 넘으면 실측치가 대부분 높은 것으로 나타났으며, 1:1선을 기준으로 $\pm 1.5m$ 편차범위를 보였다.

탁도와 부유물질은 낮은 농도에서 실측치가 높고 농도가 높아질수록 예측치가 높았으나 탁도의 경우 50NTU, 부유물질은 30mg/L를 초과하면 실측치가 높아져 두 항목은 유사한 경향을 보였다.

그러나 클로로필은 농도의 높고 낮음에 관계없이 최고치와 최저치를 제외한 40개 지점에서 1:1선을 따라 고른 분포를 보였고 편차범위는 1:1선을 기준으로 $\pm 2.5mg/m^3$ 내에 있었으며, 또한 총질소와 총인의 경우 각각 3.0mg/L, 0.01mg/L를 기준으로 낮은 농도에서는 예측치가 높았으나 농도가 높아질수록 실측치가 높게 나타났다.

수질인자별 예측치와 실측치의 관계는 대부분 낮은 농도에서 예측치가 높고 농도가 높아질수록 실측치가 높아지는 경향을 보였지만 탁도와 부유물질은 이와 상반된 경향을 보였으며, 클로로필만이 농도의 높고 낮음에 관계없이 대부분 1:1선을 따라 고른 분포를 보였다.

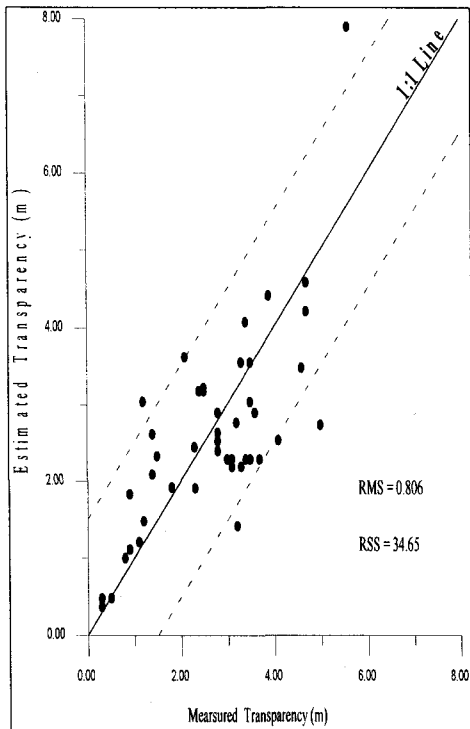


Fig. 3.2. Relationship between measured and estimated values of transparency.

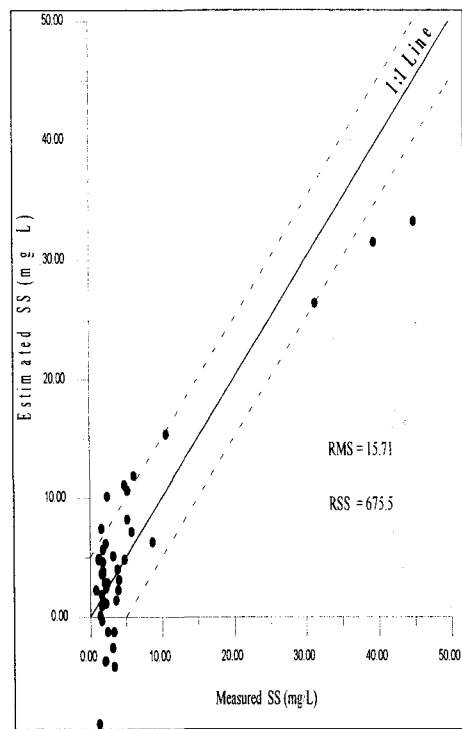


Fig. 3.3. Relationship between measured and estimated values of turbidity.

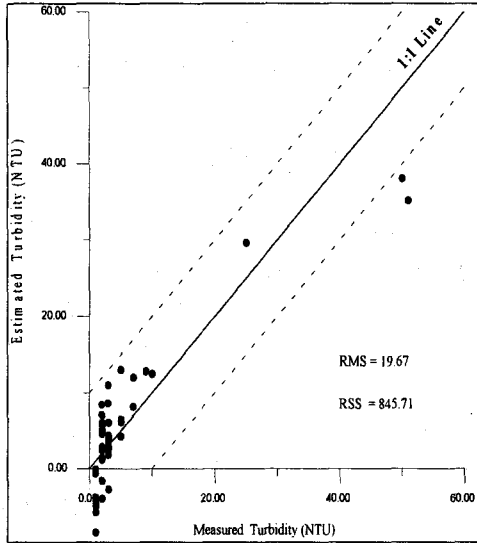


Fig. 3.4. Relationship between measured and estimated values of SS.

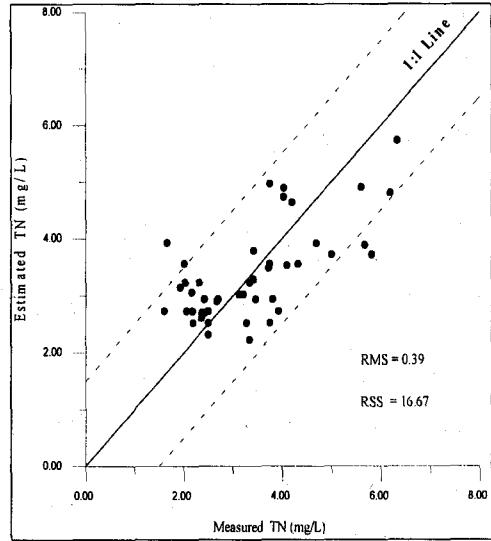


Fig. 3.6. Relationship between measured and estimated values of TN.

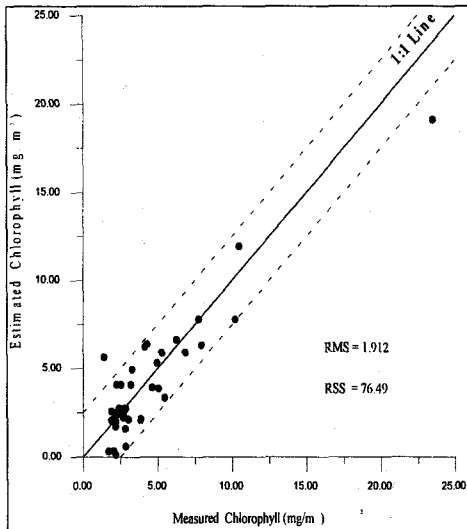


Fig. 3.5. Relationship between measured and estimated values of chlorophyll.

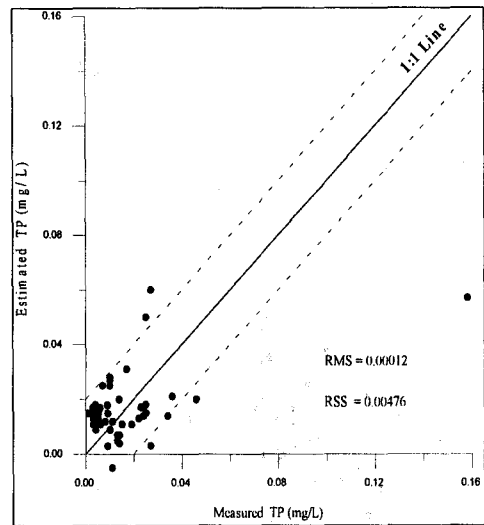


Fig. 3.7. Relationship between measured and estimated values of TP.

5. 결 론

본 연구에서는 1995년 6월 20일과 1996년 3월 18일자 Landsat 5호의 TM데이터와 위성 통과시간에 대

청호에서 측정된 부영양화 관련 수질인자와의 상관관계를 이용하여 회귀모델을 개발하였고, 회귀모델로부터 예측치를 산정한 후 실측치와 비교하여 모델의 정밀도를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 물의 혼탁도와 관련된 투명도, 탁도, 부유물질은 TM 밴드 2, 3 및 2/1과 상관관계가 높게 나타났고, 클로로필은 밴드 4 및 2/1과 좋은 상관성을 보였다.
2. TM 밴드의 반사도와 수질측정치로부터 유도한 회귀모델의 상관결정계수(R²)가 0.7 이상으로 나타난 항목은 투명도, 탁도, 부유물질 및 클로로필이었으나 총인, 총질소는 회귀모델의 상관결정계수가 낮아 광학적 특성이 뚜렷하지 않은 용해성물질은 원격탐측을 적용하기 어려웠다.
3. NASA모델로 산정한 수온의 정밀도는 매우 높았으나 정확도는 대청호에서 실측된 수온보다 약 4.2℃ 정도 낮게 측정되었다.
4. 회귀모델의 정밀도 분석 결과 투명도, 총인, 총질소는 낮은 농도에서 예측치보다 높고 농도가 높아질수록 실측치가 높아지는 경향을 보였지만 탁도와 부유물질은 이와 상반된 경향을 보였으며, 클로로필은 농도의 높고 낮음에 관계없이 대부분 1:1 선을 따라 고른 분포를 보였다.
5. Brian L. Markham, John L. Barker, "Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-Satellite Temperatures", EOSAT Technical Notes, 1, 1986, pp 3~8.
6. Richard G. Lathrop, Jr. and Thomas M. Lillesand, "Use of Thematic Mapper Data to Assess Water Quality in Green Bay and Central Lake Michigan", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 5, 1986, pp. 671~680.
7. Cheshire, Heather Mcrae, "Remote Sensing of Water Quality", Ph. D Thesis, North carolina State University, 1995.
8. V. K. Choubey and V. Subramanian, "Nature of Suspended Solids and IRS1A-LISSI Data: A Case Study of Tawa Reservoir (Narmada Basin)", Remote Sensing of Environment, Vol. 34, 1990, pp. 207~215.
9. 권오현 외, "수중포기에 따른 장래 수질변화 예측 및 효과 규명에 관한 연구(1차)", 한국 수자원공사, 1993, pp. 139-142.
10. Thomas M. Lillesand, William L. Johnson, Richard L. Deueli, Orville M. Lindstrom, Douglas E. Meisner, "Use of Landsat Data to Predict the Trophic State of Minnesota Lakes", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 49, No. 2, 1983, pp. 219~229.
11. Serwan M. J. Baban, "Detecting Water Quality Parameters in the Norfolk Broads, U.K., Using Landsat Imagery", Int. J. Remote Sensing, Vol. 14, No. 7, 1993, pp. 1247~1267.
12. A. F. Pearce, A. J. Prata, C. R. Manning, "Comparison of NOAA/AVHRR-2 Sea Surface Temperatures with Surface Measurements in Coastal Waters", Int. J. Remote Sensing, Vol. 10, No. 1, 1989, pp. 37~52.

감사의 글

본 연구는 전북대학교 도시 및 환경연구소의 연구비에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Tadakuni Miyazaki, "Measuring the Water Quality of Lake Kasumigaura by Landsat Remote Sensing", 國立公害研究所研究報告 第 89 號, 1986, pp 20~55.
2. APHA, AWWA and WEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 18th Ed., Washington, D.C., 1992, pp. 10-17~10-55.
3. 환경처, "수질오염공정시험방법", 1991.
4. Rovinove, C. J., "Computation with Physical Values from Landsat Digital Data", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.