

클로로필의 반사특성 분석과 원격탐측을 이용한 대청호의 영양상태 평가

Analysis of Chlorophyll Reflectance and Assessment of
Trophic State for Daechong Reservoir Using Remote Sensing

김 태 근* 김 태 승* 조 기 성** 김 환 기**
Kim, Tae Geun Kim, Tae Seung Cho, Gi Sung Kim, Hwan Gi

要 旨

호수의 수질관리시 가장 중요한 수질인자 중의 하나인 클로로필의 반사도를 측정하여 가시광선과 근적외선 영역에서 클로로필의 파장별 반사특성을 파악하였고, 클로로필 반사도 스펙트럼에 TM데이터를 적용시켜 TM데이터만으로 클로로필 농도를 추정할 수 있는 변환식을 유도하였다.

또한 1995년 6월 20일과 1996년 3월 18일자의 LANDSAT TM데이터와 위성 통과시간에 대청호에서 측정된 클로로필의 상관관계로부터 회귀모형을 유도하여 대청호 전역의 영양상태 분포도를 작성하였고 계절에 따른 영양상태를 평가하였다.

ABSTRACT

The reflectance of chlorophyll was measured using UV-VIS spectrophotometer with the reflectance integrator in the laboratory in order to define its spectral characteristics. Sharp peaks appear at around 485nm and 655nm due to fluorescence and scattering, and the reflectance of chlorophyll increases at 580nm. With the increase in the chlorophyll concentration, the reflectance also increases. We have applied TM data to the reflectance spectrum of chlorophyll and have developed two formula with which one can estimate the chlorophyll concentration.

Satellite re sensing, with its synoptic coverage, is used to obtain the chlorophyll concentration in Daechong reservoir. The approach involved acquisition of water quality samples from boat simultaneous with Landsat 5 satellite overpass. The remotely-sensed data and the ground truth data were obtained on 20 June 1995 and on 18 March 1996. Regression models have been developed between the chlorophyll concentration and Landsat Thematic Mapper digital data. As the regression model was determined based on the correlation coefficient which was higher than 0.7 and the spectral characteristics of chlorophyll, and we have applied it to the entire study area to generate a distribution map of trophic state. According to the trophic state map made based upon Aizaki's TSI and chlorophyll a concentration, the area where Okchun stream was flowing into was shown to be polluted the most all over the Daechung reservoir by showing an eutrophic state in June 1995 and a mesotrophic state in March 1996.

*국립환경연구원 금강수질검사소

**전북대학교 토목환경공학부

1. 서 론

호수의 수질관리 측면에서 가장 큰 문제점은 조류(藻類)의 이상증식으로 부영양화현상이 발생하여 수자원으로서의 가치를 떨어뜨리는 것인데, 호수는 하천과는 달리 반폐쇄성 수역으로 오염되기 쉽고 오염된 수질을 회복하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다. 우리나라의 호수는 대부분 강의 중·상류에 댐을 건설하여 조성된 인공호로서 외국의 천연 호수보다 수심이 얇고, 만수면적에 비해 유역면적이 넓어 오염물질 유입량이 많기 때문에 쉽게 부영양화 될 수 있는 가능성을 가지고 있다. 호수가 부영양화 되면 특정조류가 대량으로 증식하는 수화현상(water bloom)이 일어나게 되어 물에서 이취미의 발생, 정수장의 여과지 폐색, 배관에 점액질 축적 및 수중의 용존산소를 고갈시키는 등 상수이용과 수중 생태계에 많은 악영향을 끼친다. 따라서 우리나라에서도 호수의 부영양화를 방지하고 오염된 호수의 수질을 개선하기 위해 호수 수질관리 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 관리방안을 수립하기 위해서는 부영양화와 관련된 수질인자의 농도와 분포를 파악하는 것이 선행되어야 하는데, 시료채취 지점의 수질만을 알 수 있는 재래식 점채취(point sampling)방법 대신 원격탐측을 이용하면 대상 수역의 오염물질 농도와 분포를 전체적으로 파악할 수 있어 수질인자들의 상호작용을 고려하여 구체적인 부영양화 방지 대책 수립에 도움을 줄 수 있으며, 또한 위성 원격탐측은 주기적으로 지상수역의 수질 정보를 구할 수 있어 조류의 분포와 이동을 지속적으로 관찰할 수가 있다.

한편 원격탐측 데이터 분석은 주로 전자기파에 대한 자료를 수집, 해석하는 것으로서 어떤 대상물이나 현상을 보다 정확하게 이해하기 위해서는 대상물의 종류와 환경조건에 따라 결정되는 전자기파의 분광학적인 특성을 먼저 파악해야 한다.

따라서 본 연구에서는 호수의 부영양화와 가장 직접적인 관계에 있는 클로로필의 반사 특성을 실험실에서 분석하여 Landsat TM데이터의 적용여부를 파악

하였고, 또한 우리나라 중부지역에 각종 용수를 공급하고 있는 대청호를 대상으로 조류발생이 가장 심한 여름철과 조류발생이 상대적으로 적은 이른 봄철의 위성데이터와 클로로필 농도의 실측치를 이용하여 호수 전역의 영양상태(trophic state) 분포도를 작성한 후 계절에 따른 호수의 영양상태를 평가하였다.

2. 연구범위 및 방법

수중의 클로로필(클로로필= 클로로필 a + 페오파이틴 a로 하였음) 농도 변화에 따른 반사도 측정은 조류가 많이 발생한 지점인 대청호 만입부에서 시료를 채취하여 실험실에서 270 mesh 표준체로 거른 후 클로로필 농도를 4종류로 각각 다르게 조제한 시료를 사용하였으며, 측정장비는 분광광도계(UV-VIS Spectrophotometer 8452A, Hewlett Packard, USA)에 Reflectance Spectroscopy Accessory RSA-HP-84 (Labsphere, USA)를 장착하여 가시광선과 근적외선 영역인 400~820nm slit: 2nm 범위의 반사도를 측정하였다.

본 연구에 사용한 위성데이터는 1995년 6월 20일과 1996년 3월 18일에 일본 RESTEC에서 제공한 LANDSAT TM데이터로써, LANDSAT 5호의 path 115, row 35에 해당하는 지역 중 대청호를 포함한 지역이며(중심 경위도가 N 36° 26' 50", E 127° 32' 50"), BIL방식으로 포맷된 플로피 디스크를 영상처리 소프트웨어인 ENVI(Environment for Visualizing Images, USA)로 처리하여 데이터 추출 및 영양상태 분포도를 작성하였다.

또한 조류 발생량이 현격한 차이를 보이는 여름철과 이른 봄철에 대청호 전역의 조류 발생량 변화를 파악하기 위해 1995년 6월 20일에 15개 지점, 1996년 3월 18일에 30개 지점에서 LANDSAT 5호 위성의 통과시간에 맞춰 조류량과 밀접한 수질항목인 클로로필 a와 페오파이틴 a를 측정하였으며, 시료 채취시 GPS(Global Positioning System, GARMIN SRVY 100, USA)를 이용하여 채수지점의 좌표를 구하였다.

영양상태 분포도 작성은 조사시기별 TM데이터와 수질자료를 회귀분석하여 유도된 회귀모델을 위성영상에 적용시켜 대청호의 영양상태 분포도를 작성하였다.

3. 분석 및 고찰

3.1 클로로필의 반사 특성

위성데이터를 이용하여 수계의 오염물질 분포를 파악하고자 할 때 수질인자에 대한 원격탐측 자료를 보다 정확하게 해석하기 위해서는 수질인자의 분광특성을 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 호수의 부영양화와 직접적인 관계에 있는 클로로필의 농도별 반사도 스펙트럼을 Fig. 3.1과 같이 얻었으며, 이때 사용한 시료의 우점조류는 남조류인 *Microcystis* spp.였다.

본 연구에서 얻은 클로로필의 반사도 스펙트럼을 TM 밴드에 해당하는 파장으로 구분하여 특징을 살펴보면 다음과 같다.

TM 1밴드(450~520nm)에 해당하는 영역에서는 물을 통과한 빛의 대부분이 용해성 유기물질과 클로로필에 의해 흡수되어 낮은 반사도를 나타내지만, 청색파장 영역인 430~500nm에서는 태양광에 의해 형광이 발생되어 반사도에 많은 영향을 주기 때문에 유기물 또는 클로로필 농도가 높은 수역에서는 이 파장대에 형광이 많은 영향을 준다.1) 따라서 청색파장 영역인 485nm 부근에 나타난 피크는 형광에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 수중의 클로로필에 의한 형광은 조류 세포의 생리적인 상태와 영양상태, 조류의 종류 및 성장율과 매우 밀접한 관계가 있다.2)

TM 2밴드(520~600nm) 영역인 560~590nm에서는 반사도가 크게 증가하였으며, 이러한 결과는 녹색파장의 전형적인 반사 특성에 의한 것으로 클로로필의 낮은 흡수에 기인한 것이다.3) 특히 580nm 부근의 폭이 넓은 피크는 부영양화된 호수의 수면에서 반사도를 측정할 Dekker 등4)과 Yacobi 등5)이 제시한 결

과와 매우 유사한 경향을 보여 주었다. 조류가 많이 번식하여 수중의 클로로필 a 농도가 증가하면 450nm 부근에서의 흡수와 500nm~600nm 사이에서 반사와 산란이 증가하여 물의 색깔이 점차 초록색으로 변하게 된다.

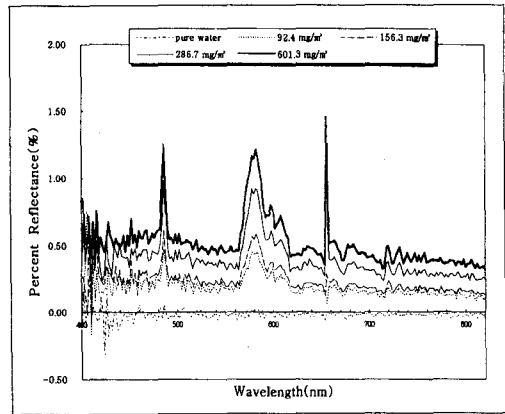


Fig. 3.1. Reflectance spectra with different chlorophyll concentrations.

TM 3밴드(630~690nm)에서는 조류에 함유된 클로로필의 몇 가지 광학적 특성이 나타나는데, 이 파장 범위는 클로로필의 흡수와 형광이 발생하는 적색파장 영역으로 630nm 부근(620~650nm)에서 낮은 반사도를 보인 반면 655 nm에서는 폭이 매우 좁은 피크가 나타났으며, 이 영역에서는 클로로필 농도가 높아짐에 따라 피크가 급격하게 커지는 것을 알 수 있었다. Stumpf 등6)에 의하면 반사도가 620nm 부근에서 낮게 나타나는 것은 클로로필의 흡수에 의한 것으로 보였고, Gitelson7)은 1983년부터 1989년까지 유럽 여러 나라의 호수에서 측정된 반사 스펙트럼을 분석한 결과 675nm 부근에서 가장 높은 반사도가 나타났다고 하였다. 또한 Yacobi 등은 조류의 밀집도가 커질 때 조류세포에 의한 산란이 증가하기 때문에 670nm에서의 반사도도 따라서 증가한다고 보고하였으며, 본 연구에서 얻은 스펙트럼 중 655nm에서의 폭이 매우 좁은 피크는 Gitelson과 Yacobi 등이 제시한 파장보다 짧은 파장이었다. 이 영역에서 피크가 높게 나타나는 이유로는 클로로필에 의한 형광, 변칙적인 산란7) 및

높은 클로로필 농도에서 조류와 물에 의한 흡수곡선의 합8) 등에 의한 것이라고 보고되었다. 그러나 본 연구에서 나타난 655nm의 피크는 폭이 매우 좁은 특성을 나타내어 주로 형광에 의한 결과9) 생각되며, 조류입자 수의 증가에 따른 부분적인 산란도 일부 영향을 준 것으로 사료된다. 따라서 Fig. 3.1에서 620~650nm 지점의 낮은 피크는 클로로필의 흡수에 의한 것이고, 655nm의 높은 피크는 형광 및 부분적인 산란에 의한 피크로 판단된다. 또한 Gitelson은 스펙트럼에 나타난 반사도를 이용하여 클로로필 농도를 모의해 본 결과 $R_{redmax}/R(560)$ (R_{redmax} : 적색과장 영역에서 최대 피크 파장의 반사도, $R(560)$: 560nm 부근의 폭이 넓은 반사도 최대값)을 적용하였을 때 수중의 클로로필 농도를 가장 정확하게 나타낸다고 하였다.

본 실험에 사용한 분광광도계는 원래 자외선 영역과 가시광선 영역을 측정하는 장비로서 근적외선 영역인 TM 4밴드(760~900nm) 중 820nm까지의 파장만을 측정하였다. TM 4밴드 영역 중 850~900nm 영역의 빛은 물에 의해 흡수되기 때문에 4밴드에서의 반사도는 물에 의한 흡수와 부유물의 반사에 의존하는 것으로 알려져 있으나,10) 본 실험에서는 측정 범위를 벗어나기 때문에 측정값을 얻을 수 없었다.

한편 Witte 등11)은 일반적으로 수중의 부유물질 농도가 높아지면 모든 파장에서 반사도가 높아진다는 것을 실험을 통해 입증하였으며, Fig. 3.1의 스펙트럼에서도 400~420nm를 제외한 전 파장에서의 반사도는 클로로필 농도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 클로로필 농도가 높아지면 조류의 입자 수가 많아져 산란이 증가하였기 때문인 것으로 판단되며, 실제 위성데이터 분석 결과 4밴드에서 이러한 경향이 현저하게 나타났다.

3.2 조사시기별 클로로필의 회귀모델

대청호의 영양상태 분포도를 작성하기 위해 위성 데이터와 수질자료를 이용하여 회귀모델을 유도하였다. 회귀분석은 TM밴드별 DN값과 실측된 클로로필 농도로부터 상관계수를 구하고 상관계수가 0.7이상을 기준으로 클로로필의 반사특성을 고려하여 TM밴드를

선정한 후 수질인자를 종속변수로 밴드별 DN값을 독립변수로 하여 다중회귀분석을 하였다.

3.2.1 1995년 6월 20일 데이터

위성에 탑재된 센서에 의해 감지되는 물의 반사도는 태양의 방사, 대기의 영향, 수표면의 흡수와 산란 특성에 따라 다르며, 이 흡수와 산란이 수질과 직접적으로 관련이 있다. 반사된 전자기 에너지는 흡수에 의해 감소하고 산란에 의해 증가하게 되는데, 흡수는 주로 물 자체와 용해성 유기물질과 조류의 광합성 색소에 기인하며, 산란은 주로 수중의 부유물질에 의한 다.4) 그러나 수중에 조류가 많이 존재하면 클로로필과 같은 색소와 조류 입자에 의해 흡수와 산란이 동시에 발생하게 된다.

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 클로로필 농도는 호수 분류구간 중 금강 본류의 영향을 직접 받는 대청호 상류 지점에서 높게 나타났고 호수 하류부로 내려갈수록 낮아졌다. 만입부에서는 옥천천이 유입되는 지점이 전체 조사지점 중 가장 높게 나타났으며, 이 시기의 우점조류는 남조류인 *Microcystis* spp. 였다.

또한 수질과 TM데이터의 관계는 클로로필 농도가 증가하면 모든 밴드에서 DN값이 증가하였으나 1밴드는 감소추세를 보여 역상관관계로 나타났고, 상관계수가 0.7이상으로 나타난 밴드는 2, 3, 4 및 2/1밴드로서 이 중 4밴드의 상관계수가 0.93으로 가장 높았다. 근적외선 파장에 해당하는 4밴드의 반사는 조류의 입자수와 밀접한 관계가 있는데 조류량이 많아지면 청색과장 영역을 제외한 모든 파장에서 반사도가 증가하고, 클로로필 농도가 높을 때 반사도 변화가 가장 심한 파장대는 근적외선 파장이다. 이러한 이유는 물에 의한 근적외선의 흡수계수가 높고, 조류는 수표면 부근에서 성장하기 때문이다. 대부분의 조류가 가지고 있는 부유특성, 특히 조류 입자가 많으면 광합성에 필요한 빛을 경쟁적으로 차지하려는 특성12)이 있으며,

본 연구시기에는 대청호 상류지점과 옥천천 유입지점의 수면에서 조류입자가 많이 관찰되어 이들에 의한 산란이 4밴드의 상관성을 높게 한 것으로 판단된다. Yacobi 등은 클로로필 농도가 20mg/m³ 이상이 되면 조류입자에 의한 산란이 근적외선 영역에서 반사의 주된 원인이라고 하였다.

한편 Quibell(12)은 클로로필 농도에 Ln을 취했을 때 근적외선 영역에서 상관성이 높다고 하였으나 본 연구에서는 Ln을 취했을 때 상관성이 낮아져 Quibell의 결과와 일치하지 않았다. 각 밴드별 DN값과 클로로필 농도와의 상관계수가 0.7 이상인 밴드를 선정하여 회귀분석을 하면 상관결정계수가 0.93으로 높게 산정되지만, 클로로필의 분광특성을 고려하여 반사파장인 2밴드와 상관계수가 가장 높은 4밴드로부터 다음과 같은 회귀모형을 얻었다.

$$\begin{aligned} \text{클로로필(mg/m}^3\text{)} = \\ -24.0 + 0.181(\text{BA}2) + 1.34(\text{BA}4) \quad (\text{R}^2=0.86) \end{aligned} \quad (3.1)$$

한편 페오파이틴 a 농도를 제외한 클로로필 a 만의 농도와 TM 밴드의 관계는 클로로필과의 상관계수가 0.71이었던 2밴드의 상관성이 0.67로 낮아지고 3, 4 및 2/1밴드가 0.7 이상으로 나타났으나 밴드 적용의 일관성을 고려하여 2밴드와 4밴드로 회귀분석하여 얻은 회귀모형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{클로로필 a(mg/m}^3\text{)} = \\ -20.3 - 0.030(\text{BA}2) + 1.43(\text{BA}4) \quad (\text{R}^2=0.85) \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2.2 1996년 3월 18일 데이터

1996년 3월에는 조류의 성장에 절대적인 영향을 미치는 수온이 전 지점에서 9℃ 이하로 낮아 하절기인 1995년 6월에 비하여 클로로필 a 농도가 낮아졌고 페오파이틴 a는 검출되지 않았으며, 조사시기의 우점 조류는 구조류인 *Fragilaria* spp.였다.

클로로필 a와 밴드별 상관성은 1995년 6월에 조류

가 비교적 많이 발생하여 4밴드에서 상관계수가 가장 높았지만 조류 발생량이 적은 1996년 3월에는 클로로필 a의 반사파장인 2밴드에서 상관계수가 0.68로 가장 높게 나타났다.

1995년 6월에는 클로로필과 TM 밴드간에 높은 상관계수를 얻었으나 1996년 3월에는 회귀모형의 상관결정계수가 0.55로 1995년 6월에 비해 낮게 나타났는데, 이러한 이유는 낮은 클로로필 농도(13) 탁도의 증가(14) 15) 및 우점조류가 남조류에서 구조류로의 변화 등에 기인한 것으로 판단되며, 2밴드와 4밴드로 회귀 분석하여 얻은 클로로필의 회귀모형은 (3.3) 식과 같다.

$$\begin{aligned} \text{클로로필(mg/m}^3\text{)} = \\ -13.6 + 0.418(\text{BA}2) + 0.496(\text{BA}4) \quad (\text{R}^2=0.55) \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.3 클로로필 반사도 스펙트럼에 TM데이터 적용

실험실에서 측정된 클로로필의 반사도 스펙트럼 (Fig. 3.1)과 Landsat TM데이터와의 관계를 알아보기 위하여 반사도 스펙트럼의 측정 파장 중 TM 1~4 밴드에 해당하는 파장(LBA)의 반사도 평균값(LREF)을 구하여 Table 3.1에 나타내었다. 또한 실험에 사용된 시료의 클로로필 농도(LCHL)와 LREF의 상관성을 분석한 결과 모든 LBA에서 상관계수가 0.93 이상이었으며, LCHL과 LREF를 이용하여 아래와 같은 회귀모형을 유도하였다. 회귀분석은 LBA 중 상관계수가 가장 낮고 노이즈가 심한 LBA1은 제외하고 LBA2, LBA3, LBA4를 적용하였다.

$$\begin{aligned} \text{LCHL(mg/m}^3\text{)} = \\ 195 - 9.57 \times 10^5(\text{LBA}2) - 1.49 \times 10^5(\text{LBA}3) \\ + 2.02 \times 10^6(\text{LBA}4) \quad (\text{R}^2=0.986) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Table 3.1. Reflectance mean values(LREF) for Landsat TM bandwidth based on the chlorophyll reflectance spectra.

L _{CHL} \ L _{BA}	0mg/m ³	92.4mg/m ³	156.3 mg/m ³	286.7 mg/m ³	601.3 mg/m ³
	1	-0.15 x 10 ⁻³	2.3097 x 10 ⁻³	2.8422 x 10 ⁻³	4.5736 x 10 ⁻³
2	-0.1705 x 10 ⁻³	2.4870 x 10 ⁻³	3.0988 x 10 ⁻³	5.0693 x 10 ⁻³	6.6183 x 10 ⁻³
3	-0.1987 x 10 ⁻³	1.629 x 10 ⁻³	2.0558 x 10 ⁻³	3.7613 x 10 ⁻³	4.9645 x 10 ⁻³
4	-0.1965 x 10 ⁻³	1.2681 x 10 ⁻³	1.5848 x 10 ⁻³	2.7316 x 10 ⁻³	3.7019 x 10 ⁻³

한편 TM 데이터를 식(3.4)에 적용시키기 위해서는 TM밴드의 DN값을 반사도(reflectance)로 변환시켜야 한다. 이러한 변환은 각 밴드의 값을 같은 스케일로 변환시켜 직접 비교할 수 있기 때문에 위성데이터의 생산일자가 다르거나, 서로 다른 센서로부터 구한 데이터의 표준화를 위해 사용되고 있으나 본 연구에서는 식(3.4)에 적용된 LREF와 물리적인 차원을 같게 하기 위하여 DN값을 반사도로 변환하였다.

DN값을 반사도로 변환시키기 위해서는 먼저 DN값을 방사도(radiance)로 바꾼 다음 반사도로 변환시켜야 하는데 이는 NASA의 Markham과 Barker(16)가 제시한 식과 상수를 이용하였으며, DN값으로부터 변환된 조사지점별 TM 2, 3, 4밴드의 반사도를 식 (3.4)에 적용시켜 구한 클로로필 농도(LCHL')와 실측된 클로로필 농도로부터 다음과 같은 관계식을 유도하였다.

클로로필(mg/m³)=

$$2 \times 10^{-4} (LCHL') - 0.6071 \quad (R^2 = 0.68) \quad (3.5)$$

또한 회귀모델의 정밀도 분석을 위해 수질 조사지점의 2, 3, 4밴드 반사도를 식 (3.4)와 (3.5)에 적용시켜 구한 클로로필 예측치와 실측치의 관계를 Fig. 3.2에 나타내었다. 그림에서 클로로필 예측치와 실측치간의 편차범위는 조사지점 중 38개 지점이 1:1선을 중심으로 ±2.5mg/m³ 내에 있었다.

각 지점의 반사도를 클로로필 반사도 스펙트럼의 회귀모델에 대입하여 구한 클로로필 농도와 실측된 클로로필 농도로부터 유도한 회귀모델의 상관결정계수가 0.68로 산정되었고, 예측치의 정밀도 또한 비교적 신뢰할 수 있는 수준이기 때문에 TM데이터의 밴드별 반사도를 알면 식 (3.4)와 식 (3.5)를 이용하여 실제값에 접근된 클로로필 농도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 클로로필을 비롯한 다른 수질인자의 분광학적인 특성을 정확하게 파악한다면 위성데이터에서 구한 자료만으로도 농도 추정이 가능함을 보여주었다.

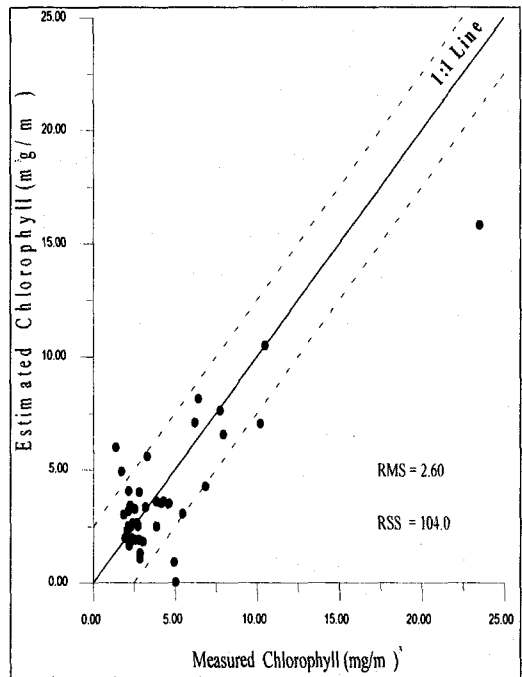


Fig. 3.2. Relationship between measured and estimated values of chlorophyll. The estimated values are derived from equation (3.4), (3.5).

3.4 TM 영상을 이용한 영양상태 분포도 작성

호수의 영양상태 평가방법에는 부영양화 관련 수질항목에 의한 방법과 영양상태 지수(Trophic State Index, TSI)에 의한 방법이 있다. 부영양화와 관련된 수질항목에 의한 평가방법은 측정이 간단하고, 수체의 여러 특성을 종합적으로 고려할 수 있다는 장점이 있는 반면, 수질인자간에 영양상태 평가 결과가 서로 다르게 나타날 경우 영양상태의 정확한 평가가 어렵다는 단점이 있다. 그러나 영양상태 지수에 의한 평가 방법은 수질항목에 의한 평가방법에 비하여 간단하면서도 수질의 제반 특성을 종합적으로 고려할 수 있으며, 부영양화의 발생 여부 및 진행정도를 0에서 100 사이의 연속적인 수치로 표시하여 호수의 영양상태를 구체적으로 표현할 수 있기 때문에 본 연구에서는 영양상태 지수에 의한 평가방법과 TM 영상으로 대청호의 영양상태 분포도를 작성하여 대청호 전역의 영양상태를 파악하였다.

영양상태 지수는 여기에 사용되는 수질인자인 투명도, 클로로필 a 및 총인 사이에 높은 상관관계가 성립하여야만 하나의 수질인자를 측정하여 영양상태 분포도를 작성하였을 때 다른 수질인자의 영양상태 지수를 정확하게 추정할 수 있게 된다. 일반적으로 클로로필 a와 총인은 양의 상관관계를 가지며, 투명도와 클로로필 a 그리고 투명도와 총인은 음의 상관관계를 나타내는데, 본 연구에서 측정된 이들 수질인자의 상관관계를 보면 1995년 6월과 1996년 3월에 투명도와 클로로필 a의 상관관계는 모두 -0.74로 같았고, 투명도와 총인은 각각 -0.46과 -0.47, 클로로필 a와 총인의 상관관계는 0.31과 0.61로서 일반적인 경향과 일치하였다. 그러나 투명도와 클로로필 a의 상관계수를 제외한 다른 인자들의 상관성은 낮게 나타났다.

한편 호수가 부영양상태에 이르게 되면 영양염류의 농도 증가, pH 및 DO의 불규칙한 변화로 물의 화학적인 성질이 변하고, 식물성 플랑크톤 농도 증가 등 생물학적인 특성도 변화되는 여러 현상이 나타나지만, 그 중 가장 가시적인 특징은 물의 색이 변하고 투명도가 현저하게 감소하는 것이다. 호수의 영양상태를

판정하는 것은 영양염류 유입량, 호수의 위치와 지형, 조류의 생산성 및 수리학적 체류시간 등 여러 인자의 특성이 각각 다르기 때문에 이를 명확하게 구분하기가 곤란하며, 하나의 호수 내에서도 이러한 인자들의 부분적인 영향으로 지역마다 영양상태가 다르게 나타나는 경우가 많아 대상 호수의 전반적인 영양상태를 파악하기가 매우 어렵다. 그러나 위성 원격탐측기법을 이용하면 넓은 지역에 대한 동시 관측과 동일지역의 반복 관측이 가능하기 때문에 호수 전역의 영양상태를 알 수 있고, 주기적으로 위성데이터를 구입하면 시간에 따른 부영양화의 진행상태도 파악할 수 있다.

영양상태 지수를 이용하여 호수의 영양상태 분포도를 작성하기 위해서는 먼저 영양상태 지수 산정에 필요한 수질인자를 선정해야 한다. 본 연구에서는 영양상태 분류의 정확도를 높이기 위하여 Carlson(17)이 제시한 3개의 수질인자 중 부유물질 등 다른 요인에 의하여 저하될 가능성이 많은 투명도와 분광학적인 특성이 뚜렷하지 않은 총인은 배제하고, 호수의 조류량과 직접적인 관계에 있는 클로로필 a 만을 선택하였다.

따라서 본 연구에서 대청호의 영양상태 분포도 작성은 투명도를 기준으로 작성한 Carlson의 영양상태 지수보다는 클로로필 a를 기준으로 한 Aizaki(18)의 영양상태 지수가 보다 적합할 것으로 판단되어 Aizaki 영양상태 지수(ATSI)를 적용하였다.

Aizaki 영양상태 지수는 빛의 강도가 표면의 1%까지 감소되는 수심인 생산층의 평균 클로로필 a 농도가 1000mg/m³을 초과하는 경우가 거의 없었으므로 이 값을 지수 100으로 하고, 조류에 의한 빛의 흡수가 물에 의한 흡수보다도 충분히 작아지는 값인 클로로필 a 농도 0.1mg/m³를 지수 0으로 하는 영양상태 지수를 제안하였으며, 클로로필 a 농도가 25배 증가할 때 지수가 10씩 증가하는 다음 식을 기본식으로 하였다.

$$ATSI(Chl.) = 10 \left[2.46 + \frac{\ln(Chl. a)}{\ln 2.5} \right] \quad (3.6)$$

Chl. a : 클로로필 a 농도 (mg/m³)

한편 Carlson과 Aizaki 등은 TSI에 의한 호수의 영양 상태 구분을 TSI가 40 이하이면 빈영양상태, 40~50 이면 중영양상태, 50 이상이면 부영양상태로 평가하였다. 그러나 Kratzer 등(19)은 TSI에 의한 영양상태 구분을 보다 세분화하여 TSI가 20 이하이면 극빈영양상태, 30~40 빈영양상태, 45~50 중영양상태, 53~60 부영양상태 그리고 70 이상이면 과잉영양상태로 분류

하였다. Kratzer 등이 제시한 기준으로 영양상태를 구분해 보면 클로로필 a 농도가 0.66mg/m³ 미만일 때는 극빈영양상태, 1.64~4.10mg/m³이면 빈영양상태, 6.48~10.25mg/m³이면 중영양상태, 13.49~25.63mg/m³이면 부영양상태 그리고 64.07mg/m³을 초과하면 과잉영양상태이며, 영양상태에 따른 클로로필 a의 농도 범위는 Table 3.2와 같다.

Table 3.2. Ranges of chlorophyll a concentration with Aizaki's trophic state.

Classification Parameter	Ultra-Oligotrophic	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Hyper-trophic
Chlorophyll-a (mg/m ³)	<0.66	1.64 ~ 4.10	6.48 ~ 10.25	13.49 ~ 25.63	>64.07

또한 영양상태 분포도 작성은 1995년 6월의 클로로필 a 회귀모델(식 3.2)과 1996년 3월의 클로로필 회귀모델(식 3.3)을 위성영상에 적용시켜 각 픽셀에서의 농도를 계산하고 클로로필 a 농도에 해당하는 영양상태 지수를 산정하여 등급별로 색상 처리하였으며, Aizaki의 TSI와 Kratzer 등의 분류 기준으로 작성한 1995년 6월과 1996년 3월의 대청호 영양상태 분포도는 Fig. 3.3, Fig. 3.4와 같다.

위성영상으로 표현한 대청호의 영양상태도를 보면 1995년 6월에는 호수 본류구간 중 상류부근이 부영양과 중-부영양상태였고 중류에 이를 때까지 빈-중영양상태와 중영양상태를 보였으며, 댐 근처까지는 대부분 빈영양상태로써 하류로 갈수록 수질이 좋아지는 것을 알 수 있었다. 이런 현상은 오랜 가뭄으로 수질이 악화된 금강 본류의 영향을 직접 받는 상류부에서 조류의 성장이 급속히 진행되다가 하류부로 유하하면서 호수의 자정작용에 의해 점차 수질이 회복된 것으로 판단된다.

또한 만입부 지점은 물의 정체시간이 길고 교환율이 낮아 호수 본류구간에 비해 부영양화 발생 가능성이 높기 때문에 대부분의 만입부에서 중영양상태 이상으로 나타났다. 특히 옥천천이 유입되는 지점의 경우 상류로 갈수록 영양상태가 높아지는 것으로 나타

나 대청호내에서 수질이 가장 좋지 않은 지점으로 밝혀졌다.

또한 1996년 3월 18일 그림에서는 대청호 전역의 영양상태가 빈영양에서 중영양상태에 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 3월에는 수온이 낮아 조류 발생량이 많지 않은 결과이며, 분류 유입지점과 옥천천 유입지점을 포함한 일부 만입부에서 중영양상태로 나타났다.

4. 결론

1. 클로로필의 분광특성은 반사영역인 580nm 부근에서 반사도가 증가하고, 흡수영역인 485 nm와 655nm 부근에서 형광과 부분적인 산란에 의해 폭이 매우 좁은 피크가 나타나며, 클로로필 농도가 높아짐에 따라 전반적으로 반사도가 증가하였다.
2. 실험실에서 측정된 클로로필의 반사도 스펙트럼에 TM데이터를 적용시켜 위성데이터만으로도 클로로필 농도를 추정할 수 있는 2개의 변환식을 유도하였다.

$$LCHL(mg/m^3) =$$

$$195 - 9.57 \times 10^5(LBA2) - 1.49 \times 10^5(LBA3) + 2.02 \times 10^6(LBA4)$$

$$\text{클로로필}(mg/m^3) = 2 \times 10^{-4} (LCHL') - 0.6071$$

3. 클로로필의 회귀모델에서 1995년 6월 보다 1996년 3월의 상관결정계수가 현저히 감소한 것은 전반적으로 낮아진 클로로필 농도와 탁도의 증가 및 우점조류의 변화에 기인한 것으로 판단된다.

4. Aizaki의 영양상태 지수(ATSD)와 클로로필 a를 이용하여 작성한 영양상태 분포도에서는 옥천 유입지점과 본류의 상류지점이 1995년 6월에 부영양상태, 1996년 3월에는 중영양상태인 것으로 나타나 이들 지점에 대한 수질보전 대책이 요구된다.

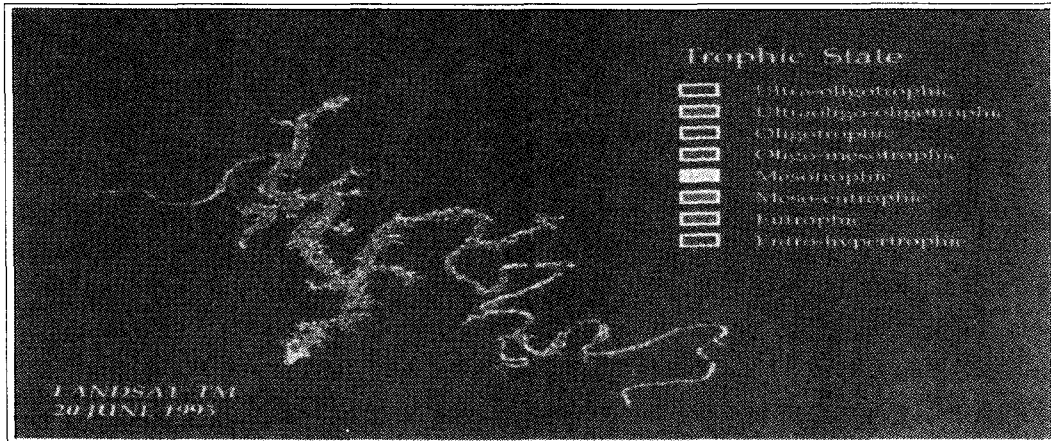


Fig. 3.3. Trophic state map with chlorophyll-a concentration in Daecheong reservoir on 20 June 1995, as identified with equation (3.2).

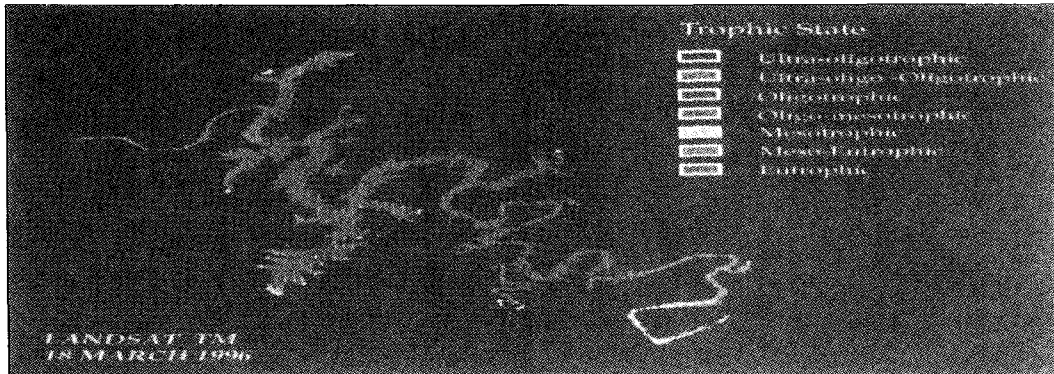


Fig.3.4. Trophic state map with chlorophyll-a concentration in Daecheong reservoir on 18 March 1995, as identified with equation (3.3).

감사의글

본 연구는 전북대학교 도시 및 환경연구소의 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. W. J. Dirks, "On the Color of the Sea (with reference to remote sensing), Ph. D. Thesis, State University of Utrecht, The Netherlands, 1990.
2. J. F. R. Gower and G. A. Borstad, "Mapping of Phytoplankton by Solar Stimulated Fluorescence Using an Imaging Spectrometer", *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 11, No. 2, 1990, pp. 313~320.
3. A. Gitelson, G. Garbuzov, F. Szilagyi, K. H. Mittenzwey, A. Karnieli, A. Kaiser, "Quantitative Remote Sensing Methodes for Realtime Monitoring of Inland Waters Quality", *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 14, No. 7, 1993, pp. 1269~1295.
4. A. G. Dekker and E. Seyhan, "The Remote Sensing Loosdrecht Lakes Project", *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 9, No. 10, 1988, pp. 1761~1773.
5. Yosef Z. Yacobi, Anatoly Gitelson, Meir Mayo, "Remote Sensing of Chlorophyll in Lake Kinneret Using High-spectral-resolution Radiometer and Landsat TM: Spectral Features of Reflectance and Algorithm Development", *Journal of Plankton Research*, Vol. 17, No. 11, 1995, pp. 2155~2173.
6. Richard P. Stumpf, Mary A. Tyler, "Satellite Detection of Bloom and Pigment Distributions in Estuaries", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, 1988, pp. 385~404.
7. A. Gitelson, "The Peak Near 700nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration", *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 13, No. 17, 1992, pp. 3367~3373.
8. W. L. Vos, M. Donze, and H. Bueteveld, "On the Reflectance Spectrum of Algae in Water: The Nature of the Peak at 700nm and its Shift with Varying Concentration", *Communications on Sanitary Engineering and Water Management, Delft, The Netherlands, Technical Report*, 1986, pp. 86~122.
9. K. K. Rohatgi-Mukherjee, "Fundamentals of Photochemistry", Wiley Eastern LTD., New Delhi, 1978, pp. 278~286.
10. A. G. Dekker, S. W. M. Peters, "The Use of the Thematic Mapper for the Analysis of Eutrophic Lakes: A Case Study in the Netherlands", *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 14, No. 5, 1993, pp. 799~821.
11. W. G. Witte, C. H. Whitlock, J. W. Usry, W. D. Morris and E. A. Gurganus, *Laboratory Measurements of Physical Chemical and Optical Characteristics of Lake Chicot Sediment Waters*. NASA Technical paper 1941, Langley Research Center, Hampton, VA, 1981, pp.27.
12. G. Quibell, "Estimating Chlorophyll Concentrations Using Upwelling Radiance from Different Freshwater Algal Genera", *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 13, No. 14, 1992, pp. 2611~2621.
13. Siamak Khorram, "Development of Water Quality Models Applicable throughout the Entire San Francisco Bay and Delta", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 1, 1985, pp. 53~62.
14. Tassan, S., "Evaluation of the Potential of the Thematic Mapper for the Marine Application", *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 8, No. 9, 1987, pp. 1455~1478.
15. J. C. Rimmer, M. B. Collins, C. B. Pattiaratchi,

- "Mapping of Water Quality in Coastal Waters Using Airborne Thematic Mapper Data", Int. J. Remote Sensing, Vol. 8, No. 1, 1987, pp. 85~102.
16. 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.
17. Carlson, R. E., "A Trophic State Index for Lakes", Limnology and Oceanography, Vol. 22, No. 2, 1977, pp. 361~369.
18. M. Aizaki, et al., "Application of modified Carlson's Trophic State Index to Japanese Lakes and its Relationships to other Parameters related to Trophic State", Kokuritsu Kogai Kenkyunsho Kenkyu Hokoku, Res. Rep. Natl. Envir. Study in Japan, Vol. 23, 1981, pp.13~31.
19. Kratzer, C. R. and Brezonik, P. L., "A Carlson-type Trophic State Index for Nitrogen in Florida Lakes", Water Resources Bulletin, Vol. 17, 1981, pp. 713~17.