

연구논문

인공위성 영상자료를 이용한 용담호의 영양상태 평가

김 태 근

청주대학교 환경공학전공

(2006년 1월 18일 접수, 2006년 4월 10일 승인)

Assessment of Trophic State for Yongdam Reservoir Using Satellite Imagery Data

Kim, Tae Geun

Department of Environmental Engineering, Cheongju University

(Manuscript received 18 January 2006; accepted 10 April 2006)

Abstract

The conventional water quality measurements by point sampling provide only site specific temporal water quality information but not the synoptic geographic coverage of water quality distribution. To circumvent these limitations in temporal and spatial measurements, the use of remote sensing is increasingly involved in the water quality monitoring research. In order to assess a trophic state of Yongdam reservoir using satellite imagery data, I obtained Landsat ETM data and water quality data on 16th September and 18th October 2001. The approach involved acquisition of water quality samples from boats at 33 sites on 16th September and 30 sites on 18th October 2001, simultaneous with Landsat-7 satellite overpass. The correlation coefficients between the DN values of the imagery and the concentrations of chlorophyll-a were analyzed. The visible bands(band 1,2,3) and near infrared band(band 4) data of September image showed the correlation coefficient values higher than 0.9. The October image showed the correlation coefficient values about 0.7 due to the atmospheric effect and low variation of chlorophyll-a concentration. Regression models between the chlorophyll-a concentration and DN values of the Landsat imagery data have been developed for each image. The regression model was determined based on the spectral characteristics of chlorophyll, so the green band(band 2) and near infrared band(band 4) were selected to generate a trophic state map. The coefficient of determination(R^2) of the regression model for 16th September was 0.95 and that of the regression model for 18th October was 0.55. According to the trophic state map made based on Aizaki's TSI and chlorophyll-a concentration, the trophic state of Yongdam reservoir was mostly eutrophic state during this study.

Key words : Remote Sensing, Trophic State, Landsat ETM, Yongdam Reservoir

1. 서론

점차 광역화되는 수질오염 문제는 새로운 수질관리 방안을 요구하고 있으며, 이에 대한 대안으로 인공위성을 이용한 원격탐사 기술을 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Baban, 1993). 인공위성 원격탐사의 대표적인 장점으로는 넓은 지역의 동시관측, 동일 지역의 반복관측, 경제적인 정보수집 비용, 접근이 곤란한 지역에 대한 정보수집 용이, 광학적·전자적 센서의 사용으로 육안관측이 불가능한 자료의 수집이 가능한 것 등을 들 수 있다. 이러한 장점 중에 특히 넓은 지역을 동시에 관측할 수 있다는 점은 호수와 같이 수면적이 넓은 지역의 수질을 관측하고자 할 때 매우 유용하게 사용되고 있어 Jerry and Charles (1990), Carpenter and Carpenter(1983), Tommy *et al.*(1986), Harlan and Carolyn(1984) 등의 선행연구가 수행되었으며, 국내에서도 위성영상을 이용한 수질분포도 및 영양상태도 작성에 대한 연구가 진행되고 있다(김광은 등, 1996; 김태근 등, 1996; 조명희 등, 1999; 김태근 2001).

일반적으로 호수의 수질을 평가할 때에는 몇 개의 대표지점을 선정하여 각 지점에서 측정된 자료를 토대로 이루어지고 있지만, 광역수계의 수질은 시간과 장소에 따라 다양하게 변화하기 때문에 기존의 점채취(point sampling) 방법으로는 오염물질의 분포상태와 이동을 계속적으로 관찰하기가 어렵다. 그러나 인공위성을 이용한 원격탐사기법은 광역수계에 대한 동시관측과 동일지역의 반복관측이 가능하기 때문에 수역의 공간적인 오염물질 분포 및 이동상태를 파악할 수 있어 기존의 시료채취 방법에 비해 보다 종합적인 분석을 통하여 수질을 평가할 수 있다.

우리나라는 하절기에 편중된 강우특성과 매년 증가하는 각종 용수이용량을 충족시키기 위해 댐을 건설하여 수자원을 확보하고 있으나 댐수역 오염원 제거 등의 사전조치와 유입부하량을 저감시킬 수 있는 사후관리를 하지 못하여 댐수 초기부터 호수의 수질이 악화되는 사례가 빈번하게 발생되고 있다. 특히 호수와 같은 정체수역의 수질오염 현상 중 가장 큰 문제점은 호수의 부영양화에 의한 조류(algae)의 이

상증식으로 수자원으로서의 가치를 떨어뜨리는 것으로서, 부영양화를 관리하기 위해서는 부영양화와 관련된 수질인자의 농도와 분포를 파악하여 현재의 부영양화 정도를 평가하는 것이 선행되어야 한다. 조류생체량의 지표인 클로로필 a는 광학적인 반사와 흡수특성이 뚜렷하여 원격탐사를 이용한 조류의 농도 분포도 작성에 많이 활용되고 있다.

호수의 부영양화 진행정도를 나타내는 영양상태(trophic state)는 영양염류 유입량, 호수의 위치와 지형, 조류의 생산성 및 수리학적 체류시간 등 호수마다 환경인자의 특성이 각각 다르기 때문에 이를 명확하게 구분하기가 곤란하다. 또한 호수 내에서도 이러한 인자들의 부분적인 영향으로 지역마다 영양상태가 다르게 나타나는 경우가 많아 대상 호수의 전반적인 영양상태를 파악하는 것은 매우 힘든 일이다. 그러나 위성 원격탐사기법을 이용하면 대상 수역의 영양상태를 전체적으로 파악할 수 있고, 주기적으로 위성데이터를 구입하면 시간에 따른 부영양화의 진행상태도 파악할 수 있어 수질인자들의 상호작용을 고려하여 구체적인 부영양화 방지대책 수립에 유용하게 사용되고 있어 광역수계의 효과적인 수질평가를 위해서는 원격탐사의 도입이 요구된다.

본 연구는 2001년부터 담수가 시작된 용담호를 대상으로 위성데이터와 수질 실측치간의 상관관계 및 최적 밴드를 파악하고, 최종적으로 유도된 회귀모델을 위성영상에 적용시켜 실측되지 않은 지역을 포함한 호수 전역의 영양상태 분포도를 작성하여 원격탐사기법으로 용담호의 수질을 평가하기 위해 수행되었다.

II. 연구방법

1. 연구대상 지역

본 연구대상 지역은 금강 상류에 건설된 용담호로서, 용담호는 전주권의 안정적인 생활용수 공급과 홍수조절 및 에너지 공급을 위한 전력자원의 개발을 목적으로 건설된 용담댐에 의해 조성되었으며, 용담호는 2001년도 상반기부터 담수가 시작되었다.

용담호 유역은 그림 1과 같이 전북 진안군의 8개

하였으며 그 위치를 그림 2에 나타내었다. 조사시기 별로 시료 채취지점의 수가 다른 이유는 9월에 비해 10월의 수위가 낮아져 일부 만입부에서 시료를 채취할 수 없었기 때문이며, 시료 채취지점의 선정은 호수 분류 구간 중 유허거리에 따라 수질 변화가 예상되는 지점과 지천이 유입되는 만입부 및 본류와 만입부가 합류되는 지점을 대상으로 하였다.

조사항목은 부영양화와 관련된 수질인자 중 수온, 탁도, 투명도, 클로로필 a 등 8개 항목을 측정하였으나 본 연구에서는 클로로필 a 농도만을 사용하였다.

III. 연구결과

1. 클로로필 a의 회귀모델 유도

원격탐사를 이용하여 영양상태를 파악하기 위해서는 위성데이터와 수질실측치간의 상관성이 높아야 자료로서 가치가 있다. 본 연구에서는 용담호에서 조사한 수질자료와 위성데이터로부터 클로로필 a에 대한 회귀모델을 유도하기 위해 클로로필 a와 LANDSAT 영상의 각 밴드별 DN 값의 상관관계를 분석하여 표 1에 나타내었다.

LANDSAT 7호의 ETM+ 센서는 7개의 밴드를 가지고 있으나 본 연구에서는 기존 선행 연구결과들로부터 많이 사용되었던 가시광선 파장대인 밴드 1, 2, 3과 근적외선 파장인 밴드 4만을 사용하였고, 또한 한의정 등(1998)이 대청호에서 클로로필과 좋은 상관관계를 가지고 있다고 발표한 밴드 2/밴드 1을 추가하여 분석하였으며 DN값의 추출은 3×3 픽셀에서 평균값을 취하였다.

표 1에서와 같이 클로로필 a와 상관성이 높은 밴드는 시기별로 약간 차이를 보이고 있다. 9월에는 가시광선 밴드인 밴드 1, 2, 3과 근적외선 밴드인 밴드 4에서 모두 상관계수 0.9 이상의 높은 상관성을 보인

반면, 10월에는 0.7 정도의 상관계수를 얻을 수 있었다. 이러한 이유는 9월 영상의 경우 구름이 거의 없는 맑은 기상조건에서 촬영되어 대기의 조건이 양호하였던 반면에 10월 영상은 구름의 영향으로 산란율이 증가하였고, 또한 측정된 클로로필 a 농도 역시 9월에는 농도분포가 5.4~306.9 mg/m³로 다양하게 분포된 반면 10월에는 10.9~20.7 mg/m³로 클로로필 a 농도가 거의 균일하게 분포되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 10월 영상자료와 수질자료의 상관성 분석을 할 때에는 구름의 영향이 큰 지점과 DN 값과 클로로필 a 농도와의 관계가 가장 좋지 않은 지점은 제외하고 상관계수를 산정하였다.

수질과 ETM+ 데이터의 관계는 클로로필 농도가 증가하면 모든 밴드에서 DN 값이 증가하였으며, 9월의 경우 4밴드의 상관계수가 0.966으로 가장 높았다. 근적외선 파장에 해당하는 4밴드의 반사는 조류의 입자수와 밀접한 관계가 있는데 조류량이 많으면 모든 파장에서 반사도가 증가하고, 클로로필 농도가 높을 때 반사도의 변화가 가장 심한 파장대이다. 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 특성이 있으며, 9월에는 호수 유입부 지점에서 조류입자가 많이 관찰되어 이들에 의한 산란이 4밴드의 상관성을 높게 한 것으로 판단된다. Yosef and Anatoly(1995)는 클로로필 농도가 20 mg/m³ 이상일 때는 조류입자에 의한 산란이 근적외선 영역에서의 반사에 주된 원인이라고 하였다.

9월과 10월의 수질 및 영상자료를 이용하여 시기별 클로로필 a에 대한 회귀식을 유도할 때 2회의 상관계수를 평균한 값 중 가장 높은 수치를 보인 밴드 2와 밴드 4를 선정하여 회귀분석 하였다. 9월 자료로부터 유도한 클로로필 a의 회귀모델은 식 1과 같이

표 1. 클로로필 a 농도와 밴드별 DN값의 상관계수

항목 \ 밴드	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 2/Band 1	조사일자
클로로필 a	0.917	0.926	0.978	0.966	0.890	2001. 9. 16
	0.718	0.741	0.678	0.753	0.719	2001. 10. 18

0.95의 매우 높은 상관결정계수를 얻을 수 있었다.

$$\text{클로로필 } a(\text{mg/m}^3) = -324.2 + 3.617(\text{BA}2) + 16.996(\text{BA}4) \quad (R^2=0.95) \quad (1)$$

또한 10월 영상에서도 식 2와 같은 클로로필 a에 대한 회귀모델을 얻을 수 있었지만 상관결정계수가 0.55로 9월에 비하여 큰 폭으로 낮아지는 결과를 얻었다. 이러한 이유는 전술한 바와 같이 10월에는 구름의 영향과 클로로필 a 농도의 균일한 분포로 각 밴드별 상관계수가 낮아진 결과이다.

$$\text{클로로필 } a(\text{mg/m}^3) = -32.9 + 0.474(\text{BA}2) + 1.974(\text{BA}4) \quad (R^2=0.55) \quad (2)$$

2. 영상자료를 이용한 영양상태도 작성

호수의 영양상태를 평가하는 방법에는 부영양화와 관련된 수질항목에 의한 방법과 영양상태지수에 의한 방법이 있다. 부영양화와 관련된 수질항목에 의한 평가방법은 측정이 간단하고, 수체의 여러 특성을 종합적으로 고려할 수 있다는 장점이 있는 반면, 수질인자간에 영양상태의 평가 결과가 다르게 나타날 경우 영양상태의 정확한 평가가 어렵다는 단점이 있다. 그러나 영양상태지수에 의한 평가방법은 수질항목에 의한 평가방법에 비하여 간단하면서도 수질의 제반 특성을 종합적으로 고려할 수 있으며, 부영양화의 발생 여부 및 진행 정도를 0에서 100 사이의 연속적인 수치로 표시하여 호수의 영양상태를 구체적으로 표현할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 영양상태지수에 의한 평가방법을 이용하여 용담호의 영양상태 분포도를 작성하고 호수 전역의 영양상태를 평가하였다.

호수의 영양상태를 평가하는 것은 영양염류 유입량, 호수의 위치와 지형, 조류의 생산성 및 수리학적 체류시간 등 여러 환경인자의 특성이 각각 다르기 때문에 이를 명확하게 구분하기가 곤란하다. 또한 호수 내에서도 이러한 인자들의 부분적인 영향으로 지역마다 영양상태가 다르게 나타나는 경우가 많아 대상 호수의 전반적인 영양상태를 파악하기가 매우 어렵다. 그러나 위성 원격탐사기법을 이용하면 넓은 지역에 대한 동시 관측과 동일 지역의 반복 관측이 가능

표 2. 클로로필 a 농도와 Aizaki의 TSI

영양상태 수질항목	빈영양상태	중영양상태	부영양상태
클로로필 a (mg/m ³)	0~4.10	4.11~10.25	> 10.25

하기 때문에 호수 전역의 영양상태를 알 수 있고, 주기적으로 위성데이터를 구입하면 시간에 따른 부영양화의 진행상태도 파악할 수 있게 된다.

영양상태지수를 이용하여 영양상태 분포도를 작성하기 위해서는 먼저 영양상태지수 산정에 필요한 수질인자를 선정해야 한다. 본 연구에서는 영양상태 분류의 정확도를 높이기 위하여 영양상태지수 산정에 사용되는 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 연구에서는 투명도를 기준으로 한 Carlson(1977)의 영양상태지수보다 클로로필 a를 기준으로 한 Aizaki *et al.*(1981)의 영양상태지수가 보다 적합할 것으로 판단되어 Aizaki 등이 제시한 영양상태지수와 등급을 적용하였다. Aizaki 등이 제시한 등급을 보면 클로로필 a가 4.1 mg/m³ 미만인 경우에는 빈영양상태, 4.11~10.25 mg/m³ 중영양상태, 그리고 10.25 mg/m³를 초과하면 부영양상태로 구분되며, 이를 표 2에 정리하였다.

영양상태 분포도 작성은 식 1과 식 2의 클로로필 a 회귀모델을 위성영상에 적용시켜 각 픽셀에서의 농도를 계산하고 클로로필 a 농도에 해당하는 영양상태 지수를 산정하여 등급별로 다르게 색상 처리하였다.

클로로필 a로 분류한 2001년 9월과 10월의 용담호 영양상태 분포도는 그림 3 및 그림 4와 같다. 위성영상으로 표현한 용담호의 영양상태도를 보면 2001년 9월에는 호수 본류구간 중 댐 앞과 전주권 상수원수 취수탑 방향의 일부 수역은 빈영양~중영양상태로 분포되어 있지만 호수 유입부로 향할수록 대부분 부영양상태를 보이고 있다. 2001년 10월에는 댐 앞 지점에서 극히 일부수역이 중영양상태를 보이

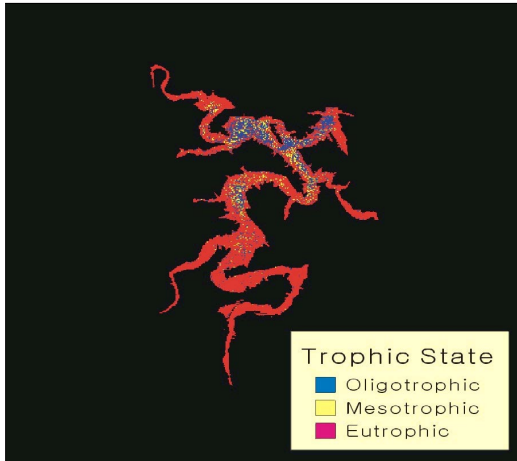


그림 3. 용담호의 9월 영양상태 분포도

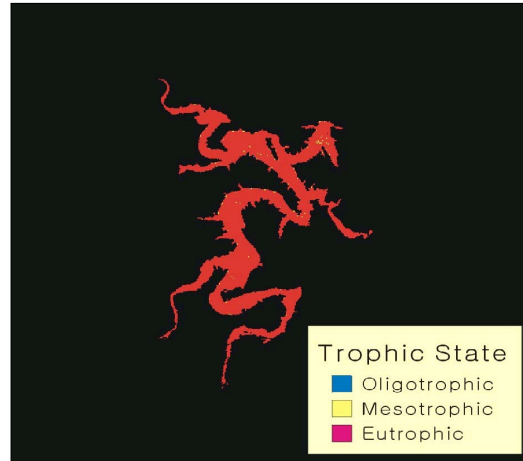


그림 4. 용담호의 10월 영양상태 분포도

고 있지만 전체적으로 보면 대부분 부영양상태를 나타내고 있다. 이렇게 9월과 10월의 영양상태가 다르게 나타난 것은 9월에는 오랜 가뭄으로 수질이 악화된 금강 본류의 영향과 유역내 환경기초시설의 미비로 미처리 하수가 유입되는 상류부에서 조류의 성장이 급속히 진행되어 호수 유입부에서 클로로필 a 농도가 높게 나타났으며, 10월에는 수온이 낮아져 조류의 성장이 저하되어 유입부 수역의 클로로필 a 농도는 낮아지고 조류의 유하로 인하여 댐 부근에서는 9월에 비하여 클로로필 a 농도가 증가된 것으로 판단된다.

또한 만입부 지점은 물의 정체시간이 길고 교환율이 낮아 호수 본류구간에 비하여 조류의 증식속도가 빠르기 때문에 대부분의 만입부에서는 9월과 10월 모두 부영양상태로 나타났다. 특히 이들 만입부 수역은 용담호가 조성되기 전에는 주로 농경지로 이용되던 지역으로서 그간 농경지 토양에 축적되었던 영양염류가 담수가 시작되면서 용출이 이루어져 조류의 성장을 촉진시킨 것으로 사료된다.

2001년 10월 현재까지는 용담호 내에 대형 만입부가 3군데 조성되어 있지만 향후 용담호의 수위가 상시만수위에 도달하게 되면 2개의 만입부가 추가로 형성된다. 5개의 대형 만입부 중 4개는 주자천, 정자천, 진안천 및 구량천이 유입되는 지점으로서 용담호의 수질보호를 위해서는 이들 지역의 수질관리에 많

은 관심을 기울여야 할 것으로 판단된다.

IV. 결론

지상수역의 수질정보를 공간적으로 제공해 줄 수 있는 위성 원격탐사기법으로 클로로필 a와 위성데이터의 상관성을 파악하고 용담호 전역의 영양상태도를 작성하여 공간분석을 수행하였다.

본 연구는 2001년 9월 16일과 2001년 10월 18일자 LANDSAT 7호의 ETM+ 데이터와 위성 통과일자에 용담호에서 측정된 클로로필 a 농도로부터 회귀모형을 유도하였고, 모형을 위성영상에 적용시켜 영양상태도를 작성하였으며, 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 용담호에서 LANDSAT ETM+ 영상의 밴드 2 및 밴드 4의 DN 값과 클로로필 a 농도로부터 다음과 같은 회귀모형을 유도하였다.

$$\text{클로로필 a(mg/m}^3\text{)} = -324.2 + 3.617(\text{BA}2) + 16.996(\text{BA}4) \quad (R^2=0.95)$$

$$\text{클로로필 a(mg/m}^3\text{)} = -32.9 + 0.474(\text{BA}2) + 1.974(\text{BA}4) \quad (R^2=0.55)$$

2. 유도한 회귀모형의 상관결정계수(R^2)는 2001년 9월에 0.95로 매우 높았으나 2001년 10월에는 0.55로 낮아졌는데 이는 구름의 영향과 클로로필 a 농도의 균일성에 기인한 것으로 판단된다.

3. Aizaki 등의 영양상태지수(ATSI)와 클로로필 a를 이용하여 작성한 영양상태 분포도에서는 9월의 경우 댐 앞 일부를 제외하고 대부분 부영양상태였으나, 10월에는 9월보다 전체적으로 낮은 농도이기는 하지만 용담호 전역이 부영양상태로 분류되었다.

참고문헌

- Kim Kwang-Eun, Kim Tae-Keun, 1996, Trophic State Mapping of Daechung Reservoir by Neural Network Classification of Landsat TM Images, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 12(3), 271-282.
- 김태근, 김태승, 조기성, 김환기, 1996, 클로로필의 반사특성 분석과 원격탐측을 이용한 대청호의 영양상태 평가, *지형공간정보*, 4(2), 35-45.
- 김태근, 2001, 원격탐사를 이용한 금강수계 대형 농업 저수지의 영양상태 평가, *지형공간정보*, 9(1), 19-25.
- 조명희, 권봉겸, 부기동, 1999, GIS와 위성영상을 이용한 수질 오염인자의 공간 변화 분석, *한국지리정보학회지*, 2(3), 60-70.
- 한의정, 김태근, 정동환, 천세억, 김신조, 유순주, 황종연, 김태승, 김명희, 1998, LANDSAT TM 영상자료를 이용한 대청호의 영양상태 평가, *환경영향평가학회지*, 7(1), 81-91.
- Aizaki, et al., 1981, 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*, 23, 13-31.
- Carlson R. E., 1977, A Trophic State Index for Lakes, *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369.
- D. J. Carpenter and S. M. Carpenter, 1983, Modeling Inland Water Quality Using Landsat Data, *Remote Sensing of Environment*, 13, 345-352.
- Harlan L. Mckim, Carolyn J. Merry, 1984, Water Quality Monitoring Using an Airborne Spectroradiometer", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50(3), 353-360.
- Jerry C. Ritchie, Charles M. Cooper and Frank R. Schiebe, 1990, The Relationship of MSS and TM Digital Data with Suspended Sediments, Chlorophyll and Temperature in Moon Lake, Mississippi, *Remote Sensing of Environment*, 33, 137-148.
- Serwan M. J. Baban, 1993, Detecting Water Quality Parameters in the Norfolk Broads, U.K., Using Landsat Imagery, *Int. J. Remote Sensing*, 14(7), 1247-1267.
- Tommy Lindell, Bert Karlsson, Mats Rosengren, Tom Alf ldi, 1986, A Further Development of the Chromaticity Technique for Satellite Mapping of Suspended Sediment Load, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(9), 1521-1529.
- Yosef Z. Yacobi, Anatoly Gitelson, and Meir Mayo, 1995, 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*, 17(11), 2155-2173.