

원격탐사 자료에 의한 수질평가기법에 관한 연구

장동호* · 지광훈** · 이현영***

A Study of Assessment Techniques of Water Quality Using Remotely Sensed Data

Dong-Ho Jang* · Kwang-Hoon Chi** · Hyoun-Young Lee***

요약 : 산업화와 더불어 심각해지고 있는 수질오염 문제를 해결하기 위해서는 여러 가지 수질관리 방안이 요구된다. 수질오염이 과거에는 국지적이었으나 점차 광범한 지역으로 확장됨에 따라 지속적인 수질 모니터링에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 위성영상을 사용한 원격탐사 기법으로 수역의 수질환경 인자를 추출하고자 한다. 사용된 영상은 Landsat TM이며, 연구지역은 한강하류 지역이다. 수질분석 인자는 클로로필-a, 부유물질, 투명도 등을 선정하였으며, 수면분광반사율의 특징 및 수질인자별 처리기법을 개발하는데 목적을 두었다. 분광특성 분석결과를 요약하면, 첫 번째 스펙트럼 반사율 분석결과 클로로필-a의 농도는 0.4 ~ 0.5 μ m 파장대역에서 낮은 반사치 경향을 보이며, 녹색파장대인 0.57 μ m 부근에서 반사율이 높아진다. 두 번째 부유물질의 반사도는 농도가 증가할수록 0.8 μ m 부근에서 상대적으로 낮은 반사율이 나타난다. 마지막으로 투명도가 낮은 수면은 0.55 μ m에서 높은 반사율 경향을 보인다. Landsat TM 영상을 이용하여 주성분분석 및 비연산처리를 실시하여 수질분석을 시도한 결과를 보면 클로로필-a와 투명도는 제1 주성분 영상 및 제2 주성분 영상에서 현장 실측자료와 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 부유물질은 밴드 2와 밴드 4의 비연산처리를 통하여 분포도를 작성할 수 있었다. 이상의 결과들은 계절적 및 시간적 변화에 따라 파장대역이 달라질 수 있다. 그러므로 위성자료를 이용하여 보다 정확한 수질환경 인자를 추출하기 위해서는 현장실측 및 수역의 분광반사 특성을 지속적으로 조사하여야 한다.

주요어 : 분광반사율, 클로로필-a, 부유물질, 투명도, 주성분분석, 비연산처리

Abstract : Remotely Sensed data is regarded as a potentially effective dataset for evaluating water quality and for detecting environmental change of water bodies. In this study, we measured the spectral reflectance which was used to analyze water pollution using multi-spectral image of remotely sensed data. We examined the possibility of extraction of water quality factors in water bodies using high resolution remote sensing data such as Landsat TM. We also tried to extract environmental factors related with water pollution such as chlorophyll-a, suspended sediments and transparency, and to develop the process technique and the spectral feature of reflectance. The results were summarized as follows: First, chlorophyll-a represented high around the 0.57 μ m of green spectral band. Second, the reflectance of suspended sediments was relatively low at 0.8 μ m, but transparency represented high at 0.55 μ m. Finally, when we carried out PCA(principal component analysis), chlorophyll-a and transparency had contributed at PC 1 and PC 2 which was similar to the ground data. Suspended sediments could have a distribution image after carrying out ratio of B2 to B4. Because results from this type of research vary with season and time of day, it is necessary to monitor continuously ground truth as well as radiance feature of reflectance in order to determine accurately the environmental factors of water quality.

Key words : spectral reflectance, chlorophyll-a, suspended sediments, transparency, PCA, Rationing

1. 서론

1) 연구배경 및 연구목적

오늘날 우리 나라의 하천수의 오염은 큰 사회

적 문제로 제기되고 있으며, 특히 인근지역으로부터의 오염물질 유입에 의한 담수호의 부영양화 추세는 안정적인 용수공급 및 식수원 확보에 커다란 위협을 주고 있다. 과거의 수질오염은 국지적인 현상이었으나 최근 들어 그 범위가 확장됨

* 건국대학교 지리학과 박사과정(Graduate Student in Ph. D. program, Department of Geography, Konkuk University)
** 한국자원연구소 지구환경부 부장(Director, Earth Environment Research Division, Korea Institute of Geology, Mining & Materials)
*** 건국대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Konkuk University)

에 따라 지속적인 수질 모니터링에 어려움이 따르게 되었다. 즉, 수질오염 문제를 분석하는 데 있어서 기존의 소수의 조사지점에 의존하는 것은 장비, 인력 등 많은 경비가 소요될 뿐 아니라 광범위한 오염물질의 분포상태와 그 이동을 지속적으로 관측하기가 어렵고, 광역적인 오염농도 분포에 대한 동시성과 반복성의 측정이 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 대안으로서 위성영상에 의한 원격탐사 기법을 제시하고자 한다. 원격탐사 자료의 장점인 동시성, 주기성, 광역성 및 경제성을 이용하여 보다 신속하고 광범위하게 그리고 경제적인 수역의 수질환경 인자를 추출하고자 한다.

원격탐사 기법은 지표상의 물질이 구성원자나 분자구조에 따라 상이한 태양에너지의 흡수·반사량이나, 물질자체의 에너지 방사량을 위성에 탑재된 센서에서 감지하여 대상물체나 현상에 대한 정보를 제공한다. 이러한 정보는 화소단위의 디지털 영상으로 지상에 전송되어 수역의 오염인자 분포가 불규칙하다 할지라도 특성이 뚜렷한 수질인자에 대해서는 감지할 수 있고, 광역의 수질분포도를 작성할 수 있어 재래식 방법보다는 수질 평가에 있어서 보다 종합적인 평가를 할 수 있다. 또한 수질오염지역 및 수역 전역을 동시에 관측할 수 있고, 오염도의 정량적 분석과 지속적 감시가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 위성영상 중비용이 저렴하고 수질분석에 효과적인 Landsat TM 영상을 이용하여 하천 및 담수호 등의 수질 분석 기법을 연구하고자 한다. 수질인자는 수질오염 분석에 주로 언급되는 수질 항목 중 클로로필-a, 부유물질, 투명도 등의 수질인자를 선정하여 자료의 정량적 해석을 통해 수질오염 분석을 수행하였다.

2) 연구동향 및 방법

원격탐사에 의한 수질오염 측정 연구는 미국, 일본 등에서 조심스럽게 시도되어 왔으며, 초기에는 주로 영상해석을 통한 오염물질 분석에 국한되었다. 그러나 최근에 고분해능(高分解能) 원격탐사자료를 얻을 수 있게 됨에 따라 수질오염 인자 추출을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 안

岡善文·宮崎忠國(1982)은 수면 분광반사 휘도를 이용하여 수면분광 특성을 분석하고, Landsat MSS 자료와 현상수질 측정자료와의 상관관계 분석하여 호소유역의 수질오염도를 작성하였다. Verdin(1985)은 호소유역의 식물성 플랑크톤의 증가에 따른 부영양화를 위성영상을 통하여 분석하여 수질오염도를 작성하였다. Bagheri와 Dios(1990)은 TM 밴드 자료를 다중회귀 분석하여 New Jersey 연안해역의 부영양화를 평가하였으며, Reddy(1993)는 실측치와 MSS 밴드의 다중회귀 분석에 의해 연안해역의 부유물질을 정량적으로 해석할 수 있는 관계식을 제시하였다. Mulhearn(1995)은 MSS 자료를 이용하여 연안해역에서의 투명도를 정량적으로 해석하였으며, Huh et al(1996)은 SPOT 자료를 이용하여 연안해역의 부유물질의 분포를 다중채널센서와 비교하였다.

국내에서의 수질오염 연구는 양인태·김홍규(1994) 등에 의해 시작되었으며 그들은 Landsat TM 자료를 이용하여 수역의 환경변화를 분석하였는데, 수질인자 중 수온, 부유물질, 수심 등을 현장실측자료와 회귀분석을 통하여 하천수계의 환경인자를 추출하였다. 김광은 등(1997)은 열적외선 원격탐사 자료를 이용하여 해양에 미치는 대기의 영향을 효율적으로 제거할 수 있는 기법을 제안하였으며, 제주해역을 사례지역으로 위성영상과 해수면 온도 실측치와의 검증결과 대기보정을 위한 효율적 분석이 가능하다고 하였다. 장동호 등(1997, 1998)은 Airborne MSS 자료와 수면의 분광반사특성 등을 이용하여 호소유역의 수질을 평가하는 등 대부분이 원격탐사 자료를 이용해 수질오염 문제를 광역적인 파악을 시도한 것들이다. 또한 대부분의 연구들이 현재 일부 수질 항목에 국한되어 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 수질오염 문제를 논함에 있어 주로 언급되는 수질 항목으로는 BOD, COD, 질소, 인, 클로로필-a 등이 있으며, 간접적으로 부유물이나 탁도, 온도 등도 측정대상이 된다. 그러나 현재의 분석 방법 및 인공위성 센서로는 BOD, COD, 질소, 인 등의 농도를 측정할 수 없기 때문에 센서의 과장대역 선정시 이에 대한 연구가 필요하다. 또한 위성영상을 이용한 수질분석 연구는 각 나라마다, 지역마다 상이한 결과를 얻을 수가 있다. 따라서

본 연구에서는 Landsat TM 자료로 측정이 가능한 클로로필-a, 부유물질, 투명도 등의 수질인자를 선정하여 자료의 정량적 해석을 통해 수질오염 분석을 수행하였다. 추후에 이러한 연구분석들은 인접국가들로부터의 오염물질 유입에 따른 국가간 환경오염분쟁이 발생할 경우에 근거자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 Landsat TM 자료를 이용하였으며 연구방법은 다음의 순으로 진행하였다. 첫째, 하천 유역에서 원격탐사 기법으로 정량적 분석이 가능한 클로로필-a, 부유물질, 투명도를 평가항목으로 선정한 후 수중분광 특성을 분석하기 위해 위성자료와 동시기의 현장수질 자료의 상관성을 검토하였다. 그리고 수중분광 특성에서 얻어진 자료를 위성자료에 적용하여 수질인자 평가 기법을 분석하였다. 분석방법으로는 밴드(Band) 비율 관계식을 이용한 비연산처리(Rationing) 및 주성분분석(PCA)을 수행하였다. 마지막으로 위성영상에서 분석된 수질평가 자료와 현장자료와의 상관성을 검토하고 회귀분석을 하여, 수질인자별 분포도를 작성하였다.

3) 연구지역 및 수질 자료

본 연구에서는 남한강과 북한강이 만나는 팔당호를 중심으로 하류지역인 김포 지역까지(북위 37° 23' 32" ~ 37° 43' 32", 동경 126° 48' 52" ~ 127° 28' 58")를 연구대상 지역으로 선정하였다(그림 1). 이 지역을 연구대상지역으로 설정한 이유는 남한강과 북한강이 서로 만나 다양한 수질분포를 나타내고 있는 지역이기 때문이다. 특히 팔당호 지역은 수도권의 대부분의 생활용수 및 농업용수를 공급하는 수원지로서 상류지역 대부분이 상수원 보호구역이다. 또한 남한강과 북한강 유역은 강수량의 지역적 차이와 수질오염원 분포의 차이가 크다. 따라서 주요 지류들이 만나는 팔당호 하류 지역에서는 수질의 변화가 심하기 때문이다.

현장수질 측정자료는 한강환경관리청, 인천지방환경청 및 한강수질검사소 수질측정치를 정리한 환경부 자료를 이용하였다(환경부, 1996). 총 26개 지점의 수질측정 자료를 이용하였으며, 그 중 한강수질검사소 측정 자료는 위성통과하는 날의 일 자료를 사용하였다. 나머지 자료는 월 자료로 위

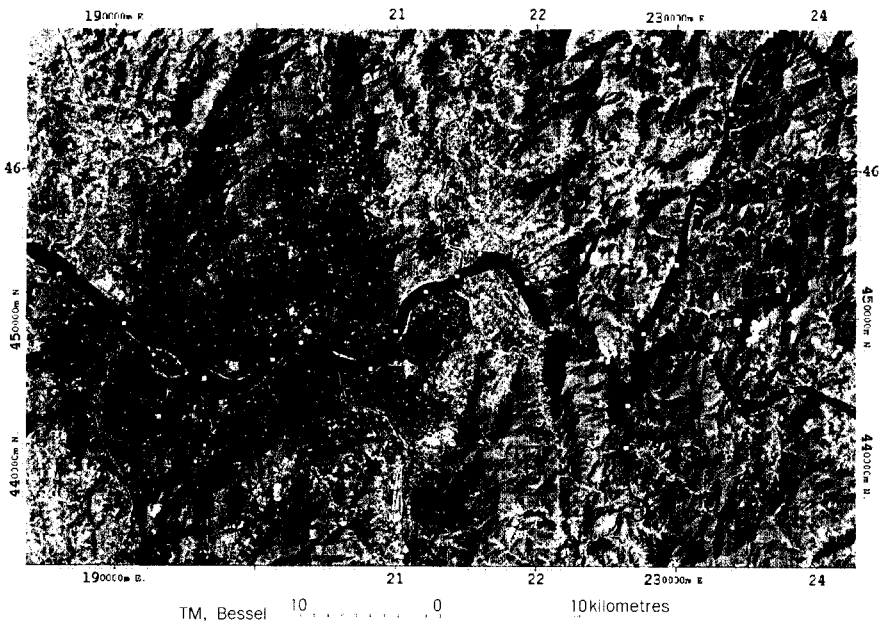


그림 1. 연구지역의 수질관측 지점 및 위치도(Landsat TM, 1996. 9. 1)

주: 백색 사각형으로 표시된 지점이 수질자료 채수 지점임.

성통과 날과 적어도 이들 안에 들어가는 자료만 사용하였다. 이것은 하천 유역에서 강수량 및 유량의 변화가 없다면 현장 수질 자료는 큰 변화가 없을 것으로 사료되어 연구에 이용하였다.

2. 수질평가를 위한 원격탐사 자료의 처리

1) 사용자료의 표준화 및 위성영상처리

본 연구에서는 표 1과 같이 1988년부터 1996년까지 총 7개의 Landsat TM 자료를 이용하였다. 또한 한강하류 유역의 수질환경 변화를 정량적·정성적으로 분석하기 위해서 상류지역의 강수량, 유량 및 유속의 변동자료도 함께 사용하였다. 또한 자료의 표준화를 위해 현장조사와 위성자료 분석을 동시에 수행하였다. 현장조사에서는 수중분광 측정을 실시하였고 밴드별 반사치를 계산하였다. 또한 현장수질 자료는 위성의 통과 시간과 일치하는 시점의 환경부 수질자료를 이용하여 수질평가 항목을 선정하였다.

본 연구의 위성처리 순서는 그림 2와 같다. 먼저 하천수질을 평가하기 위해 Landsat TM 자료를 기하학적 보정 및 대기보정 등 전처리를 실시하였다. 즉, 1996년 9월 1일 Landsat TM 영상을 축적 1 : 25,000 지형도에 Affine 변환식으로 좌표 변환하였고 그 이외의 영상은 1996년 영상에 Image to Image로 정합시켰다. 각 Landsat 영상의 RMS error는 0.5 pixel 이하이다. 인공위성 센서에 감지된 광량은 수역에 관한 정보와 대기에 의한 잡음으로 이루어지게 되며, 대기잡음을 제거하는 것은 수역에 관한 정보를 추출하는데 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 TM 자료의 영상확

득 시점의 태양고도와 수중광학측정에 의한 현장 실측값을 비교하여 대기보정을 실시하였다.

대기보정에 사용된 식은 다음과 같다(Pattiaratchi and Lavery, 1994).

$$L_T(\lambda) = L_A(\lambda) + L_W(\lambda) + L_R(\lambda) \quad (1)$$

여기서 $L_A(\lambda)$ 는 대기효과로 인한 복사휘도, $L_W(\lambda)$ 는 현장에서 실측된 각 파장별 수면 복사량이고, $L_R(\lambda)$ 은 레일리 산란을 의미한다.

유역과 수역의 대비가 확실한 TM Band 4를 사용하여 전처리된 자료를 한강 본류 및 지류를 중심으로 마스크처리를 하였다. 그리고 주로 식물성 플랑크톤, 적조, 하천수 배출, 부유물질 이동 등 수역 환경 인자 분석에 주로 사용되는 Band 1, Band 2, Band 3, Band 4, Band 5, Band 7 등의 분광특성을 파악하여 수질오염 분석에 적당한 가시·근적외선 파장대를 선정하였다. TM Band는 Band 2, Band 3, Band 4, Band 5를 비연산처리 및 주성분 분석으로 수질환경변화의 분석을 시도하였다. 이를 다시 Density Slice 한 후 현장 실측자료와 회귀분석하여 한강 유역의 수질환경 평가 기법을 추출하였다.

위성영상과 현장실측 지점과의 상관성 검토시, 위성영상의 DN 값은 현장실측 지점을 중심으로 3×3 격자의 DN 값을 평균하여 사용하였다. 주성분 분석은 원격탐사에 있어 자료선별(data reduction), 잡음분리(noise separation), 변화지역 추출(change detection) 등에 자주 활용되는 다중영상강조처리 기법이다(Lillesand et al., 1994). 그 기본 원리는 K-features(또는 밴드)로 구성된 원래 자료의 최대분산방향과 최소분산방향에 일치되도록 원좌표축을 이동, 회전시키고, 자료의 평균값을 새로운 좌표축의 원점으로 하여 원래의 자료를 새로운 K차원의 자료로 변환, 밴드간의 공분산을 극대화시키는 방법이다.

수중광학 측정에서 얻어진 밴드별 반사치는 여섯 개 밴드에서 얻어진 반사치 경향의 통계적 분석이 요구된다. 각 조사지점에서 얻어진 파장별 반사치 값은 주성분 분석되어 여섯 개 밴드(Landsat TM Band 1, Band 2, Band 3, Band 4,

표 1. 사용된 위성주사 일시 및 조고

Acquisition Date	Platform	Sensor	Acquisition Time
1988. 09. 27	Landsat-5	TM	10 : 36
1991. 05. 31	Landsat-5	TM	10 : 34
1991. 10. 22	Landsat-5	TM	10 : 32
1992. 06. 02	Landsat-5	TM	10 : 34
1999. 09. 22	Landsat-5	TM	10 : 33
1994. 09. 12	Landsat-5	TM	10 : 34
1996. 09. 01	Landsat-5	TM	10 : 34

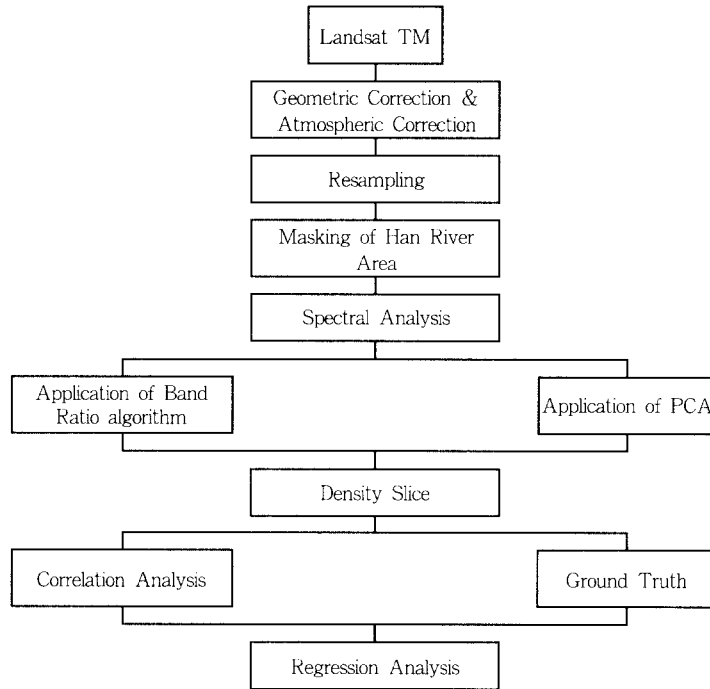


그림 2. 연구의 자료처리 흐름도

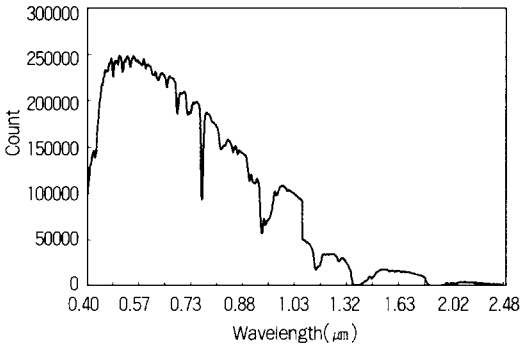
Band 5, Band 7)에 의한 주성분 분석 결과가 해석되었고, 주성분 분석의 제1~제3 주성분 자료를 현장에서 실측한 클로로필-a, 투명도, 부유물질 등과 상관관계를 내어 비교함으로써 각 성분에 의한 수질평가 항목의 정량적인 해석을 위한 방법을 제시하였다.

2) Spectroradiometer 측정에 따른 분광 반사도 분석

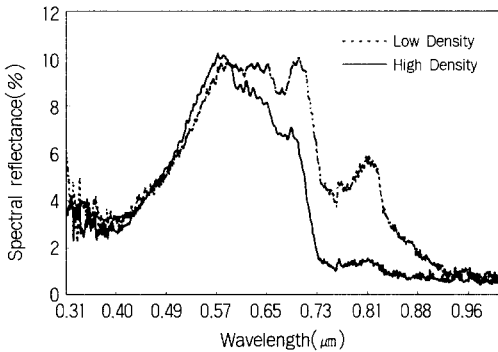
수역에서의 분광반사도를 측정하는데 사용된 spectroradiometer는 0.31~2.50 μm 파장역에 875개의 채널을 가진 미국 GER(Geophysical Environmental Research)사의 SFOV(Single Field of View)이다. 먼저 Barium sulfate로 도포된 약 25cm \times 25cm 크기의 백색 판에서 분광반사도를 측정할 태양으로부터 입사되는 광에너지 양을 기준으로, 이에 대한 수역에서 반사되는 에너지의 양을 백분율로 나타내어 분석에 이용하였다. 일반적으로 위성에서 감지하는 신호는 태양광이 지표면에 도달하기 전에

대기중의 존재하는 H₂O, O₃, O₂, CO₂, N₂O, CH₄, CO, N₂ 등의 흡수기체나 에어로졸 등에 의해 흡수 또는 산란되거나 지표면에서 반사되므로 특히 가시광선 역에서는 대기중에 이에 대한 고려가 반드시 이루어져야 한다.

본 연구지역의 수면에 도달하는 태양광의 스펙트럼은 0.3~2.0 μm 이며, 이 중에서 0.4~0.7 μm 의 가시광 영역이 전체 복사량의 약 50% 정도이고, 특히 녹색 파장인 0.5 μm 부근에서 스펙트럼 값이 제일 높게 나타났다(그림 3). 수역의 분광반사율 곡선은 주로 유량, 유속 및 클로로필, 부유물질, 탁도 등의 농도에 따라 분광반사 특성이 다르다. Braude(1995)에 의하면 클로로필과 용존유기물의 농도가 높은 경우 반사율은 상대적으로 낮아지고, 부유물질의 농도가 높으면 파장대역의 반사율이 높고, 특히 0.55 μm 부근에서 반사율이 최고 값을 가진다. 본 연구지역에서도 수질인자별 분광반사도 분석결과 클로로필-a의 농도는 0.4~0.5 μm 파장대역에서 낮은 반사치 경향을 보이다가 농도가 증가할수록 녹색파장대역인 0.57 μm 부근에서 반사



(a) 백색판에서의 태양광 스펙트럼 분포



(b) 수면 스펙트럼 반사 특징

그림 3. 태양광 및 수면에서의 분광반사도 특징

율이 높아진다. 그러나 전체적인 반사율은 클로로필-a 농도가 증가할수록 낮아지는 경향이 있다 (Jang *et al.*, 1999).

부유물질의 반사도를 농도가 낮은 수면(30mg/l 이하)과 높은 수면(50mg/l 이상)을 비교하여 분석하였는데, 현장 수면에 대한 스펙트럼 측정은 위성통과 시간과 같은 오전 10~12시 사이에 총 3회에 걸쳐 실시하였다. 스펙트럼의 반사율 측정자료는 평균치를 사용하였으며, 시료는 현장에서 자동 측정장비를 이용하여 측정하였다.

스펙트럼 분석 결과 부유물질의 농도가 증가할수록 0.55μm 파장대에서는 반사율이 높아지지만, 0.8μm 파장대에서는 상대적으로 낮은 반사율을 나타낸다. 이 영역은 식물에 강한 반사특성을 가지고 있어 식물이나 농업분야에서 유용하게 활용되고, 물에서 흡수가 강하므로 물과 육지를 구분하는 데에도 많이 사용된다. 투명도는 수중 부유물

질이나 클로로필 등과 같은 수질인자들의 농도에 따라 결정되는데, 본 연구에서는 인위적으로 탁도의 농도를 높여 맑은 물과의 반사도를 비교한 결과 0.55μm에서 높은 반사율을 보였다(그림 3).

3. 수질인자별 원격탐사 기법 평가

수질오염과 관련된 각종 수질인자와 원격탐사 자료와의 상관관계를 통한 위성자료의 수질평가 기법을 추출하기 위해 클로로필-a, 투명도, 부유물질 등에 대한 원격탐사자료와의 관련성 여부를 분석하였다. 이러한 수질오염 관련 항목들이 대부분 물의 색(color)이나 순도(purity)에 영향을 미칠 것으로 판단되므로 원격탐사자료에서 어느 정도 특징적으로 나타날 것으로 예측된다.

1) 클로로필-a

일반적으로 클로로필이 많은 경우 원래의 물은 파란색 계통으로 나타나지만 위성영상에서는 초록색이 강하다. 따라서 초록색에 해당하는 밴드와 파란색에 해당하는 밴드와의 비로서 클로로필의 분포패턴을 분석한다. 본 연구에서도 Band 3과 Band 1의 비율을 구하여 현지실측자료와 스페어만의 순위상관관계를 분석하였다. 그 결과 유의성이 낮았는데(결정계수: 0.4 미만), 이것은 Band 1의 경우 대기에서 산란이 매우 심하여 자료의 해상도가 떨어져 클로로필 분석에 많은 문제점이 따르기 때문이다(George and Hewitt, 1990). 따라서 본 연구에서는 주성분 분석기법을 채택하였다.

주성분 분석에 사용된 밴드는 열적외선 영역을 제외한 6개 밴드이며, 표 2는 Landsat TM 영상의 분석 결과이다. 제1 주성분(PC 1)과 제2 주성분(PC 2)의 분산 값의 합은 95% 이상으로 대부분의 변화정보가 PC1과 PC2에 포함된다. 1996년 주성분 분석에서도 변화정보가 PC 1이 56%, PC 2가 39%이다. PC 1은 적외선 파장대 영상과 비슷하며, 6개 Band로부터 정보를 고르게 가지고 왔다. 특히 Band 5는 더 많은 정보를 포함하고 있다(그림 4). PC 2는 가시광선대 파장대와 비슷

표 2. Landsat TM 자료를 이용한 주성분분석 결과

Principal Component Analysis(1992.9.22)				
Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	% Variance	Σ % Variance
1	882,3341	29,7041	68,81%	68,81%
2	344,0042	18,5473	26,83%	95,60%
3	45,1336	6,7182	3,52%	99,10%
4	5,6258	2,3719	0,44%	99,54%
5	4,3011	2,0739	0,34%	99,93%
6	0,8824	0,9394	0,07%	100%
Principal Component Analysis(1994.9.12)				
Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	% Variance	Σ % Variance
1	904,6517	30,0774	63,46%	63,46%
2	474,7355	21,7884	33,30%	96,8%
3	33,7397	5,8086	2,37%	99,2%
4	5,9789	2,4452	0,42%	99,5%
5	5,1890	2,2779	0,36%	99,9%
6	1,2624	1,1236	0,09%	100%
Principal Component Analysis(1996.9.1)				
Eigenchannel	Eigenvalue	Deviation	% Variance	Σ % Variance
1	1050,7238	32,4149	56,35%	56,35%
2	729,7971	27,0148	39,14%	95,49%
3	56,9388	7,5458	3,05%	98,54%
4	18,9726	4,3558	1,02%	99,56%
5	5,9616	2,4416	0,32%	99,88%
6	2,3176	1,5224	0,12%	100%

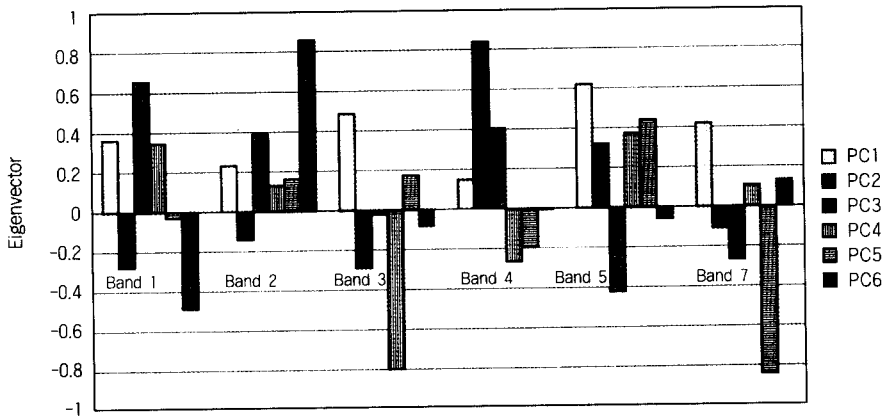


그림 4. 각 주성분 축에 대한 Eigenvector 값

하며, 하천유역의 총적지가 모식적으로 잘 나타난다. 전체적으로 PC 1의 역상이미지로 나타난다. PC 3은 PC 1과 PC 2 영상보다 노이즈가 심하며 자료의 압축이 심하게 나타난다. 수역의 변화 정보를 많이 함유하고 있어서 현장 실측자료와 비교·분석하였는데, 그 결과 염록소의 농도

가 증가할수록 PC 3의 DN도 증가하였으나 자료의 압축이 심하여 본 연구에서는 분석에서 제외시켰다. PC 4 영상은 PC 3보다 노이즈가 적으나 자료가 많이 압축된 영상이어서 도로망, 학교, 고층건물 등은 잘 인식되나 수역 정보는 많이 손실되어 있다.

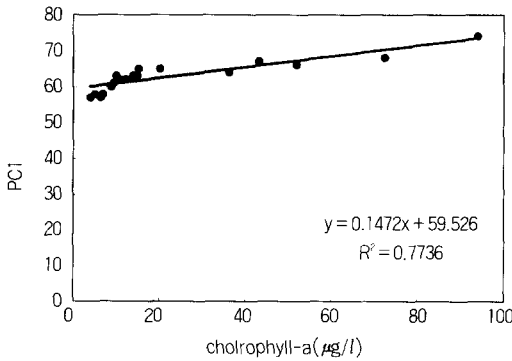


그림 5. 클로로필-a의 현장실측자료와 PC 1사이의 회귀분석도

PC 5~PC 6 영상은 지형 및 지질 분석에는 적합하지만 PC 4 영상과 마찬가지로 수역의 압축으로 노이즈가 심하여 본 연구에서는 수질분석에 사용하지 않고 PC 1 및 PC 2 영상을 이용하여 수질인자별로 위성자료와 현장자료의 상관관계를 구하고 회귀분석을 하였다. 그 결과 클로로필-a는 현장 실측자료와 비교하였을 때 주성분 분석된 영상 중 PC 1 영상에서 높은 상관관계를 나타냈으며, 특히 염록소의 농도가 증가할수록 PC 1의 DN 값도 증가하였다. 상관계수 r 은 피어슨 상관계수(Pearson coefficient)로 0.8795이고, 회귀식의 결정계수(R^2)는 0.7736, 기울기는 0.1472이다(그림 5). 상관계수를 t-분포 검정을 통해 유의성을 검사한 결과 95%의 신뢰수준에서 유의적이었다. 이들 변수간의 회귀방정식은 다음과 같다.

$$Y = 0.1472X + 59.526 \quad (2)$$

도출된 회귀식을 적용하여 한강하류 유역의 클로로필-a의 농도 분포도를 나타낸 것이 그림 6이다.

클로로필-a 경우, 1994년 PC 1 영상에서는 북한강보다는 남한강 유역의 농도가 상대적으로 높으며, 팔당댐 하류지역에서는 주요 지류들이 만나는 곳에서 농도가 높다. 특히 잠실부근과 여의도 주변 지역은 $25\mu\text{g/l}$ 이상으로 높게 나타난다. 그러나 북한강 유역은 $10\mu\text{g/l}$ 이하로 비교적 수질이 양호하며, 남한강 유역은 북한강 유역보다는 높지만 $10\sim 15\mu\text{g/l}$ 로 팔당 하류지역보다는 낮다. 1996년 영상의 농도 분포패턴은 1994년의 것과는 달리 오히려 정반대의 양상으로 북한강 유역이 상대적으로 농도가 높고, 팔당 하류에서는 하류지역으로 갈수록 점차 낮아지고, 연안에 가까워지면서 더욱 높아진다.

1994년보다는 1996년의 클로로필-a 농도가 10배 정도 높은데, 그 이유는 오염물질 발생량의 증가에도 원인이 있지만 강수량의 차에도 기인한다. 즉, 1996년에는 9월 1일 전날까지 연일 비가 내려($80\sim 90\text{mm}$) 상류지역으로부터 축산폐수와 생활폐수 등의 오염물질 부하량이 증가했기 때문으로 추정된다(환경부, 1996; 기상청, 1996)

2) 투명도

빛은 자연계에서 여러 가지 역할을 하지만 특히 일차생산의 에너지원은 전적으로 빛에 의존하고 있다. 이러한 빛 환경은 투명도로 간단히 파악할 수 있는데, 투명도는 수역에 유입되는 빛의 소광정도(消光程度)와 관계되어 수역에 포함된 구

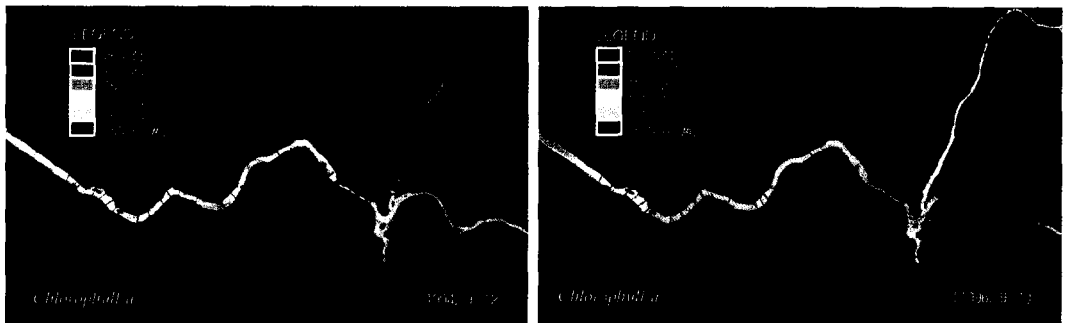


그림 6. PC 1 영상의 클로로필-a 분포도

성 성분 중 흡수의 영향이 큰 것일수록 투명도는 낮아진다. 따라서 수역에서의 투명도는 수질을 평가할 수 있는 평가항목으로 중요하다.

일반적으로 투명도는 수중 부유물질이나 클로로필 등의 수질인자의 농도와 관련되나 클로로필 보다는 부유물질에 크게 의존한다. Verdin(1985)은 현장 수질분석 자료와 Landsat MSS 자료를 이용하여 이들의 상관관계를 분석한 결과 밴드 5의 반사율이 높을수록 탁도가 작다고 하였다. 그리고 Mausel et al(1991)은 부유물질의 농도가 증가하면 반사치는 증가하지만, 탁도가 증가하여 투명도는 낮아지는 경향을 나타낸다고 하였다. 본 연구에서도 그들의 연구 결과에 기초하여 Landsat MSS의 밴드 5와 측정범위가 같은 Band 3(0.63-0.69 μ m)과 현장실측 자료를 비교·분석한 결과 상관성을 찾을 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 클로로필-a 분석과 마찬가지로 주성분 분석을 통하여 얻어진 영상 중 PC 2를 이용하여 투명도와 상관관계를 분석하였다. 일반적으로 PC 2는 Band 4의 정보가 많이 포함되어 있으며, 가시광선대 정보도 다수 포함하고 있다.

PC 2와 현장 수질자료와의 상관계수는 0.8876이며 회귀식의 결정계수(R²)는 0.7877, 기울기는 -6.7413으로 나타났다(그림 7). 상관계수를 t-분포 검정한 결과 95%의 신뢰수준에서 유의적이며, 이들 변수간의 회귀방정식은 다음과 같다.

$$Y = -6.7413X + 85.124 \quad (3)$$

본 식의 지수가 부(負)의 상관관계를 가지므로

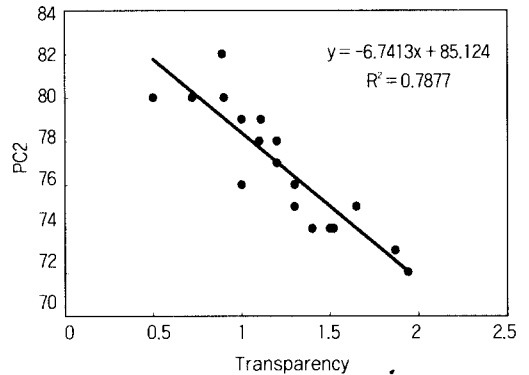


그림 7. 투명도의 현장실측자료와 PC 2사이의 회귀분석도

PC 2 영상의 DN 값이 증가할수록 투명도는 더 낮아지는 경향을 알 수 있다. 이상의 결과를 적용하여 한강하류 유역의 투명도 분포도를 작성한 결과 1994년 PC 2 영상에서의 투명도는 상대적으로 북한강보다는 남한강 유역에서 낮다(그림 8). 팔당호 내에서는 투명도가 0.9~1.2m 정도인데 하류지역으로 갈수록 1m 이하로 낮아진다. 특히 탄천 및 안양천 등 주요 지류들이 유입되는 지역에서는 0.5m이다. 1996년 PC 2 영상에서는 1994년 영상에 비해 전체적으로 투명도가 더 낮게 나타난다. 즉, 북한강 유역은 1m 이하 지역이 대부분이고 이는 남한강 유역보다 훨씬 낮은 값이다. 팔당 하류지역에서도 1m 이하로 투명도가 떨어지며, 여의도 하류지역에서는 0.5m 이하의 지역이 대부분이다.

이상의 분석결과는 클로로필-a 농도 변화와 마찬가지로 강수량의 변화에 따른 하천내에서의 유

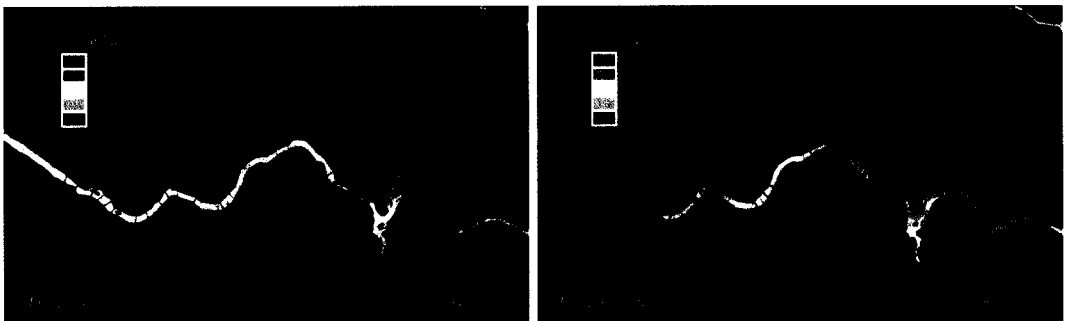


그림 8. PC 2 영상의 투명도 분포도

량 및 유속의 변화에 기인한 것으로 보인다.

3) 부유물질

부유물질은 해수순환 연구에서 자연적 추적자로서 이용되고 있는데(한국과학기술원, 1988) 하천유역에서도 수질과 퇴적환경에 영향을 미치는 중요한 환경적 변수로 간주되고 있다. 즉, 하천수에 존재하는 화학물질을 흡수하기도 하고 빛을 차단함으로써 하천 생태계에 큰 영향을 미치기 때문이다.

Liu and Klemas(1988)에 의하면 부유물질은 무기입자로서 흡수보다는 산란이 더 크고, 부유물질 농도와 반사치는 선형적인 관계를 갖으며, 특히 0.55 μ m에서 반사치와 현장자료와의 상관계수가 높다고 하였다. 그리하여 본 연구에서도 Landsat TM의 7개 Band 중에서 Band 2(0.56 μ m)

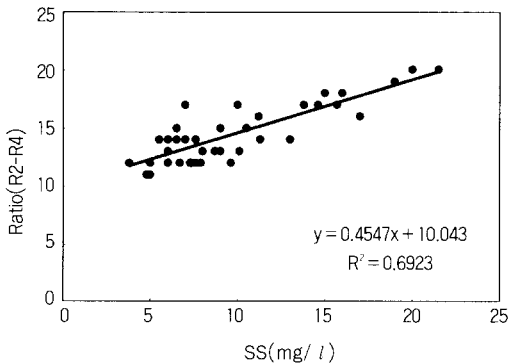


그림 9. 부유물질의 실측자료와 비연산 처리된 영상간의 회귀분석도

의 농도 값을 현장실측 자료와 비교하여 보았으나 상관계수가 0.5 미만으로 상관성이 높지 않았다. 따라서 본 연구에서는 부유물질 농도에 따른 수질을 평가하기 위해 밴드비율 알고리즘을 적용하였다. 밴드비율 알고리즘은 밴드별 반사치 분석에 의해 구성되고, 현장실측치와 비교하여 알고리즘을 검증하였다.

부유물질의 정량화를 위해 도출된 관계식은 수중 분광분석에서 부유물질의 농도가 상대적으로 높게 반응한 0.8 μ m 해당되는 Band 4와 단일밴드 분석에 사용된 Band 2의 연산을 통하여 도출하였다. 도출된 관계식은 다음과 같다.

$$SS = [(R_2) - (R_4)] \quad (4)$$

이상의 관계식으로 얻어진 영상의 DN 값을 현장 실측치와 비교하였는데, 비연산처리된 영상과 현장 수질자료와의 상관계수는 0.8320이며 회귀식의 결정계수(R²)는 0.6923, 기울기는 10.043으로 나타났다(그림 9).

상관계수를 t-분포 검정을 실시하여 유의성을 검정한 결과 95%의 신뢰수준에서 유의적이며, 이들 변수간의 회귀방정식은 다음과 같다

$$Y = 0.4547X + 10.043 \quad (5)$$

본 식의 지수가 정(正)의 상관관계를 나타내므로 비연산처리된 영상의 DN 값이 증가할수록 부유물질의 농도도 높아지는 경향을 알 수 있다.

이상의 회귀식을 통하여 얻어진 결과를 적용하

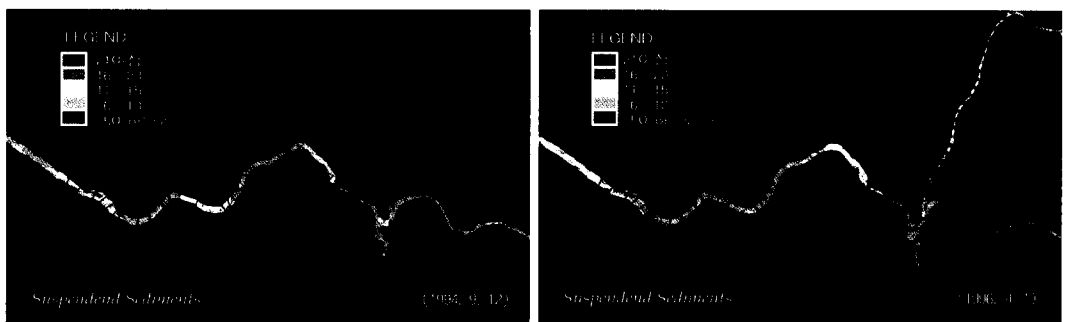


그림 10. 비연산 처리된 영상의 부유물질 분포도

여 한강하류 유역의 부유물질 분포도를 작성한 것이 그림 10이다. 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 1994년 영상에서의 부유물질의 농도는 상대적으로 북한강보다는 남한강 유역이 높게 나타난다. 팔당호 내에서는 부유물질의 농도는 5~10mg/l 정도이며, 하류지역으로 갈수록 10mg/l 이상으로 높아지고, 주요 지류들이 유입되는 지역에서는 20mg/l 이상 나타나는 지역도 있다. 1996년 영상에서의 부유물질의 농도분포는 1994년 영상과 정반대의 분포 패턴을 나타내고 있다.

특히 북한강과 남한강의 분포패턴이 다르게 나타나는데, 이것은 상류지역의 유량 및 유속의 차이에 따른 것으로 보인다. 북한강은 15mg/l 이상 나타나며, 남한강은 10mg/l 이하 지역이 대부분이다. 하류지역에서는 팔당댐 하류에서 10~20mg/l 농도가 높아지다가 암사동 유역에서는 다시 5~10mg/l로 낮아진다. 그 후 부유물질의 농도는 여의도 지역을 지나면서 10mg/l 이상 높아진다.

4. 결론

본 연구에서는 한강 하류 지역을 대상으로 원격탐사 자료의 수질평가 기법을 분석하기 위해서 일차적으로 Landsat TM 자료로부터 수질오염 관련인자를 추출할 수 있는 가능성을 고찰하고, 그 적용방법을 검토하였다. 수질오염 관련인자로는 Landsat TM 자료에서 측정이 가능한 클로로필-a, 투명도, 부유물질 등을 선정하여 주성분 분석 및 비연산처리 방법으로 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 수면에 도달하는 태양복사에너지는 주로 가시광 영역인 0.5 μ m 부근에서 스펙트럼 값이 제일 높게 나타났다. 수질인자 중 클로로필-a는 녹색파장대인 0.52 μ m 부근에서, 부유물질은 0.8 μ m에서 그리고 투명도는 0.55 μ m에서 높은 반사율을 보였다.

둘째, 클로로필-a와 투명도의 특성을 밝히는 데는 주성분 분석이 적합하다. 클로로필-a는 주성분 분석된 PC 1 영상과 실측자료와의 상관성이 높으며, 투명도는 PC 2 영상에서 상관계수가 0.8 이상 높게 나타나서 투명도 분포도를 작성할 수 있었다.

셋째, 하천 및 호소유역에서의 부유물질 농도 산출은 비연산처리를 이용하여 구하였는데 그 결과 실측자료와 비교하였을 때 상관계수가 0.8 이상으로 적용에 적합하였다.

이상의 수질인자 평가기법을 보다 더 정량적·정성적으로 분석하기 위해서는 앞으로 보다 많은 고해상도 인공위성 자료의 축적과 현장 실측자료의 적시 획득이 요구된다.

文 獻

- 국립환경연구원, 1992, 한강유역을 중심으로 한 환경관리 기술개발.
- 김광은·이태섭, 1994, "수질오염 감시에의 활용을 위한 항공원격 탐사의 적용연구", 한국 GIS학회지, 2(1), 65-74.
- 김광은·이태섭·오성남, 1997, "단일 채널-다중 주사각 자료를 이용한 열적외영역 원격탐사 자료의 대기영향 평가 기법", 대한원격탐사학회지, 12(3), 219-228.
- 安岡善文·宮崎忠國, 1982, "リモートセンシングによる湖水域の水質分布計測, -回歸分析を用いた大氣補正と水質推定-, 日本リモートセンシング學會誌, 2(3), 51-63.
- 양인태·김홍규, 1994, "리모트센싱 기법을 이용한 호소수질 관리방안 -북한강 수계의 환경인자추출을 중심으로-", 대한토목학회지, 14(11), 161-170.
- 중앙기상대, 1986~1996, 기상년보, 기상월보.
- 한국과학기술원 해양연구소, 1988, Landsat TM 자료에 의한 조간대지형 및 해수탁도 조사 연구.
- 환경부, 1990~1996, 수질측정자료(DB), 환경부 수질정책과.
- Bagheri, S. and Dios, R. A., 1990, Chlorophyll-a estimation in New Jersey's coastal waters using Thematic Mapper data, *Int. J. Remote Sensing*, 11(2), 289-299.
- Bartolucci, L. A., Chang, M., Anuta, P. E. and Graves, M. R., 1988, Atmospheric effects on Landsat TM thermal IR data, *IEEE Trans.*

- Geosci. Remote Sensing*, 26, 171-176.
- Braga, C. Z., Setzer, W. and Lacerda, L. D., 1993, Water quality assessment with simultaneous Landsat-5 TM data a Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil, *Remote Sensing of Environment*, 45, 95-106.
- Braude, C., Yosef, B. and Dor, I., 1995, Satellite remote sensing of waste reservoirs, *Int. J. Remote Sensing*, 16(16), 3087-3114.
- Forster, B. C., Xingwei, S. and Baide, X., 1993, Remote Sensing of sea water quality parameters using Landsat TM, *Int. J. Remote Sensing*, 14(15), 363-369.
- George, D. C. and Hewitt, D. P., 1990, The remote sensing of Photoplankton in oligotrophic lakes, *Proceedings of the NERC symposium on airborne remote sensing 1990*, 193-201.
- Huh, O. K., Moeller, C. C., Menzel, W. P., Rouse, L.J. and Roberts, H.H., 1996, Remote Sensing of turbid coastal and estuarine waters: A method of multispectral water-type analysis, *Int. J. Coastal Res.*, 12(4), 984-995.
- Jang, D. H. and Jo, G. H., 1997, A Study on the Environmental Analysis of Water Quality Using Low Resolution Camera Data, *The First KOMPSAT OSMI(LRC) Workshop*, 247-253.
- Jang, D. H. and Jo, G. H., 1998, The Development of Water Quality Mointoring System and its Application Using Satellite Image Data, *Int. Symposium on Remote Sensing & The Second KOMPSAT OSMI(LRC) Workshop*, 376-381.
- Jang, D. H., Jo, G. H. and Chi, K. H., 1998, The Analysis of Spectral Characteristics of Water Quality Factors Using Airborne MSS Data, *Journal of Korean Society of Remote Sensing*, 14(3), 295-306.
- _____, 1999, An Approach to Measurement of Water Quality Factors and its Application Using NOAA satellite Data, *Int. Symposium on Remote Sensing & The 3rd KOMPSAT-1 Application Workshop*, 363-370.
- Jun, B., Gotoh, K. and Yang, I., 1992, Investigation of the coastal zone environment using Remote Sensing data acquired from Landsat-5 TM, *Proceedings of The Sixth International Symposium on River and Lake Environment*.
- Khorram, S., Cheshire, H., Geraci, A. L. and Rosa, G.L., 1991, Water Quality Mapping of Augusta Bay, Italy from Landsat TM data, *Int. J. Remote Sensing*, 12(4), 803-808.
- Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. 1994, *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, Inc.
- Liu, W. Y. and Klemas, V., 1988, Quantitive analysis of distribution of suspended sediments in the Yellow river estuary from MSS data, *Geocarto International*, 1, 51-62.
- Markham, B. L. and Barker, J. L., 1986, Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectance and At-Satellite Temperature, *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1, 3-8.
- Mausel, P. W., Karaska, M. A. and Mao, C. Y., 1991, Insights into Secchi transparency through computer analysis of aerial multispectral video data, *Int. J. Remote Sensing*, 12(12), 2485-2492.
- Mulhearn, P. J., 1995, Landsat reflectivities versus Secchi disc depths, *Int. J. Remote Sensing*, 16(2), 257-268.
- Pathak, P. N., 1982, Comparison of TIROS-N and Ships in the North Indian ocean during MONEX(May/July, 1979), *Remote Sensing of Environment*, 12, 363-369.
- Pattiaratchi, C. and Lavery, P., 1994, Estimates of the water quality in coastal waters using multi-date Landsat Thematic Mapper data, *Int. J. Remote Sensing*, 15(8), 1571-1584.

Reddy, N. A., 1993, Remote Sensing mapping of suspended sediments in Krishna Bay Estuary, Andhra, India, *Int. J. Remote Sensing*, 14(11), 2215-2221.

Verdin, J., 1985, Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat imagery, *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 51, 343-353.