

## LAI를 고려한 잠재증발산량 추정\*

김주훈<sup>1\*</sup> · 김경탁<sup>1</sup>Estimation of Potential Evapotranspiration  
Using LAIJoo-Hun, KIM<sup>1\*</sup> · Kyung-Tak, KIM<sup>1</sup>

## 요 약

수문순환 과정에서 증발산 현상은 수자원 개발을 위한 계획의 수립과 수자원시스템의 운영면에서 대단히 중요한 요소로서 작용한다. 본 연구는 Landsat TM(ETM+) 자료와 DEM, Landcover 등의 공간정보를 이용하여 지표면의 에너지수지 요소를 고려한 유역의 일일 잠재증발산량을 분포형으로 산정하는 것을 목적으로 하였다. 연구대상유역은 한강수계 경안천 유역으로 하였으며, 잠재증발산량 산정은 식생이 전혀 없는 수역과 비수역 부분으로 구분하여 식생이 존재하는 지역에는 엽면적지수(LAI)를 고려한 Penman-Monteith식을 이용하였다. 그리고 비식생영역인 수역은 Penman의 에너지수지-질량수송 조합방법에 의해 산정하였다. 잠재증발산량 산정에 필요한 입력자료 중 NDVI와 SR 그리고 알베도는 1986년부터 2002년까지의 Landsat TM 및 ETM+ 영상자료로부터 분포형으로 생성하였다. NDVI 분포도를 이용하여 지중열전도량 분포도를 생성하였고, SR 분포도를 이용하여 엽면적지수 분포도를 작성하였다. 산정결과 유역전체 평균 잠재증발산량은 단위셀당 1.8~3.2mm/day 정도로 산정되었다. 각 토지피복별 잠재증발산량을 산정한 결과 수표면에서의 잠재증발산량은 3.6~4.9mm/day, 도시지역은 1.4~3.1mm/day, 나대지는 1.4~3.5mm/day, 초지는 1.7~3.7mm/day, 산림지역은 1.7~3.0mm/day 그리고 농경지에서는 1.8~3.6mm/day로 산정되었다. 증발점시 관측자료와 비교한 결과 잠재증발산량이 과소하게 산정되었으나 물리적인 타당성은 있는 것으로 판단된다.

주요어 : 증발산량, Penman-Monteith, 엽면적지수, Landsat

## ABSTRACT

In the process of a hydrology circulation, evapotranspiration is considered a very important factor to build a plan for the development of water resources and to operate water resources system. This study purposes to estimate daily potential evapotranspiration quantity in consideration of energy factors of the

2005년 6월 16일 접수 Recieved on June 16, 2005 / 2005년 9월 15일 심사완료 Accepted on September 15, 2005

\* 이 논문은 공공기술연구회의 일반연구사업(사업명 : 위성자료 공공활용 연구-위성영상을 이용한 하천정보생산 및 활용에 관한 연구)의 연구비 지원과 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 1-2-2)에 의해 수행되었음.

<sup>1</sup> 한국건설기술연구원 수자원연구부 Water Resources Division, KICT

\* 연락처 E-mail : jh-kim@kict.re.kr

surface by using spatial information such as Landsat TM(ETM+) data, DEM and Landcover. Kyounan-cheon, Han River is selected as a target area, and landcover is divided by vegetation and non-vegetation covered area. Penman-Monteith equation which considers leaf-area index is used to estimate potential evapotranspiration quantity of vegetation covered area. The combination method(energy burget and aerodynamic method) is used in non-vegetation covered area. Among the input data for estimating potential evapotranspiration, NDVI, SR and Albedo is formed by Landsat, TM and ETM+ from 1986 through 2002. ground heat flux is estimated by using NDVI distribution map, LAI distribution map is drawn by using SR distribution map. The result of estimation shows that the average potential evapotranspiration in the whole basin is about 1.8-3.2mm/day per each cell. The results of estimating potential evapotranspiration quantity by each landcover are as follows; water surface 3.6-4.9mm/day, city 1.4-3.1mm/day, bareland 1.4-3.5mm/day, grassland 1.7-3.7mm/day, forest 1.7-3.0mm/day and farmland 1.8-3.6mm/day. The potential evapotranspiration quantity is underestimated in comparison with observed evaporation data by evaporation pan, but it is considered that it has physical propriety.

**KEYWORDS** : *Evapotranspiration, Penman-Monteith, LAI, Landsat*

## 서 론

수문순환 과정에서 증발산(evapotranspiration)은 물이 유역으로부터 제거되는 주요 원인으로, 증발산은 초목에 의한 증산과 수면, 토양, 눈, 얼음, 초목, 기타 표면으로부터의 증발을 포함한다. 증발산을 산정하는 실질적인 적용에는 지속적인 식물 성장에 물 부족기간 동안 인공적인 급수를 위한 관개시스템의 설계 등 증발산의 비율과 양은 관계사업을 계획하는데 있어서 필수적인 핵심정보이며, 수질 혹은 기타 환경문제에 대한 해결 및 관리방안을 수립하는데 있어서도 필수적인 정보이다.

증발산에 중요한 역할을 하는 식물은 지구 육지 표면의 약 70% 정도를 점유하고 있으며, 생태계의 가장 중요한 구성인자로서, 식물의 종류 및 군집의 공간적 분포유형, 생육주기의 변화, 식물 생장의 생리 및 형태적 변화 등과 같은 정보들은 그 지역의 기후, 토양, 지질, 지리적 특성을 밝히는데 중요한 역할을 한다(채효석 등, 2002).

현재 GIS 및 원격탐사기법은 수문 및 수자원 분야를 비롯해 많은 분야에서 응용되고 있으

며, 증발산량을 분포형으로 분석하기 위해서도 인공위성 원격탐사 기법이 지표면의 상태를 파악하기 위해 유용하게 이용되고 있다(채효석, 1998; 채효석 등, 1999).

유역에서의 수문특성인자들의 공간분포를 정량적으로 파악하는 기법의 중요성은 여러차례 지적되어 왔으며, NGIS 자료 및 공통주제도 등의 구축에 의해 지형 및 지질, 토양, 식생 등의 자료가 공간 분포형으로 구축되고 있다. 이와같이 유역의 각종 지형정보가 분포형으로 구축됨에 따라 이들 정보를 이용한 다양한 수문해석의 결과도 분포형의 격자화된 정보의 필요성이 요구되고 있다.

본 연구에서는 여러시기의 Landsat 위성영상 자료를 이용하여 기하보정과 더불어 지표면 반사율과 방사휘도 등의 대기보정을 거친 후 알베도, 식생지수들(Vegetation Indices, NDVI, SR), 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI), 지중열전도량(ground heat flux) 등을 생성하고 DEM, 토지피복도 등의 GIS 자료를 이용하여 지형적인 요소를 고려한 유역의 일별 잠재증발산량을 분포형으로 추정해 보고자 하였다.

## 원격탐사 자료

### 1. 식생지수(Vegetation Index)

원격탐사 기술은 여러 분야에서 광범위하게 활용되고 있으며, 특히, 식물로 구성된 다양한 지역(농지, 산림, 초지, 습지 및 도시녹지)에 적용되고 있다.

1960년대부터 원격탐사 자료로부터 식물의 생물리학적 특성을 나타내는 다양한 인자들을 밝혀내고자 노력해 왔으며, 이러한 노력의 대부분은 식생지수의 개발로 이어져 왔다. 식생지수는 단위가 없는 복사값으로서 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성, 엽면적지수, 엽록소함량, 엽량 및 광합성 흡수복사량 등과 관련된 지표로 사용된다.

현재까지 20여 종류의 식생지수가 사용되고 있으며 대부분의 식생지수는 정보량 측면에서 기능적으로 거의 같지만, 몇몇 식생지수들은 나름대로 독특한 생물리적 정보를 제공한다(Perry 등, 1984; Qi 등 1995).

푸른 잎들은 태양복사의 흡수자로서 비식생 표면과 비교하여 푸른잎은 광합성을 위해 가시복사를 더 많이 흡수하고 근적외선은 적게 흡수한다. 적외선과 근적외선의 파장 밴드에서의 반사율을 이용하여 식생표면의 여러 가지 상태를 나타내는 다양한 식생지수 식에 이용할 수 있다.

여러 가지 식생지수들 중에서 단순비율 식생지수(simple ratio; SR)는 배경(background) 효과를 제거한 한계성에도 불구하고 인공위성 또는 항공기탑재 센서들로부터 획득된 원격탐사 자료로부터 LAI와 다른 매개변수를 유도하는데 가장 많이 이용된다(Jing 등 1996).

최초의 식생지수는 1968년 Birth 등에 의하여 발표된 적색(Red)과 근적외선 영역(NIR)에서의 반사값을 나눈 단순비율 식생지수로 알려져 있다(Cohen, 1991).

$$SR = \frac{NIR}{Red} \quad (1)$$

1974년 Rouse 등은 현재 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)로 알려진 정규화 식생지수를 개발하였다.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

위 식에서 근적외선 영역과 적외선 영역은 각각 식생이 광합성을 하는 과정에서 강하게 흡수하는 파장과 해면질의 잎살에 의해서 강하게 반사되는 파장역이기 때문에 식생지수는 지면에서의 식생량(녹색잎 총량, 엽면적지수 등)과 밀접하게 관련되어 있다.

NDVI식은 -1.0에서 1.0까지의 범위를 가지며, 증가하는 양수 값은 녹색 식물의 증가를 의미한다. 반대로 음수 값은 물, 황무지, 얼음, 눈, 혹은 구름과 같이 식생이 존재하지 않는 지역을 나타낸다.

정규화식생지수와 기타 식생지수는 거의 30여년 동안 인공위성 및 항공기 영상자료로부터 지표면의 식생피복과 관련된 정보를 얻기 위한 수단으로 사용되어 왔다. 계절별 NDVI 자료를 이용한 시계열 분석을 통하여 여러 종류의 식생 형태들에 대한 순생산량 추정, 식생피복의 생육 기간별 변화모니터링, 그리고 특정 식물의 생육 기간 또는 건조기간을 추정하여 왔다(Huete 등, 1994; Ramsey 등, 1995).

### 2. 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)

엽면적지수는 중요한 생물학적 인자로서, 식물의 잎은 태양에너지와 실질적으로 접촉하는 표면인 동시에 원격탐사 신호의 많은 부분을 만들어 내며, 대기중 탄소의 흡수와 교환이 이루어지는 표면이다(Chen 등, 1992). 따라서 이것은 광합성, 호흡, 증산, 탄소 및 영양물질 순환, 그리고 강우의 차단 등과 같은 지구표면의 식생에 관계되는 많은 생물학적, 물리적 처리의 중요한 매개변수로 이용된다.

LAI는 단위지표면적에 자라고 있는 모든 잎들의 면적(양쪽이 아닌 한쪽 면)의 합을 지표면

적으로 나눈 비율이다. 즉, 단위면적당 모든 잎층(leaf layer)의 축적된 잎의 전체밀도로서 정의된다.

엽면적지수를 측정하는 방법은 현지에서 측정하는 방법과 원격탐사자료에 의한 방법 등이 있으며, 현지에서 엽면적 측정하는 방법은 광범위한 지역을 측정하기에는 많은 시간과 비용이 소요되며, 측정지점 이외의 지역에 대해서는 엽면적지수를 산정하는데 문제점이 있다.

원격탐사자료를 이용한 엽면적지수 추정기법은 일반적으로 위성영상에서 얻어진 식생지수와 LAI의 상관관계를 분석하여 광범위한 지역의 LAI를 추정하는 방법이 사용된다(Gardner 등 1986; Wiegand 등 1992).

광역적으로 LAI는 큰 스케일 격자인 대기모델에서는 0~6의 값을 갖는다. 그러나 작은 크기의 기상학적 생태시스템은 LAI를 기초로 하여 연간의 상세한 중을 구분할 수 있으며, 위성자료 원격탐사 분석기법은 넓은 면적위의 LAI의 분포를 단일한 방법으로 얻을 수 있다.

NDVI와 LAI의 관계에 대하여 많은 연구자들이 연구를 수행하고 있으며, 식생에 따른 식생지수와 LAI 관계식은 다음 표 1과 같다.

### 3. 알베도( $\alpha$ , albedo) 추정

지표면 알베도는 일정한 파장대에 입사한 태양복사에너지와 지표면으로부터 반사된 태양복사에너지의 비로 정의되며, 지표면 물체의 종류

**TABLE 1.** Regression models reports in literature to relate LAI and VI derived from Landsat TM data(Yujie Wang, 2002)

Vegetation Index	Field LAI measurements	Equation	$R^2$
NDVI/SR	Allometric method	① $LAI = 0.5724 + 0.0989LAI - 0.0114LAI^2 + 0.0004LAI^3$	0.74
		② $SR = 2.2282 + 2.5376LAI - 0.1576LAI^2$	0.59
NDVI/SR	Allometric method	③ $NDVI = 0.0377LAI + 0.607$	0.72
		④ $SR = 0.9357LAI + 3.552$	0.71
SR	Allometric method	⑤ $SR = 1.92LAI^{0.583}$	0.91
		⑥ $SR = 1.92 + 0.532LAI$	0.83
NDVI/SR	LAI-2000 and TRAC*	⑦ $NDVI = 0.032LAI + 0.635$	0.42
		⑧ $SR = 1.014LAI + 3.637$	0.49
SR	LAI-2000 and TRAC*	⑨ $SR = 1.153LAI + 2.56$	0.66
SR	Ceptometer	⑩ $SR = 3.1196 + 4.5857 \log(LAI)$	0.97
		⑪ $NDVI = 1.2383 / (1/LAI + 009061) - 0.3348$	0.87
NDVI/SR	LAI-2000	⑫ $SR = 0.96 / (1/LAI - 0.066) + 0.987$	0.88
		⑬ $LAI = 33.99NDVI - 14.21$	0.75
SR	Allometric method	⑭ $SR = 0.614LAI + 1.23$	0.82
NDVI	Allometric method	⑮ $NDVI = 0.03LAI + 0.6$	0.32

나 토양 조건 등에 따라 다른 값을 가진다. 일반적으로 지구의 평균 알베도는 30~32.3% 정도이며(Gruber, 1977), 따라서 약 68.7~70% 정도는 지표면으로 흡수되는 것을 알 수 있다.

원격탐사 자료로부터 정확한 알베도를 추정하기 위해서는 지표면의 분광반사도, 태양방사 조도의 분광분포 및 파장대 등이 고려되어야 한다(Brest 등 1987).

지표면이 식생일 때는 Landsat TM의 경우 세 개의 영역으로 분리되어 다음과 같은 식에 의해서 지표면의 알베도를 계산하게 된다.

$$\alpha = 0.526R_s(TM_2) + 0.362R_s(TM_4) + 0.112R_s(TM_7) \quad (3)$$

눈을 제외한 비식생면일 때는 가시광 영역과 적외선 영역의 두 개 영역으로 나누어지며, 다음과 같이 알베도를 계산한다.

$$\alpha = 0.526R_s(TM_2) + 0.474R_s(TM_4) \quad (4)$$

여기서,  $R_s(TM_{mm})$ 는 각 밴드별 반사도이다.

#### 4. 지중열전도량( $G$ , ground heat flux)

지중열 전도량은 일반적으로 지표하에 설치된 열 이동 센서와 토양 온도계에 의해 측정되지만, 토양의 상태에 따라 크게 달라지기 때문에 넓은 지역에 대해서는 측정이 불가능하다. 또한, 원격탐사 자료를 이용하여 직접 계산하는 방법도 아직은 완벽하지 못하다.

지중열 전도량은 나대지의 경우 토양 습도에 따라 순방사량의 20%~50%정도인 반면(Do 등, 1975), 농작물이 성장하고 있는 경우에는 5%~10%정도이다(Baldocchi 등, 1985; Clothier 등, 1986; Choudhury 등, 1987).

일반적으로 원격탐사 자료로부터 지중열 전도량을 추정하기 위해 지금까지 제안된 방법은 식생지수를 이용하는 방법이 일반적이며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$G = (0.325 - 0.208NDVI)R_n \quad (5)$$

여기서  $G$ 는 지중열 전도량( $MJ/m^2 \cdot day$ ),  $NDVI$ 는 정규화식생지수,  $R_n$ 은 순복사량(net radiation)이다.

### Penman-Monteith의 잠재증발산량 산정 방법

수증기의 손실률은 표면에 닿는 태양복사에너지량과 풍속, 기공의 크기, 토양함수율, 토성, 식물종 등에 좌우되기 때문에 증발 특히 증발산은 매우 복잡한 과정을 가진다. 복잡한 조건을 단순화하기 위해서 학자들은 기공의 크기나 토양함수율 등과 같은 모든 미지수들을 제거하고 오직 기상조건으로써 수증기의 손실률을 산정할 수 있는 방법에 연구의 초점을 맞추어 왔다. 이렇게 단순화된 계산과정을 통해 산정된 증발량과 증발산량이 각각 잠재증발량과 잠재증발산량이다. Jensen 등(1990)은 잠재증발량에 대하여 “대기와 접해있는 모든 표면이 젖어 있고 그래서 표면에서의 증발에 아무런 제한이 없을 때의 증발량”이라고 정의하였다. 또한 “잠재증발량은 기본적으로 대기조건 및 지표면 반사율(albedo)에 좌우되며, 공기역학적 조도 등과 같은 지표면의 기하학적 특성에 따라서도 변화한다”라고 하였다.

잠재증발산량(Potential Evapotranspiration, PET)개념은 Thornthwaite(1948)에 의해 기후분류법의 일부로서 처음 도입되었다. 그는 PET를 무한의 토양수분의 공급이 가능하고 이루어져야 효과가 없이 성장하는 식생으로 균일하게 피복된 넓은 유역으로부터 증발산이 발생하는 비율로 정의하였다.

증발산 비율은 많은 식생 표면 특성에 따라 영향을 받기 때문에 Penman(1956)은 PET를 “녹색식물이 지면을 완전히 덮고, 균일한 높이와 물 부족이 전혀 없는 상태에서 증산되는 수분량”이라고 정의하였다. Penman의 정의 역시 환경 조건을 단순화시키고 있음을 알 수 있다. 식물은

키가 작고 균일하며, 토양이 노출되지 않도록 지표면을 완전히 차폐하고 있는 것으로 가정하였다. 또한 식물에게는 물이 충분히 공급되므로 인해 토양수분함량이 더 이상 변수가 되지 않으며, 기공들은 항상 활짝 열려 있을 것이다. 이러한 조건하에서의 증발산율은 주어진 기후조건 하에서 이론적으로 가능한 최대 증발산율이다.

Penman의 경험공식에서 생략된 공기역학적 저항함수와 수증기 이송에 작용하는 표면저항을 고치기 위하여 여러 연구자들이 많은 공식들을 제안해 왔으나, 이 가운데 가장 많이 인용되는 사람이 Monteith(1981)이다. Monteith에 의해 수정된 공식을 Penman-Monteith 식이라고 불리우고 있다.

Penman-Monteith 방법에서는 증발산을 유지하기 위한 에너지, 수증기를 제거하기 위한 기작의 강도, 공기역학적 저항, 표면저항을 설명하기 위한 요소들로 구성되어 있다. 즉 Penman-Monteith 방정식은 다음과 같다.

$$\lambda \cdot ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot [e_s - e_a] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_s / r_a)} \quad (6)$$

여기서,  $\lambda$ : 잠열강도 ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ),  $ET$ : 증발율의 깊이 ( $\text{mm}/\text{d}$ ),  $\Delta$ : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기  $de/dT$  ( $\text{kPa}/\text{C}$ ),  $R_n$ : 순복사량 (net radiation) ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ),  $G$ : 지중열 전도량(heat flux density to the ground) ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ),  $\rho_a$ : 평균 공기밀도 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c_p$ : 일정 압력에서의 비열 ( $\text{MJ}/\text{kg}^2 \cdot \text{day}$ ),  $e_s$ : 포화수증기압( $\text{kPa}$ ),  $e_a$ : 수증기압( $\text{kPa}$ ),  $\gamma$ : 습도상수( $\text{kPa}/\text{C}$ ),  $r_s$ : 식생피복저항( $\text{s}/\text{m}$ ),  $r_a$ : 공기역학 저항( $\text{s}/\text{m}$ )이다.

## 증발산량 분포 추정

### 1. 기본입력자료

기본 입력자료는 공간정보 자료와 기상 자료로 구분된다. 공간정보 자료는 지표면의 피복

상황, 고도 등의 영향에 따라 증발산량이 영향을 받으므로 기본 공간정보로는 토지피복도와 DEM자료를 이용하였다. 토지피복도는 Landsat ETM+ 2002년 4월 3일 자료를 이용하여 작성하였고, DEM자료는 국토지리정보원의 수치지도(1:25,000)자료를 이용하여 작성한 DEM을 이용하였다(<http://daraware.kict.re.kr>).

기상자료는 수원 기상관측소의 기상자료를 이용하였고, 증발산량 산정에 이용한 기상자료는 본 연구에서 확보한 Landsat 위성영상자료 촬영날짜와 동일한 날의 일평균기온, 평균풍속, 기압, 수평면 일사량과 위도별에 따른 일사량비 및 일조시간비를 이용하여 분석하였다.

위성영상 정보는 Landsat TM 및 ETM+의 1986년부터 2002년까지 5개 영상을 이용하였다. 이들 영상자료는 대기보정 등을 실시한 후 정규화 식생지수, 단순식생지수, 지표면 알베도를 계산하였다. 계산된 SR 식생분포도를 이용하여 엽면적지수 분포도를 계산하였고, 그리고 NDVI 식생분포도를 이용하여 지중열전도량 분포도를 계산하여 Penman-Monteith의 잠재증발산량 산정식의 입력 자료를 생성하였다.

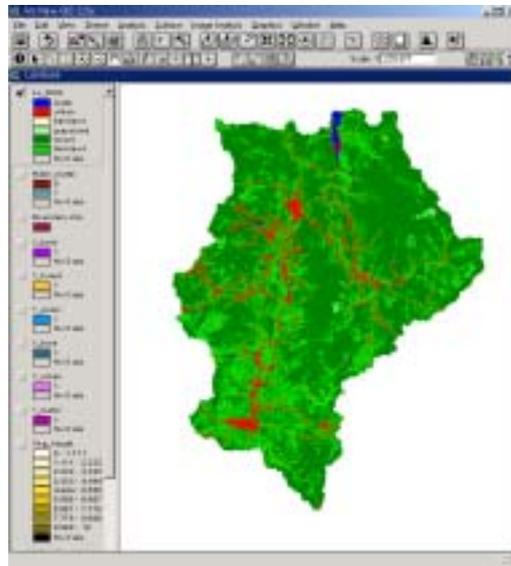


FIGURE 1. Landcover map

TABLE 2. Meteorological data and satellite data

Date	Items	mean Temp. (°C)	vapor press. (mb)	Humidity (%)	mean wind speed(m/s)	Solar radiation (MJ/m <sup>2</sup> )	duration of sunshine (hr)	small evaporation pan(mm)	satellite image
1986/04/15		11.5	1012.3	55.0	3.7	26.26	11.0	5.8	Landsat TM
1990/04/10		13.4	1018.3	60.8	1.4	18.77	11.0	4.9	Landsat TM
1996/09/01		23.1	1012.5	69.0	1.0	20.76	11.9	4.1	Landsat TM
2000/04/29		15.2	1016.5	47.8	1.1	24.63	10.8	6.2	Landsat ETM+
2002/04/03		14.7	1013.5	40.4	2.7	21.23	10.3	5.9	Landsat ETM+

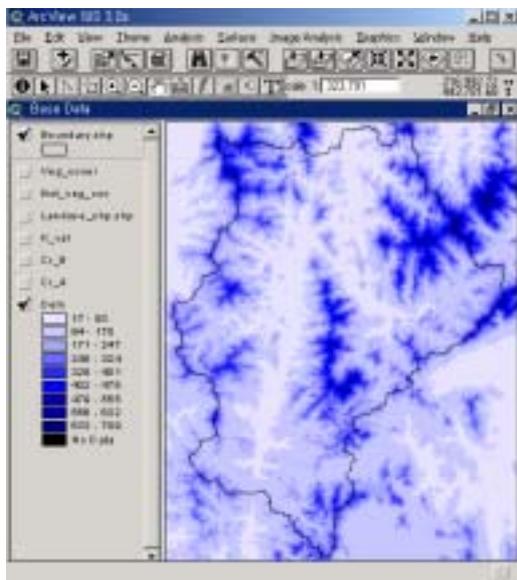


FIGURE 2. DEM

## 2. 분포형 입력자료

### 2.1 식생지수

본 연구에서는 Landsat TM 및 ETM+ 자료에 의해 정규화 식생지수(NDVI)를 계산하여 연구지역에 대한 식생분포도를 작성하였으며, 지표면에서 식생의 부존 상태를 파악하고 지중열전도량을 분석하는데 이용하였다.

분석결과 토지피복형태에 따라 수역이 가장 낮게 나왔고 도시지역, 나대지의 순으로

식생활력도가 낮게 나타났고, 초지, 산림지역, 농경지의 순으로 식생활력이 높은 것으로 분석되었다.

또한 년도별로는 분석한 결과 1996년 9월 영상을 제외한 나머지 영상이 식생이 성장하기 시작하는 4월 영상이라서 식생지수가 낮게 나타났으며, 가장 높게 나타난 1996년의 경우 9월 영상임에도 불구하고 대체로 낮게 분석되었다(표 3).

식생지수의 또다른 형태인 단순비율 식생지수(SR)를 Landsat TM 및 ETM+ 자료에 의해 식(1) 및 식(2)를 이용하여 연구지역인 경안천유역에 대하여 식생분포도를 작성하였으며, NDVI자료와 마찬가지로 지표면에서의 식생 상태를 파악하고 표 1의 식(5)를 이용하여 엽면적지수를 분석하기 위하여 생성하였다.

단순비율 식생지수 분석결과 0.87에서 1.106의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 토지피복별로는 NDVI와 마찬가지로 수역이 가장 낮았고 도시지역 및 나대지 지역 순으로 낮았으며, 초지, 산림지역, 농경지의 순으로 식생활력이 높은 것으로 분석되었다.

그러나 년도별로는 분석한 결과 NDVI와는 다르게 1996년 9월 영상이 가장 낮은 식생활력을 보이는 것으로 분석되었다(표 3).

TABLE 3. Vegetation index by each landcover

landcover	date 1986/04/15		1990/04/10		1996/09/01		2000/04/29		2002/04/03		mean	
	NDVI	SR	NDVI	SR	NDVI	SR	NDVI	SR	NDVI	SR	NDVI	SR
water	-0.946	0.047	-0.931	0.064	-0.936	0.059	-0.976	1.253	-0.901	0.062	-0.938	0.297
urban	-0.094	0.886	-0.071	0.927	-0.197	0.828	-0.168	0.749	-0.102	0.833	-0.126	0.845
bare	0.016	1.064	0.033	1.161	-0.379	0.544	-0.096	0.829	-0.079	0.855	-0.101	0.891
grass	0.047	1.156	0.025	1.087	0.100	1.361	0.100	1.272	0.120	1.293	0.078	1.234
forest	0.002	1.083	0.008	1.079	0.139	1.445	0.145	1.435	0.026	1.068	0.064	1.222
farmland	0.036	1.182	0.060	1.228	0.031	1.220	0.009	1.077	0.045	1.133	0.036	1.168
mean	0.001	1.106	0.013	1.079	0.076	0.87	0.074	1.136	0.018	1.036	0.023	1.045

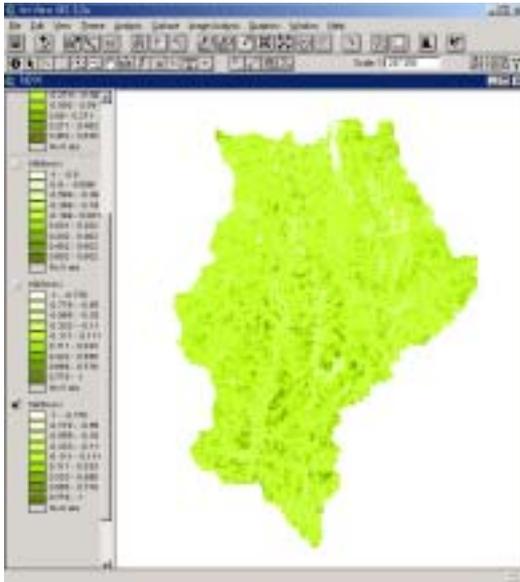


FIGURE 3. NDVI(1986/04/15)

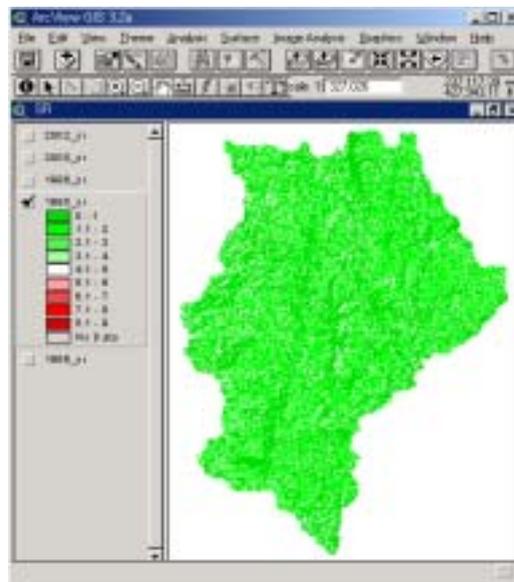


FIGURE 4. SR(1990/04/10)

## 2.2 엽면적지수(LAI)

엽면적지수는 Penman-Monteith의 잠재증발산량 산정식에서 지면의 피복저항에 사용되는 지표면 인자로서 본 연구에서는 기존의 NDVI 및 SR자료와의 상관관계식(표 4.)들을 이용하여 LAI를 분석하였다. 분석결과 물리적으로는 존

재할 수 없는 음수(-)값이 생성되는 상관관계식과 너무 크게(LAI > 10 이상) 나타나는 관계식들을 제외하였다.

본 연구에서 이용한 상관관계식은 표 1의 식 ⑤의 Peterson 등(1987)이 제시한 SR과의 상관관계식을 이용하여 엽면적지수를 계산하였다.

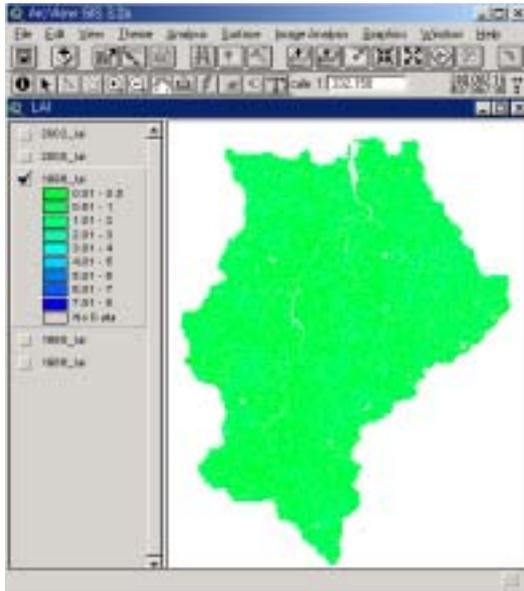


FIGURE 5. LAI(1996/09/01)

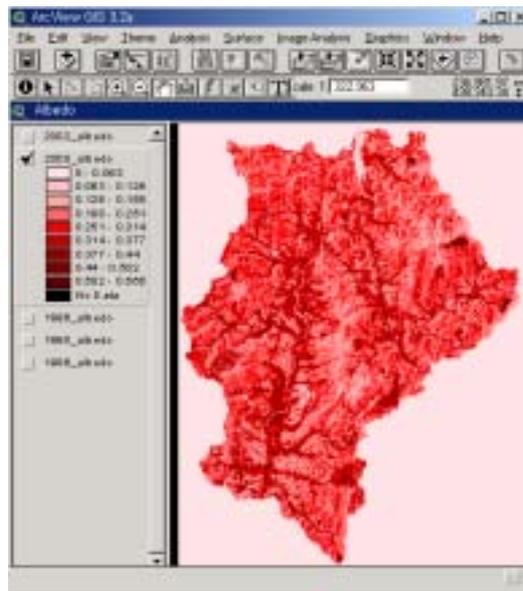


FIGURE 6. Albedo(2000/04/29)

한편, 계산 결과 원래의 Landsat 위성영상의 오류로 분석되는 몇 개의 셀값을 조정하여 최고 LAI값이 7이상인 셀들에 대해서는 최고값을 7로 설정하였다.

경안천 유역의 평균 LAI분석결과 유역 전체적으로 LAI값은 1.1에서 1.5 정도의 값을 나타내었다. 토지피복별로는 SR값과 같이 도시지역, 나대지가 낮게 나왔고 초지, 산림 그리고 농경지 순으로 높게 계산되었다.

### 2.3 알베도 계산

알베도 계산은 두 가지 경우로 구분하여 수행하였다. 첫째, 지표면이 식생영역일 때 즉, 토지피복이 농경지, 초지, 산림지역에서의 알베도 계산은 식(3)을 이용하였고, 둘째, 수체, 도시지역, 나대지와 같은 비식생영역일 때는 식(4)를 이용하여 생성하였다.

알베도 분석 결과 유역 전체 평균 알베도는 0.215에서 0.268 정도의 값을 갖는 것으로 분석

TABLE 4. Mean LAI and albedo by each landcover

landcover	date		1986/04/15		1990/04/10		1996/09/01		2000/04/29		2002/04/03		Mean	
	LAI	albedo	LAI	albedo	LAI	albedo	LAI	albedo	LAI	albedo	LAI	albedo	LAI	albedo
water		0.069		0.082		0.116		0.076		0.049		0.078		
urban	1.330	0.353	1.366	0.342	1.225	0.331	1.210	0.352	1.306	0.270	1.287	0.330		
bare	1.506	0.281	1.564	0.240	0.956	0.374	1.310	0.504	1.334	0.417	1.334	0.363		
grass	1.572	0.271	1.523	0.315	1.709	0.324	1.668	0.423	1.693	0.392	1.633	0.345		
forest	1.499	0.216	1.504	0.199	1.779	0.241	1.779	0.242	1.515	0.183	1.615	0.216		
farmland	1.572	0.310	1.614	0.095	1.590	0.292	1.507	0.300	1.561	0.268	1.569	0.253		
mean	1.496	0.255	1.484	0.239	1.127	0.263	1.526	0.268	1.471	0.215	1.421	0.248		

되었으며, 토지피복별로는 년도마다 약간씩 다르게 분석되었는데 대체로 도시지역이나 나대지에서의 알베도 값이 높게는 0.504에서 낮게는 0.24정도로 나타나고 있으며, 수체에서의 알베도 값은 0.049에서 0.116정도로 가장 낮은 값을 나타내는 것으로 분석되었다. 식생영역인 산림, 초지, 농경지 지역에서는 0.095의 낮은 알베도 값을 나타내기도 하였으나 대체로 0.2에서 0.4정도의 값을 나타내는 것으로 분석되었다(표 4).

Landsat 위성영상 자료로부터 계산된 알베도는 Penman-Monteith의 잠재증발산량 산정식에서 순 복사에너지를 계산하는 과정에 이용하였다.

### 3. 잠재증발산량 분포 분석

본 연구는 Landsat TM(ETM+) 자료와 DEM, Landcover 등의 공간자료를 이용하여 지표면의 에너지수지 요소를 공간 분포형으로 추출하였고, 잠재증발산량 분포는 Penman-Monteith식을 이용하여 지역의 일일 잠재증발산량을 분포형으로 산정하였다.

산정결과 지역전체 평균 잠재증발산량은 단위셀당 1.7~3.2mm/day정도로 산정되었다. 각 토지피복별 잠재증발산량을 산정한 결과 수표면에서의 잠재증발산량은 3.6~4.9mm/day, 도시지역은 1.4~3.1mm/day, 나대지는 1.4~3.5mm/day, 초지는 1.7~3.7mm/day, 산림지역은 1.7~3.0mm/day 그리고 농경지에서는 1.8~3.6mm/day로 산정되

었다(표 5).

1996년의 경우 다른 시기의 기온보다 10℃내외이상 높았음에도 불구하고 낮게 산정되었으며, 1990년과 1996년의 잠재증발산량이 관측된 소형증발접시의 증발량(표 2)과 비교한 결과 과소하게 산정된 것은 상대습도가 높은 것에 기인한 것으로 판단된다.

증발접시 관측자료(표 2)와 비교한 결과 잠재증발산량(표 5)이 과소하게 산정되었으나 증발접시에 의한 관측은 실제증발량을 산정하기 위해 증발접시 계수(0.6~0.8 정도)를 고려하여 실제 증발량을 산정하며, 또한 증발접시에 의한 관측은 수역에 해당하므로 본 연구에서 유역의 토지피복 상태를 구분하여 산정한 잠재증발산량은 물리적인 타당성은 있는 것으로 판단된다.

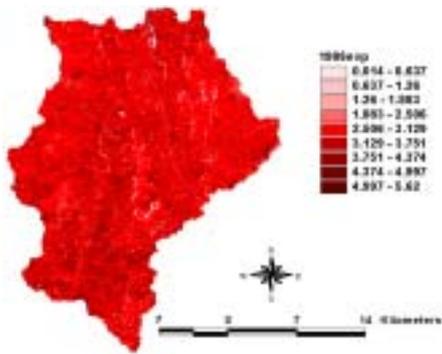
## 결론

수문순환 과정에서 증발산 현상은 수자원 개발을 위한 계획의 수립과 수자원시스템의 운영면에서 대단히 중요한 요소로서 작용한다. 즉, 수자원을 개발하고자 하는 지점에서의 가용 수자원중 순수하게 이용가능한 양을 추정하기 위해서는 증발산량의 산정이 필요한 것이며, 이는 비교적 장기간의 수자원의 양적 손실정도를 판단하는 기준이 된다.

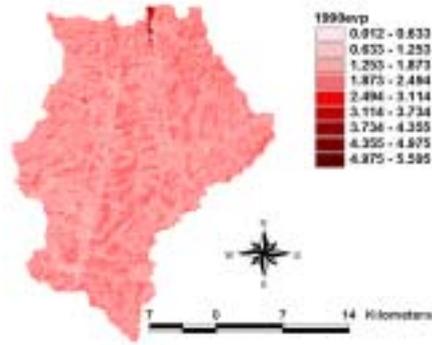
본 연구는 Landsat TM(ETM+) 자료와

TABLE 5. Potential evapotranspiration by each landcover (단위 : mm/day)

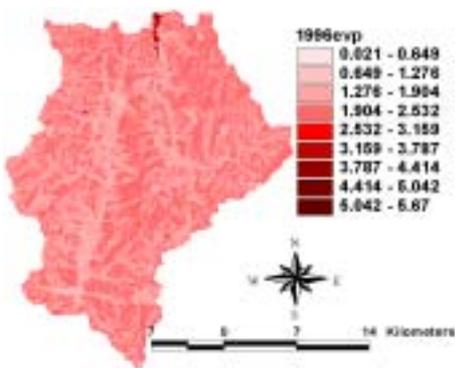
landcover	date					
	1986/04/15	1990/04/10	1996/09/01	2000/04/29	2002/04/03	
water	3.679	3.620	3.781	3.751	4.859	
urban	2.987	1.429	1.448	1.896	3.100	
bare	3.471	1.934	1.375	1.503	2.948	
grass	3.735	1.653	1.663	1.855	2.968	
forest	3.012	1.737	1.887	2.393	2.941	
farmland	3.574	1.757	1.785	2.352	3.413	
mean	3.193	1.727	1.829	2.346	3.105	



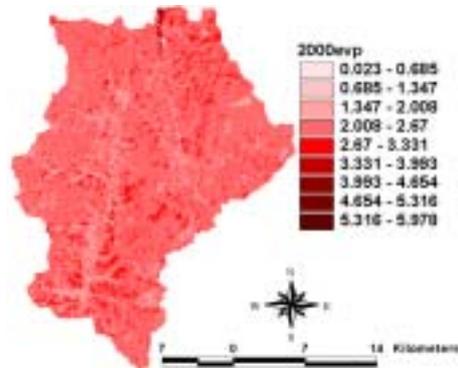
(a) 1986/04/15



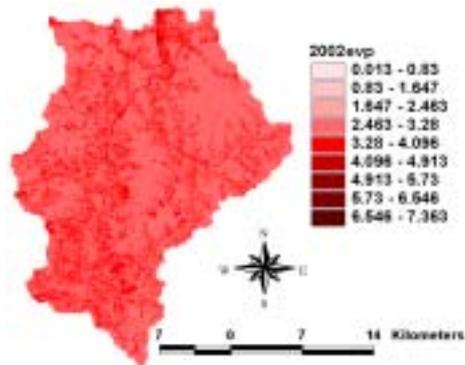
(b) 1990/04/10



(c) 1996/09/01



(d) 2000/04/29



(e) 2002/04/03

FIGURE 7. Potential evapotranspiration

DEM, Landcover 등의 공간정보를 이용하여 지표면의 에너지수지 요소를 고려한 유역의 일일 잠재증발산량을 분포형으로 산정하는 것을 목적으로 하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 잠재증발산량 산정은 식생이 전혀 없는 수역과 비수역 부분으로 구분하여 식생이 존재하는 지역에는 엽면적지수를 고려한 Penman-Monteith식을 이용하였다. 그리고 수역은 Penman의 에너지수지-질량수송 조합방법에 의해 산정하였다.
- 잠재증발산량 산정에 필요한 입력자료 중 NDVI와 SR 그리고 알베도는 1986년부터 2002년까지의 Landsat TM 및 ETM+ 영상자료로부터 분포형으로 생성하였다.
- NDVI 분포도를 이용하여 지중열전도도 분포도를 생성하였고, SR 분포도를 이용하여 엽면적지수 분포도를 작성하였다.
- 알베도 계산은 식생영역과 비식생영역을 구분하여 알베도 분포도를 작성하였다.
- 엽면적지수는 기존의 식생지수~엽면적지수의 상관관계식을 이용하여 엽면적지수 분포도를 작성하였다.
- 증발접시 관측자료와 비교한 결과 잠재증발산량이 과소하게 산정되었으나 증발접시 계수 등을 고려한다면 본 연구에서 유역의 토지피복 상태를 구분하여 산정한 잠재증발산량은 물리적인 타당성은 있는 것으로 판단된다.

증발산량의 공간적 분포상황은 공간적 물수지 규명에 유용하게 이용될 수 있으며, 현재 연구되고 있는 분포형 유출해석 모형과도 자연스런 접목이 시도될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 유역의 잠재증발산량 분포를 추정 하였으나, 향후 지속적인 연구를 통해 여러 가지 식생지수와 센서의 반사도 및 방사휘도 등에 대한 분석과 이에 따른 유역 증발산량의 분포를 판단하고자 한다. 

## 참고문헌

- 채효석. 1998. 원격탐사와 GIS를 이용한 지표면 열수지 요소 추출기법에 관한 연구, 전북대학교 박사학위 논문
- 채효석, 김성준, 정관수. 1999. 격자기반의 일증발산량 추정모형 개발. 한국수자원학회 32(6):721-730.
- 채효석, 김광은, 김성준, 김영섭, 이규성, 조기성, 조명희. 2002. 환경원격탐사, 시그마프레스, 584쪽.
- Baldocchi, D. C., S. B. Verma and N. J. Rosenberg. 1985. Water use efficiency in a soybean field: Influence of plant water stress, *Agri. For. Meteorol.*, 34:53-65.
- Brest, C. L. and S. N. Goward. 1987. Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data, *Int. J. Remote Sensing*, 8:351-367.
- Chen, T. M. and T. A. Black. 1992. Defining Leaf Area Index for Non-flat Leaves, *Plant, Cell and Environment*, 15:421-429.
- Choudhury, B. J., S. B. Idso and J. R. Reginato. 1987. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation, *Agri. For. Meteorol.* 39:283-297.
- Clothier, B. E., K. L. Clawson, P. J. Pinter, M. S. Moran, R. J. Reginato and R. D. Jackson. 1986. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa, *Agri. For. Meteorol.* 37:319-329.
- Cohen, W. B. 1991. Response of Vegetation Indices to Changes in Three Measure of Leaf Water Stress, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(2):195-202.
- Gardner, B. R., and B. L. Blad. 1986. Evaluation of Spectral Reflectance Models

- to Estimate Corn Leaf Area While Minimizing the Influence of Soil Background, *Remote Sensing of Environment*, 20: 183-193
- Gruber, A. 1977. Determination of the earth-atmosphere radiation budget from NOAA satellite data, NOAA/NESS Tech. Rep. No.76.
- Huete, A. F. and H. Q. Liu. 1994. An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric and Soil Correcting Variant of the Normalized Difference Vegetation Index for the MODIS-EOS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4):897-905.
- Idso, S. B. and R. D. Jackson. 1975. Thermal radiation from the atmosphere, *Agric. For. Meteorol.*, 10:467-471.
- Jensen, M. E., R. D. Burman, and R. G. Allen. 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. American Society of Civil Engineers, New York 332pp.
- Jing M. Chen and Josef Cihlar. 1996. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM Images, *Remote Sens. Environ.* 55:153-162
- Monteith, J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 107:1-27.
- Penman, H. L. 1956. *Evaporation : An introductory survey*. Netherlands J. Agric. Sci. 1:9-20.
- Perry, C. R. and L. F. Lautenschlager. 1984. Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices, *Remote Sensing of Environment*, 14:169-182.
- Peterson, D. L., Spanner, M. A., Running, R. W. and Band, L. 1987. Relationship of thematic mapper simulator data to leaf area index of temperate coniferous forest. *Remote Sens. Environ.*, 22:323-341.
- Qi., J., F. Cabot, M. S. Moran and G. Dedieu. 1995. Biophysical Parameter Estimations Using Multi-directional Spectral Measurements, *Remote Sensing of Environment*, 54:71-83.
- Ramsey, R. D., A. Falconer and J. R. Jensen. 1995. The Relationship between NOAA-AVHRR NDVI and Ecoregions in Utah, *Remote Sensing of Environment*, 8:307-312
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograph Rev.* 38:55-94.
- Wiegand, C. L., S. J. Maas, J. K. Aase, J. L. Hatfield, P. J. Pinter, Jr., R. D. Jackson, E. T. Kanemauasu, and R. L. Lapitan. 1992. Multisite Analysis of Spectral- Biophysical Data for Wheat, *Remote Sensing of Environment*, 42:1-21
- Yujie Wang. 2002. *Assessment of the MODIS LAI and FPAR Algorithm : Retrieval Quality, Theoretical Basis and Validation*. Ph.D. Dissertation Boston Univ. 125pp.
- <http://dataware.kict.re.kr> 