

인공위성 자료를 활용한 광역증발산량의 산정방법 개발*

신사철^{1*} · 안태용²

Development of Estimating Method for Areal Evapotranspiration using Satellite Data*

Sha-Chul SHIN^{1*} · Tae-Young AN²

요 약

증발산 현상은 중요한 수문순환과정 중의 하나로서 지상의 수분으로부터 발생하는 증발과 식물의 잎에서 발생하는 증산 과정을 합한 것이다. 증발산량을 산정하는 방법은 토양수분으로부터 간접적으로 추출하는 방법, 증발산량계에 의한 직접 추출방법 및 물수지 혹은 에너지수지를 이용하는 방법 등 매우 다양하다. 그러나 이러한 방법을 이용하여 지형 및 식생 등을 포함하는 지역적 특성을 고려하여 정확한 증발산량을 산정한다는 것은 대단히 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 인공위성 자료를 활용하여 지역적 특성을 고려한 증발산량 산정 모형의 개발을 목표로 하고 있다. 증발산현상은 기상조건에 큰 영향을 받으며, 그 기상조건은 그 지역의 식생피복 및 식생 성장에 많은 영향을 주게 된다. 이러한 점에서 식생정보는 그 지역의 복잡한 기상정보의 이력을 포함하고 있다고 볼 수 있으며, 식생지표와 증발산량과의 사이에는 높은 상관관계가 성립한다. 따라서 본 연구에서는 NOAA/AVHRR 자료에서 얻어진 정규화식생지수(NDVI)를 이용하여 우리나라 전역에 대한 증발산량 산정 모형을 개발하였다.

주요어 : 증발산량, 정규화식생지수, NOAA/AVHRR

ABSTRACT

One of the most important hydrologic components is evapotranspiration. It is a process by which water is evaporated from moist land surfaces and transpired into atmosphere by plants. There are many methods of estimating evapotranspiration rate and its potential such as the methods of soil-moisture sampling, lysimeter measurements, water balance, energy balance, groundwater fluctuations and evapotranspiration. But it is very difficult to estimate evapotranspiration in terms of regional discrete characteristics of topography and/or vegetation. The evapotranspiration is strongly affected by ground covering vegetation, and the degree of

2007년 4월 12일 접수 Received on April 12, 2007 / 2007년 6월 13일 심사완료 Accepted on June 13, 2007

* 이 연구는 2005년 안동대학교 국제학술교류사업의 지원으로 수행되었음.

1 안동대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Andong National University

2 율촌코퍼레이션 수자원부 Yulchon Corporation

※ 연락처 E-mail : scshin@andong.ac.kr

vegetation growth. In order to grasp vegetation condition over a vast study area, NDVI (Normalized Difference Vegetation Indices) calculated from the data obtained from NOAA/AVHRR were utilized. Through multi-regression analysis, we developed a model equation to estimate the evapotranspiration using NDVIs and temperature data.

KEYWORDS : *Evapotranspiration, NDVIs, NOAA/AVHRR*

서론

증발산량은 중요한 수문순환과정 중의 하나이며, 우리나라 전역을 포함하는 넓은 지역에 대한 증발산량의 추정에는 이용 가능한 수자원의 확보측면에서도 대단히 중요한 요소이다. 그러나 지금까지의 지점 증발산량을 구하는 방법으로는 어느 한 지점의 상세한 증발산량의 규명을 위해서는 적합하나, 본 연구와 같이 넓은 지역에 걸친 분포 자료로서의 정보를 추출하기 위해서는 수많은 지점증발산량이 필요하게 되므로 실질적으로 분포량의 추정은 곤란하다.

따라서 이러한 경우 넓은 지역을 한꺼번에 포함할 수 있는 인공위성 자료를 활용하는 것이 대단히 유용하며, 그 결과는 공간적 자료의 질적 불균형에 대한 오차를 피할 수 있다는 장점도 갖는다. 그러나 인공위성 원격탐사 자료는 필요한 모든 정보를 제공할 수 있는 만능은 아니며, 단순히 관심 대상 지역에서 반사 혹은 방출되는 전자기에너지를 수동적으로 기록하여 공간적, 분광적 및 시간적 정보로 제공해 줄뿐이다. 따라서 인공위성 자료를 이용하여 증발산량을 산정하고자 할 때 증발산량을 가장 잘 표현해 주는 정보를 해당 인공위성 자료로부터 추출하여야 하는 것이 가장 중요한 요소이다.

우리나라는 전 국토의 70%가 산지로 이루어져 있으며 식생의 양과 변화양상에 의하여 그 지역의 특성이 결정된다고 해도 과언은 아니다. 어떤 지역의 식생과 관련된 정보는 그 지역의 기후, 토양, 지질 및 지리적 특성을 밝히는 데 중요한 역할을 한다. 또한 Running과

Nemani(1988)는 식생지수 중에서 가장 많이 사용되는 정규화식생지수(Normalized Difference Vegetation Index ; NDVI)와 증발산량과의 상관관계를 보고하기도 하였다.

일반적으로 인공위성 자료를 이용한 식생의 관측은 가시광선 및 근적외선 영역의 자료를 이용하여 파악하며 원격탐사 자료의 활용측면에서 가장 활발한 이용 대상이다. 녹색의 잎이 표시하는 분광반사 특징에 착안하면, 잎의 성장기는 클로로필이 형성되는 단계이며, 잎의 성장단계에서는 적색 파장대의 흡수는 발생되지 않으나, 잎의 성장이 진행되면서 적색 파장대의 흡수가 발생한다. 성장한 잎에서는 약 $0.68\mu\text{m}$ 의 파장대에서 최대 흡수가 발생하며, 약 $0.55\mu\text{m}$ 부근 파장대에서 가시광선의 최대반사율을 보이고 있다. 잎이 성장함에 따라 잎은 진한 녹색으로 변화하며, 녹색의 반사율이 낮아지고 근적외 파장대의 반사율이 증가한다.

이러한 특성을 잘 이용하면 식생 상황을 적절히 파악할 수 있으며, 가장 널리 사용되고 있는 것이 NDVI이다. NDVI를 산정하기 위해 가장 널리 사용되는 인공위성 자료는 NOAA/AVHRR과 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 위성자료이며, 박정술 등(2006)은 MODIS로부터 얻어진 NDVI를 이용하여 봄 가뭄을 평가하였다. 고분해능 기상센서인 MODIS는 미국 NASA의 지구감시계획(EOS: Earth Observing System)에 의해 1999년 12월에 발사된 지구관측위성 TERRA 위성에 탑재된 센서이다.

NOAA/AVHRR 자료를 이용한 NDVI를 증발산량 산정에 도입한 국내의 연구에서는 신사철 등(1995)이 처음이며 우리나라를 대상으

로 NDVI와 증발산량과의 선형 비례관계의 입증에 주목적을 두고 있다. 신사철과 안태용(2004)은 이러한 정규화 식생지수를 한강 유역의 증발산량 추정에 활용하기도 하였으며, 신사철 등(2006a)은 광역의 증발산량 분포자료를 가뭄지역 판별에 활용하기도 하였다. 또한 신사철 등(2006b)의 연구에서는 금강유역을 대상으로 기상자료와 NDVI를 조합하여 증발산량을 산정하는 간편법을 제시하였으며, 우리나라 전역에 대한 분석은 추후의 연구로 남겨두고 있다. 이에 본 연구에서는 NOAA/AVHRR 자료로부터 우리나라 전역에 대한 정규화식생지수를 산정하고 우리나라 전역을 5개의 권역으로 구분하여 권역별로 증발산량을 산정할 수 있는 추정식을 개발하였다.

NOAA 위성과 식생분석

1. NOAA 위성

NOAA 위성은 미국 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration)에 의해 운영되고 있는 제 3세대 기상관측위성이

다. NOAA 시리즈는 1960년에 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에 의해 발사된 실험용 기상위성 TIROS(Television and Infrared Observation Satellite)가 최초이며, 그 후 실용위성으로 ESSA(Environmental Survey Satellite)가 운영되었다. NOAA 위성의 궤도는 완전 원에 가까운 태양동기 극궤도이고, 궤도고도는 870km 및 833km, 궤도경사각은 98.9도 및 98.7도, 주기는 101.4분이다. NOAA 위성의 이용목적은 정상적인 기상업무이며, 항상 2개의 위성이 운용되고 있다. 하나의 위성에 의해 지상의 동일지점을 하루에 적어도 2회 관측이 가능하므로 2개의 위성으로 총 4회 이상의 관측이 가능하다.

NOAA 위성에 탑재되어 있는 주요 센서는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)과 TOVS(TIROS Operational Vertical Sounder)가 있다. AVHRR 센서는 다섯개의 Channel로 이루어져 있으며 구름의 분포, 지표면의 온도분포 등의 관측을 목적으로 하는 센서이며, TOVS는 대기 중의 기온 및 습도의 연직분포를 구하기 위한 다밴드 분광

TABLE 1. Spectral bands of NOAA/AVHRR

channel	wavebands(μm)	특 징
1	0.58~0.68 (visible)	구름, 눈, 호수나 바다의 결빙, 오염, 열대성 폭풍을 탐지하는데 사용되며, 화산 활동이나 에어로졸, 먼지폭풍의 추적에 가장 적합한 channel이다.
2	0.725~0.11 (near infrared)	흡수체가 가시영역에서 보다 더 강하게 근적외 복사를 흡수하기 때문에 해수면과 육지를 구분하는데 사용되며, ch.1과 같이 해빙이나 눈이 쌓인 지역을 찾을 때 사용.
3	3.55~3.93 (middle infrared)	높은 에너지를 갖는 물체에 민감하기 때문에 가스로 이루어진 섬광, 산불, 활동 중인 화산, 연기혼적등과 같은 뜨거운 지점을 탐지하는데 사용된다. 특히 구름과 지표온도를 탐지 하는데 뛰어나며 주간에는 얼음 덩어리와 구름, 얼음과 물을 구분하는데 사용.
4	10.3~11.3 (thermal infrared)	주·야간에 해수온도와 구름의 온도 탐지에 사용되며, 중위도에서 해수의 흐름, 전선, 권운의 범위를 찾는 데도 사용.
5	11.5~12.5 (thermal infrared)	ch.4의 특징과 비슷하며 더불어 수증기 감소 효과와 적도 지방에서 해수 온도를 결정하는데 사용.

방사계이다. AVHRR의 가시 및 근적외 채널 자료로부터 구해지는 NDVI는 여러 분야에서 이용되고 있으며, 본 연구에서 이용하는 자료도 이 AVHRR 센서에 의한 것이다. 표 1은 NOAA/AVHRR 센서의 밴드별 특징을 나타낸 것이다.

2. NOAA/AVHRR 자료의 수집과 전처리

본 연구에 사용된 NOAA/AVHRR 자료는 우리나라 기상청의 협조를 받아 취득하였으며 1999~2001년도의 영상자료를 제공받아 구름이 적고 왜곡이 적은 NOAA 위성자료 중 3~11월의 자료를 대상으로 월단위로 분석을 시도하였다. 기상청에서 제공받은 NOAA 위성자료는 좌표의 속성이 부여되지 않은 텍스트 형태의 구조를 갖고 있으므로 이를 실제 지리 좌표와 일치시키기 위해서는 기하보정이 필요하다. GCP(Ground Control Point)를 이용하여 기하보정을 실시할 때, GCP는 화상에서 명확히 식별이 되는 점이어야 하나 NOAA 위성의 경우 공간 분해능이 낮아 위성영상에서 식별되는 육지상의 점을 선정한다는 것은 실질적으로 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 기준이 될 수 있는 해안선 벡터자료를 이용하여 NOAA 위성의 기하보정을 실시하였으며 TM(중부원점)좌표에 일치하도록 하였다.

일별로 얻어진 NOAA 위성 자료 전체에 대한 기하보정을 실시한다면 상당한 시간과 노력이 요구된다. NOAA 위성 자료는 항상 동일한 형태로 제공되므로 모든 영상에 대하여 기하보정을 실시한다는 것은 대단히 비효율적이다. 또한 매일 관측되는 NOAA 위성은 구름의 영향으로 인하여 정확한 지표면을 확인할 수 없는 경우가 많으므로 정확한 기하보정을 어렵게 하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 기하보정의 횟수를 최소화하기 위하여 최종적으로 작성된 월별 NDVI를 대상으로 기하보정을 실시하며, 사용된 프로그램은 영상처리 전용 소프트웨어인 ERDAS IMAGINE을 이용하였다.

3. 식생분석

식생지수는 식생의 분포와 상태를 나타내는 지수이며, 지표면에서 식물과 그 이외의 물체들에 대한 분광반사특성을 이용하여 식물에 관한 정보를 하나의 지도로 표현한 것이 식생도이다. 이러한 식물들에 대한 정확한 정보들은 인간생활과 밀접한 관련이 있음에도 불구하고 현장조사방법으로 식생지수의 정보를 수집하는 방법은 비용이 많이 들고 시간이 많이 걸리므로 정확한 식생지수를 산정한다는 것은 거의 불가능하여 정확한 식생의 정보를 얻기가 쉽지 않다. 따라서 원격탐사를 이용한 식생도의 작성은 상당히 효율적이며 경제적이다. 또한 이러한 식생지수는 일반적으로 식물의 생체량, 생산량, 엽면적지수, 광합성량 등과 밀접한 관련이 있는 지표로 알려져 있다.

녹색 식물의 반사특성은 다른 물질들과는 달리 가시광선 영역과 근적외선 영역 사이에서 큰 차이를 보이는 반면에 식물이 아닌 토양 등은 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 또한 근적외선 파장영역에서의 식물의 반사특성은 식물의 종류, 엽량, 수관밀도 등에 따라 크게 좌우되기 때문에 식물의 이러한 특성도 식생지수에 잘 나타날 수 있다.

광합성색소의 작용이 활발한 건강한 식물은 입사된 태양에너지의 80~90%를 가시광선영역에서 흡수하여 반사율이 매우 낮아지는 반면, 노화된 식생은 가시광선 파장에서 건강한 식생보다 높은 반사도를 나타내게 된다. 건강한 식물은 근적외선 영역(0.7~1.1 μm)에서 입사된 태양에너지의 40~50%를 반사하는 반면 가시광선 영역(0.4~0.7 μm)에서는 식물의 엽록소에서 입사광선의 80~90%를 흡수한다. 고사했거나 노화하고 있는 식물의 경우 가시광선 영역(0.4~0.7 μm)에서 건강한 식물보다 많은 양을 반사하고 근적외선 영역에서는 더 적은 양의 빛을 반사한다. 대부분의 식생지수는 식물의 이러한 반사특성에 근거하고 있다.

이러한 식생지수의 산출은 가시광선과 근적

외선의 과장대를 가지고 있는 모든 영상자료에서 산출이 가능하다. 특히 NOAA/AVHRR 영상자료의 경우 넓은 촬영범위와 빠른 촬영주기를 이용하여 대륙 및 전지구 규모의 식생지수영상을 주기적으로 산출하여 지구환경과 관련된 중요한 자료로서 활용되고 있다.

정규화 식생지수 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)는 식생 분석을 위해 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 식생지수이다 (Justice 등, 1985; Tucker 등, 1985a, 1985b; Townshend and Justice, 1986; Prince and Astle, 1986; Benedetti 등, 1994).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

이 정규화식생지수를 통하여 넓은 지역에 대한 개략적인 식생상태를 파악하기 위해서는 NOAA 위성에 탑재되어 있는 AVHRR 센서가 유효하다. NOAA/AVHRR 자료를 이용하면 NDVI는 다음 식에 의해 계산된다.

$$NDVI = \frac{Ch.2 - Ch.1}{Ch.2 + Ch.1} \quad (2)$$

여기서, *Ch1*은 NOAA/AVHRR의 channel 1(가시광선 영역)의 반사율이며, *Ch2*는 channel 2(근적외선 영역)의 반사율이다.

본 연구를 수행하기 위해 첫 번째 중요한 단계는 정확한 NDVI 자료를 생성하는 것이다. 본 연구에서 대상으로 하는 기간은 1999~2001년이며, 사용한 위성자료는 NOAA/AVHRR 자료로서 적설의 영향으로 인하여 지표면의 정확한 관측이 불가능한 겨울철의 자료는 분석에서 제외하고 3월부터 11월까지를 분석기간으로 설정하였다. AVHRR 센서는 광학센서이며, 대상지역이 구름으로 덮여 있는 경우 위성의 센서가 읽는 반사치는 바로 그 구름의 반사치가 되어 구름 아래 부분의 지표면에 대한 반사치는 반영되지 못한다. 더욱이 태양의

고도각이 낮은 경우는 구름에 의해 생긴 음영이 그 옆 지역의 반사치에도 영향을 미치는 등 구름의 존재는 NDVI를 과소평가하게 한다.

본 연구의 경우처럼 넓은 지역을 대상으로 하는 경우 우리나라를 대상으로 구름의 영향이 전혀 없는 날의 위성자료를 얻는다는 것은 불가능하다. 그러나 지표면의 물리적 특성을 파악하고자하는 분석에서는 어떠한 방법에 의해서든 구름의 영향을 제거한 NDVI를 작성할 필요가 있다. 만약 동일지점의 NDVI가 단기간에 급격하게 저하하는 경우 그 자료는 구름의 영향을 받은 것이라 생각할 수 있다. 반대로, 일정기간 동안의 NDVI가 가장 크게 나타난 자료가 가장 구름의 영향을 받지 않은 것이라 생각할 수 있다. 따라서 복수의 NDVI로부터 각 화소별로 최대치를 선택함으로써 구름의 영향을 최소화한 NDVI 자료를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 기상청에서 수집한 일별 관측 자료로부터 기하학적 문제가 없고 특별한 이상치가 발견되지 않는 한 모든 자료를 활용하여 월별 NDVI를 산정하였다.

또한 본 연구에서는 각기 다른 식생특성을 모두 고려하여 분석할 수 없으므로 식생조건이 유사한 항목으로 분류하는 것이 필요하다. 이러한 분류 과정은 일반적인 피복분류과정과 동일하며 1등급은 수역, 2등급은 도시지역, 3등급은 농경지, 4등급 및 5등급은 식생지역으로 분류하였다. 이러한 식생등급분류에 대해서는 신사철과 안태용(2004)에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

증발산량의 산정

1. 기준증발산량 산정

NDVI로부터 증발산량을 산정하는 방법을 개발하기 위해서는 분석 시 사용할 증발산량이 필요하다. 기준으로 사용할 증발산량은 가장 정확한 값이어야 하나 우리나라 전역에 대한 증발산량을 측정한다는 것은 불가능하므로 경험

적으로 제안된 방법을 사용하는 것으로 하였다.

보완관계식은 Morton(1978)에 의해 제안된 유역 증발산량 추정방법으로 전통적인 증발산 추정모형이 잠재증발산이라는 중간과정을 거쳐 유역의 실제증발산량을 계산하는데 반하여 기상자료로부터 직접 실제증발산량을 계산한다는 점에서 새로운 접근방법이다. 전통적 개념의 증발산량 모형은 증발산에 영향을 미치는 원인을 밝혀 이들을 계량화함으로써 증발산량을 추정하는 확정론적 접근인데 반하여, Morton의 보완관계식에 의한 유역 증발산량 추정모형은 증발산이 일어났을 때 변화되는 결과, 즉 기온의 하강과 습도의 증가로부터 증발량의 크기를 추정하는 결과론적 접근이다. 즉 Morton 모형은 모형 매개변수 중 온도, 습도 및 복사에 관한 매개변수를 포함하고 있어서 기존의 증발산량 산정모형보다는 산정결과에 대한 신뢰도가 높은 모형이라 할 수 있다.

Morton의 보완관계식에 의한 유역 증발산량모형은 유역의 실제증발산량과 지점의 잠재증발산량의 합이 유역 잠재증발산의 2배와 같다는 것이며, 이는 상호보완적 관계로서 그 관계를 표시하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_T + E_{TP} = 2E_{TW} \quad (3)$$

여기서, E_T 는 유역의 실제증발산, E_{TP} 는 지점의 잠재증발산, E_{TW} 는 유역의 잠재증발산량이다. 이 관계에서 중요한 것은 E_T 와 E_{TP} 는 상호보완적 관계로서 그 합은 $2E_{TW}$ 으로서 일정하게 된다. 수분이 전혀 공급되지 못할 때에 E_T 는 0이 되며, E_{TP} 최대치로서 $2E_{TW}$ 이다. 따라서 유역의 실제증발산량은 다음의 식(4)와 같다.

$$E_T = 2E_{TW} - E_{TP} \quad (4)$$

그러나 Morton에 의한 보완관계식은 산정과정에서 경험식을 이용하여 구하여야 하는 요소가 대단히 많으며, 불필요하게 복잡한 과정을 취하는 것이 단점으로 지적되어 왔다. 따

라서 Brutsaert and Stricker(1979)는 Penman 법과 Priestly-Taylor법을 직접 이용하는 개량된 보완관계식을 제안하였다. 본 연구에서는 이와같은 Morton의 유역 증발산량 산정방법에 근거한 Brutsaert and Stricker에 의해 수정된 다음 식(5)를 이용하였다.

$$E_a = 2E_p - E_{pp} \quad (5)$$

여기서, E_a 는 실제증발산량(mm/day), E_p 는 Priestly-Taylor 식에 의한 잠재증발산량(mm/day), E_{pp} 는 Penman 식에 의한 잠재증발산량(mm/day)이다.

계산 시에 필요한 기상자료는 대기온도, 일조시간, 상대습도, 풍속 및 일사량이며 이러한 기상정보는 전국의 67개 기상관측소(그림 1)를 대상으로 획득하였다. 이와 같은 보완관계식을 이용하여 그림 2와 같은 우리나라의 주요 하천을 중심으로 5대 권역으로 구분하여 피복조건별의 증발산량을 산정하였다.

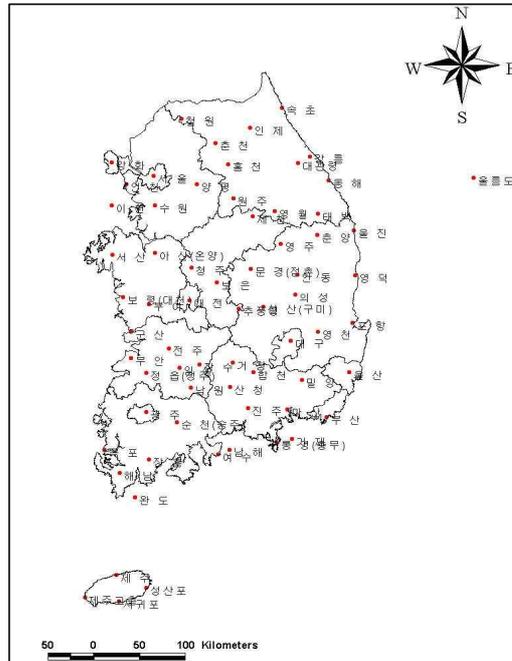


FIGURE 1. Location of weather stations



FIGURE 2. Location of study areas

2. 제안된 증발산량 산정 방법

본 연구에서는 NOAA/AVHRR 자료로부터 얻은 NDVI를 이용하여 우리나라 전역에 대한 증발산량을 공간적인 분포자료로 산정하기 위한 방법을 제안하고자 한다. 어느 지점의 NDVI가 그 지점의 식생상태를 잘 표현하고 있다는 것은 일반적으로 입증된 사실이며, 그 점의 식생상태는 기상상태를 반영하고 있으므로 증발산량, NDVI 및 기상조건의 상관관계를 생각할 수 있다는 것이 기본적인 접근의 시작이다. 실제로 Running과 Nemani(1998)는 NDVI와 증발산량과의 높은 상관성을 보고하였다.

기상조건 중에서 기온은 증발산량과 높은 상관성이 있으며, 무엇보다도 정확하게 관측되는 기상요소이다. 따라서 본 연구에서는 NDVI와 온도를 변수로 하는 증발산량 추정식을 개발하고자 한다. 일반적으로 증발산량은 식생의 변화보다 기상조건에 더욱 민감하게 반응한다. 예를 들어 5월의 경우 기온이 높아짐에 따라

증발산량은 급격히 증가하나 식생의 활성화도는 약간의 지체현상을 보여준다. 반면에 9월의 경우 기온의 하강에 따라 증발산량은 급격히 저하하나 식생의 활성화도는 상대적으로 민감하게 반응하지 않는다. 따라서, 전체기간을 하나의 분석기간으로 정하여 증발산량의 산정식을 개발하게 되면 이러한 측면에서의 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 오차를 최소화하기 위해 적절한 분석기간을 설정할 필요가 있으며, 식생의 성장과정에 착안하면 식생이 성장하는 시기(성수기)와 저장하는 시기(비성수기)로 나누어 분석하는 것이 가장 합리적이다.

상관관계 분석을 통해 상관성이 높게 나타난 증발산량, NDVI, 온도자료를 이용하여 다중회귀분석을 통하여 권역별로 다중회귀분석을 통하여 증발산량 추정식을 개발하였다. 다중회귀분석을 통해 얻어진 회귀방정식을 결정계수(R^2)와 함께 표시하면 표 2와 같다. 본 분석은 광학위성인 NOAA 위성 자료를 사용하기 때문에 적설의 영향이 없는 3월부터 11월까지를 대상으로 한다. 우리나라 전역에 대해 5개 권역으로 나누어 표 2와 같이 증발산량의 추정식을 개발하였으며, 이는 각 권역별로 증발산량의 분포를 구하고자 할 때 유용하게 이용할 수 있을 것이다. 도시 지역에 상당하는 식생 2등급의 경우 상대적으로 식생 면적이 다른 등급에 비하여 적으며 그러한 결과로서 정확도도 약간 저하하는 것으로 나타났다. 다른 지역의 경우 상당히 높은 정확도로 증발산량을 산정할 수 있음을 알 수 있다.

그러나 표 2와 같은 권역별 증발산량 산정식을 사용하는 경우 각 권역별로 보다 정확한 증발산량을 산정할 수 있다는 장점은 있으나, 우리나라 전역에 대한 증발산량을 구하고자 하는 경우에도 권역별로 서로 다른 식을 사용해야 한다는 불편함이 따른다. 따라서 이러한 경우를 위하여 우리나라 전역으로 확장할 수 있는 추정식을 개발하였으며 그 결과는 표 3과 같다. 각 권역별 추정식과 우리나라 전역

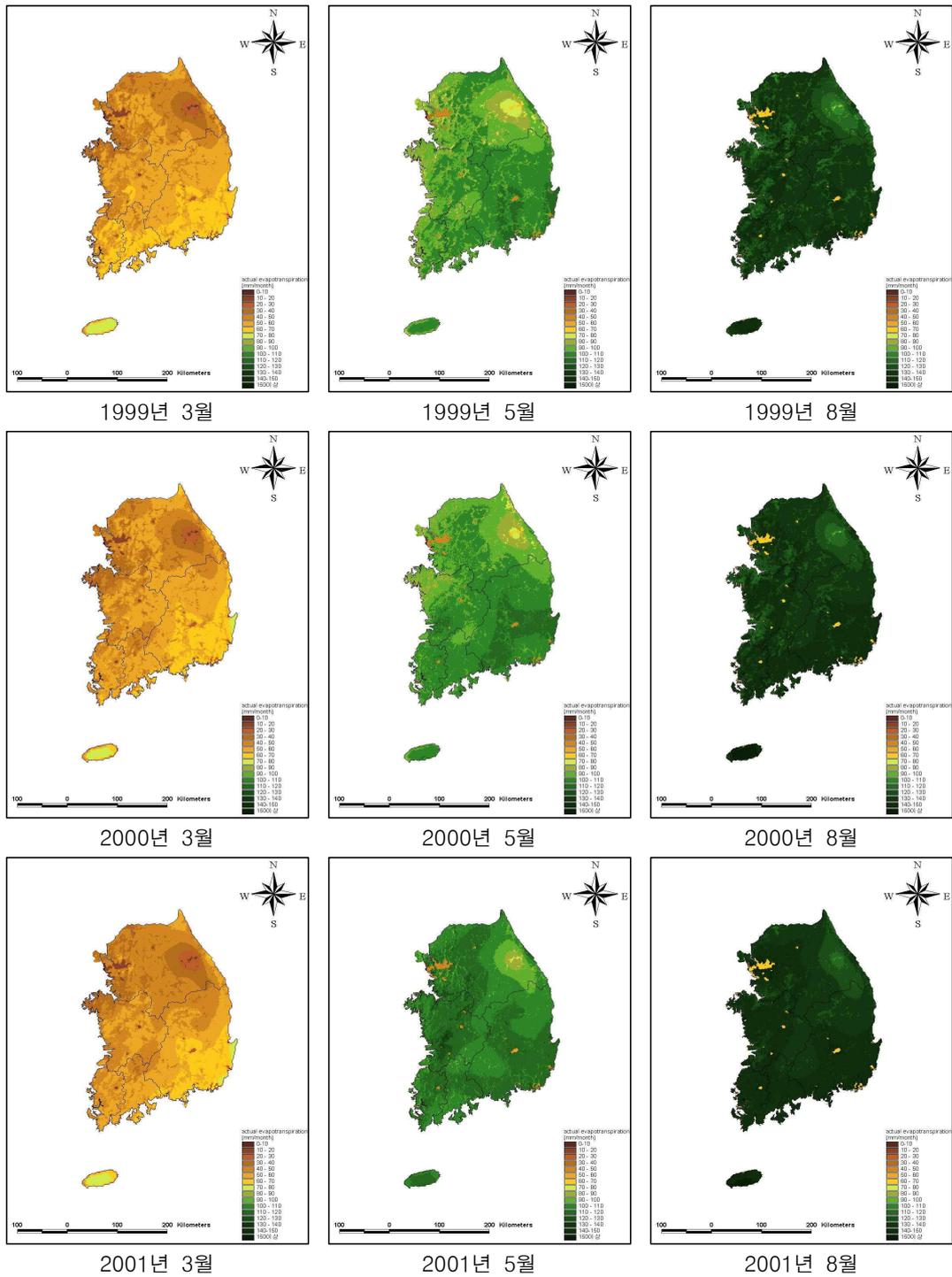


FIGURE 3. Distribution of evapotranspiration over the Korea

TABLE 2. Proposed equations for evapotranspiration of the study regions

구분	2등급(도시지역 상당)			
	3-11월		R ²	
한강	E=6.04-0.4ndvi+2.11temp		0.78	
낙동강	E=3.999-38.46ndvi+2.4203temp		0.75	
금강	E=7.297-29.36ndvi+2.3602temp		0.76	
영산강	E=1.328-58.01ndvi+2.9629temp		0.74	
섬진강	E=2.87+32.34ndvi+1.7156temp		0.61	
구분	3등급(농경지 상당)			
	3-8월	R ²	9-11월	R ²
한강	E=19.3-41.6ndvi+5.1temp	0.89	E=3.97+0.4ndvi+3.39temp	0.99
낙동강	E=17.88-121.75ndvi+6.3259temp	0.88	E=-5.02-6.83ndvi+3.7526temp	0.92
금강	E=25.195-101.85ndvi+5.9726temp	0.92	E=-0.269-30.3ndvi+4.2379temp	0.93
영산강	E=22.87-118.11ndvi+6.4071temp	0.88	E=-11.36-62.69ndvi+5.268temp	0.85
섬진강	E=31.03-70.08ndvi+4.6985temp	0.80	E=-3.34-14.01ndvi+3.433temp	0.72
구분	4등급(활엽수 상당)			
	3-8월	R ²	9-11월	R ²
한강	E=21.6+1.6ndvi+4.38temp	0.91	E=4.28+0.5ndvi+3.77temp	0.97
낙동강	E=24.619-102.01ndvi+6.215temp	0.91	E=-5.89-1.37ndvi+4.123temp	0.89
금강	E=34.846-82.84ndvi+5.564temp	0.90	E=1.603-39.3ndvi+4.797temp	0.90
영산강	E=33.07-95.23ndvi+6.0419temp	0.86	E=-10.75-55.88ndvi+5.741temp	0.81
섬진강	E=33.71-54.85ndvi+4.7133temp	0.84	E=-2.13-19.32ndvi+3.936temp	0.72
구분	5등급(상록수 상당)			
	3-8월	R ²	9-11월	R ²
한강	E=26.1+25.3ndvi+3.86Temp	0.90	E=6.72-1.3ndvi+4.03Temp	0.98
낙동강	E=25.62-22.75ndvi+5.0468temp	0.86	E=-2.27-9.48ndvi+4.435temp	0.91
금강	E=36.67-16.46ndvi+4.571temp	0.86	E=6.57-46.28ndvi+5.1422temp	0.91
영산강	E=34.41-28.08ndvi+5.1235temp	0.82	E=-6.4-44.52ndvi+5.737temp	0.82
섬진강	E=32.59+9.1ndvi+3.7988temp	0.81	E=4.82-37.88ndvi+4.367temp	0.75

TABLE 3. Proposed equations for evapotranspiration over the Korea

구분	한반도(남한) 전체			
	3-8월	R ²	9-11월	R ²
2등급	E=4.33-15.69ndvi+2.3085temp		0.70	
3등급	E=23.27-89.05ndvi+5.6888temp	0.86	E=-1.999-16.66ndvi+3.841temp	0.83
4등급	E=29.08-64.32ndvi+5.3866temp	0.87	E=-1.007-21.76ndvi+4.368temp	0.82
5등급	E=31.04-8.91ndvi+4.5501temp	0.84	E=3.297-27.49ndvi+4.663temp	0.84

에 대한 추정식의 결정계수로부터 알 수 있듯이 우리나라 전역으로 확장하면서 결정계수가 약간 낮아졌으나 그 차이는 그다지 크지 않으며 비교적 높은 결정계수를 유지하고 있음을 알 수 있다. 표 3을 이용하여 우리나라 전역에 대한 증발산량의 분포를 산정하면 그림 3과 같다. 1999년부터 2001년에 걸쳐 3월부터 11월까지 월별 증발산량을 구하였으며, 그 중 그림 3에 3개년간의 3월, 5월 및 8월의 증발산량을 도시하였다. 또한, 회귀방정식을 통해 얻어진 증발산량을 유역별, 식생 등급별로 평균하여 보완관계식에 의해 구해진 증발산량 값과 비교한 결과를 그림 4에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 높은 정확도로 회귀방정식을 통해 우리나라 전역의 증발산량을 산정할 수 있음을 알 수 있다.

결론

최근 인공위성 자료를 이용하여 넓은 지역의 증발산량을 산정하고자 하는 시도가 이루어지고 있으나, 기상정보 등을 비롯한 지상정보와의 조합이 대부분으로 넓은 지역에 대한 적용은 어려운 점이 많다. 따라서 본 연구는 위성자료를 활용하여 넓은 지역에 대하여 증

발산량을 용이하게 파악할 수 있는 방법을 개발하는 것을 목표로 하였다. 기상자료의 밀도가 불충분한 식생지역, 더욱이 넓은 지역을 대상으로 하는 경우 많은 매개변수를 필요로 하는 정밀한 추정법을 이용하여 증발산량의 분포를 추정하는 것은 불가능한 일이다.

우리 나라의 대부분은 산림으로 덮여있으며 식생을 변수로 하는 증발산량 추정법은 대단히 유효하게 사용될 수 있다. 기존의 연구(신사철, 1995; 신사철과 안태용, 2004)에서 우리나라 전역에 대한 NDVI와 증발산량과의 관계에 높은 상관관계가 성립함을 입증하였으며, 최근 신사철 등(2006a,b)의 연구에서는 정확도 제고를 위하여 하나의 유역을 대상으로 기온과 NDVI 자료를 조합하여 입력자료로 사용하는 증발산량 산정모형을 제안하였다. 본 연구에서는 이러한 연구를 우리나라 전역 및 권역별로 확대하여 증발산량 분포도를 얻기 위한 추정식을 개발하였다. 전반적으로 회귀방정식의 결정계수가 0.8~0.9 정도의 값을 보이고 있어 비교적 높은 정확도로 추정 가능한 것으로 나타났다. 도시지역의 경우 식생보다는 기상요소에 의해 증발산량이 지배되는 경향을 나타내어 정확도는 약간 저하하고 있다. 5대 권역 중에서 한강권역에서 가장 좋은 결과를

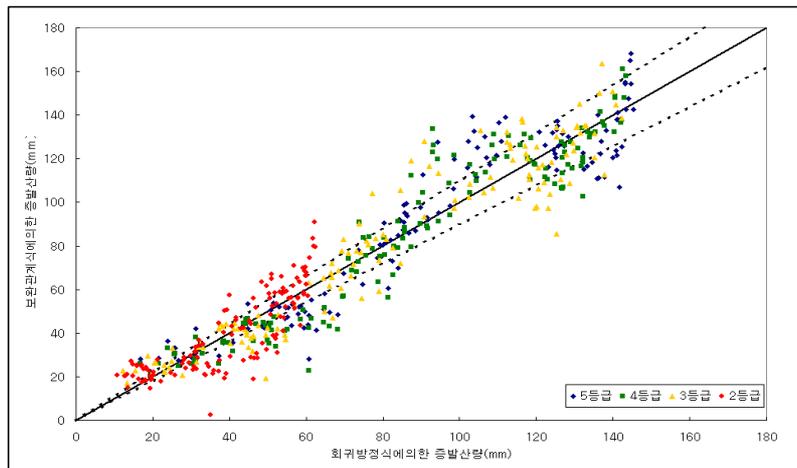


FIGURE 4. Comparison between the results by the two methods

보이고 있으며, 섬진강권역에서 정확도는 가장 저하하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 증발산량 추정식은 우리나라를 전체 5개 권역으로 분할하여 우리나라 전체를 포함하도록 하였으며, 분할된 각 권역별로 증발산량을 산정할 수 있는 추정식을 제시하여 권역별로 증발산량의 분포가 얻어질 수 있도록 하였다. 또한 우리나라 전역에 대한 증발산량을 보다 더 용이하게 추정할 수 있도록 우리나라 전역을 대상으로 하는 단일의 증발산량 추정식을 개발하여 일시에 우리나라 전역에 대한 증발산량을 얻을 수 있도록 하였다. 이 경우 유역별로 적용하는 것보다는 정확성이 약간 저하하나 그 차이는 미소함을 알 수 있었다. 또한 우리나라 전역에 대한 증발산량 추정식을 이용하여 증발산량을 구할 경우 대략 10~20%의 오차 범위에서 증발산량을 산정할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 “2005년 안동대학교 국제학술교류 사업”의 지원으로 수행되었으며, 연구에 사용된 위성자료는 기상청으로부터 제공받은 것입니다. 이에 감사드립니다. **KAGIS**

참고 문헌

박정술, 김정탁, 이진희, 이규성. 2006. 봄 가뭄 평가를 위한 다중시기 MODIS 영상의 적용성 분석. 한국지리정보학회지 9(4):176-192.

신사철, 안태용. 2004. NDVI와 기온자료를 이용한 광역증발산량의 추정. 한국지리정보학회지 7(3):79-89.

신사철, 정수, 김정탁, 김주훈, 박정술. 2006a. NDVI를 이용한 가뭄지역 검출 및 부족수분량 산정. 한국지리정보학회지 9(2):102-114.

신사철, 澤本正樹, 김치홍. 1995. NOAA AVHRR data를 이용한 증발산량 추정. 한국수자원학회 논문집 28(1):71-79.

신사철, 황만하, 고익환, 이상진. 2006b. 식생 및

기온정보를 조합한 증발산량 산정을 위한 간편법 제안. 한국수자원학회 논문집 39(4):363~372.

- Brutsaert, W. and H. Stricker. 1979. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resources Research* 15:433-450.
- Justice, C. O., J. R. G. Townshend, B. N. Holben and C. J. Tucker. 1985. Analysis of the Phenology of Global Vegetation Using Meteorological Satellite Data. *International Journal of Remote Sensing* 8:1271-1318.
- Mortom, F. I. 1978. Estimating evapotranspiration from potential evaporation - practicality of an iconoclastic approach. *Journal of Hydrology* 38:1-32.
- Morton, F. I. 1983. Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and Their Significance to the Science and Practice of Hydrology. *Journal of Hydrology* 66:1-76.
- Priestly, C. H. B. and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100:81-92.
- Prince, S. D., and W. L. Astle. 1986. Satellite Remote Sensing of Rangelands in Botswana Landsat MSS and Herbaceous Vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 7:1533-1553.
- Running, S. W. and R. R. Nemani. 1988. Relating Seasonal Patterns of the AVHRR Vegetation Index to Simulated Photosynthesis and Transpiration of Forests in Different Climates. *Remote Sensing of Environment* 24:347-367.
- Townshend, C. R. G. and C. O. Justice. 1986. Analysis of the Dynamic of African Vegetation Using the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing* 7:1435-1446.
- Tucker, C. J., C. L. Vanpreat, M. J. Sharman and G. Van Ittersum. 1985a. Satellite Remote Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing Environment* 17:233-249.
- Tucker, C. J., J. R. G. Townsend and T. E. Goff. 1985b. African Land-Cover Classification Using Satellite Data. *Science*. 227:369-375. **KAGIS**