

〈論 文〉

NOAA-AVHRR data를 이용한 증발산량추정 Estimation of evapotranspiration using NOAA-AVHRR data

申 士 澈*, 澤本正樹**, 金 治 弘***

SHIN Sha Chul, SAWAMOTO Masaki and KIM Chi Hong

Abstract □ The purpose of this study is to estimate evapotranspiration and its spatial distribution using NOAA-AVHRR data. Evapotranspiration phenomena are exceedingly complex. But, factors which control evapotranspiration can be considered that these are reflected by conditions of the vegetation. To evaluate the vegetation condition as a fixed quantity, the NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) calculated from NOAA data is utilized. In this study, land cover classification of the Korean peninsula using property of NDVI is performed. Also, from the relationship between evapotranspiration and NDVI histograms, evapotranspiration and its distribution of the Han River basin are estimated.

요 지 : 본 연구의 목적은 NOAA-AVHRR data 를 이용하여 광역 지표면에서의 증발산량과 그 공간적인 분포를 추정하는 것이다. 증발산을 지배하는 많은 인자들은 그 점의 식생조건에 의해 잘 반영된다고 생각할 수 있으며, 그점의 식생의 량과 활성도를 정량적으로 표현할 수 있는 지표로서 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 NOAA data로부터 구한다. 본 연구에서는 이 NDVI의 계절변화로부터 한반도의 개략적인 피복상황을 분류하고, NDVI의 histogram과 증발산량과의 상관관계로부터 한강유역에 있어서의 증발산량과 그의 공간분포를 구하였다.

1. 서 론

최근 광역 지표면에 대한 수문과정의 해석과 수 자원량의 실태 파악의 중요성이 높아지고 있다. 우리나라의 경우, 강우량의 계절별 편중현상으로 인하여, 계절에 따른 물 수요의 불균형이 현저하여 물 순환 과정의 해석은 대단히 중요하다.

물 순환 과정에 있어서 증발산은 대기·식생·물 등의 인자가 복잡하게 관계되어 있으며, 현재의 시점에서 실 증발산량을 구한다는 것은 불가능에 가깝다. 따라서, 현재까지 일반적인 기상요소에 의한 증발산량의 추정방법들이 제안되어 왔다. 예를 들

면, 물분자의 이동은 증기압 경사에 비례한다는 공기역학적 방법, 증발산에는 열 에너지의 소비가 동반되는 것을 이용한 열 수지법, 열 수지법의 온도 경사를 온도-수증기압곡선을 이용하여 수증기압 경사로 치환한 Penman법, 또한, 온도만을 변수로 하는 Thornthwaite법과 Hamon법 등이 제안되어 왔다. 그러나 이들의 방법은 제한된 지점의 기상정보를 이용한 추정법으로서 광역 지표면으로부터의 증발산량이나, 그의 공간적인 분포의 추정에는 어려움이 있어, 인공위성 data를 이용한 광역 지표면에서의 증발산량 추정방법이 기대되어 왔다. 본 연구에서는 식생의 활성도와 증발산량과의 사이에는 상관관계가 있다는 것에 착안하여, NOAA

* 일본 東北大學 大學院 토목공학과 박사과정

** 일본 東北大學 工學部 토목공학과 교수

*** 전 성균관대학교 토목공학과 교수

data로부터 식생의 양과 활성도를 나타내는 지표로서 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 구하여, 이 NDVI와 증발산량과의 상관관계로부터 한강유역에 있어서 1989년의 증발산량을 추정하였으며, 개략적인 연구의 흐름은 그림 1과 같다.

2. NDVI에 의한 피복분류

2.1 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)

광역의 지표면에 대해 식생상태를 개략적으로 파악하기 위해서는 인공위성 NOAA에 탑재되어 있는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) sensor가 유효하다. 식물의 잎은 가시역을 흡수하고, 근적외역을 반사 또는 투과하는

성질이 있다. 따라서, Tucker(1985)는 가시역과 근적외역의 차를 취해 정규화함으로써 NDVI라 정의하고 있다. NOAA-AVHRR의 경우, Channel 1(可視)과 Channel 2(近赤外)를 이용하여 다음식에 의해 NDVI를 계산한다.

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

여기서, Ch.1은 Channel 1(0.58 μ m-0.68 μ m)의 brightness이며, Ch.2는 Channel 2(0.725 μ m-1.10 μ m)의 brightness이다.

이 NDVI의 값이 클수록 그 지점에서의 식물의 양이 많으며, 활성도가 높은 것을 의미한다. 또한 이 NDVI는 식물의 계절변동 등으로부터 식생분류나 피복분류에도 이용 가능하다.

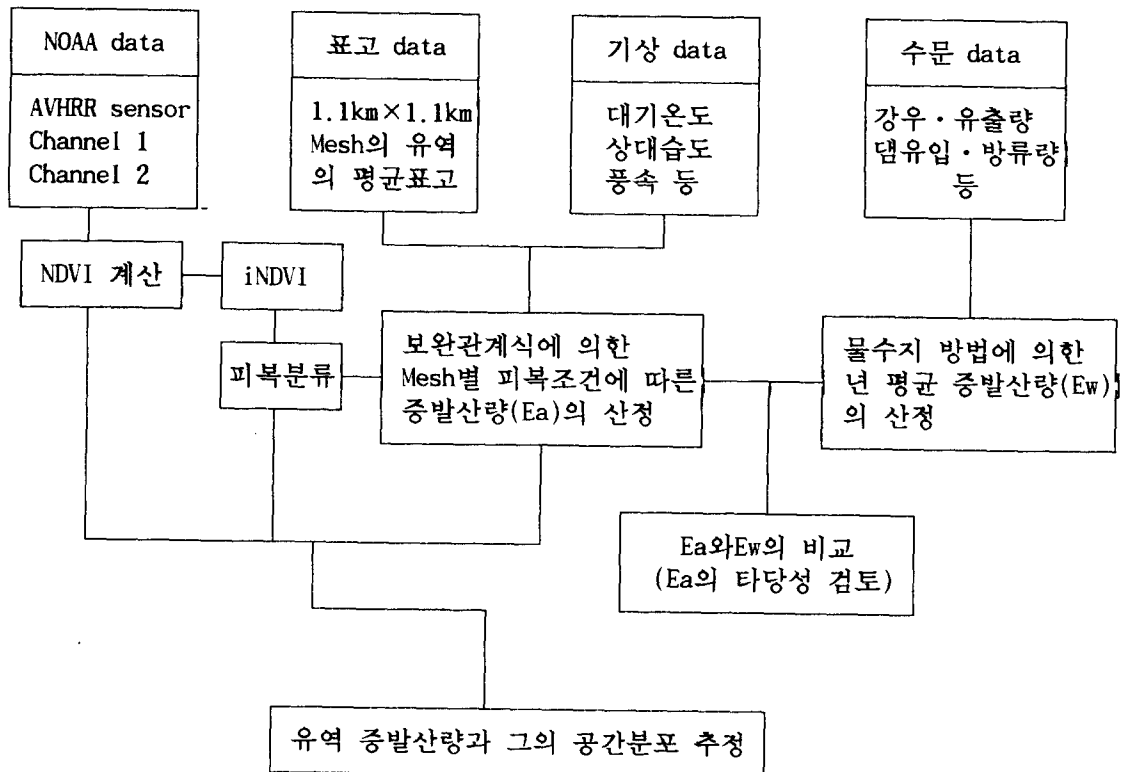


그림 1. 증발산계산의 흐름도

2.2 data set

본 연구에 사용된 인공위성 data는 일본 東北대학에서 수신하고 있는 NOAA 위성의 AVHRR data이다. AVHRR sensor는 물리분해능이 우수하며, 지상분해능이 약 1.1km로 비교적 넓은 범위를 대상으로 하고 있다. 또한, 회귀일수가 짧기 때문에 시계열 data로서의 이용이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구의 대상 기간으로는 적설에 의한 지표면 관측이 정확히 행하여질 수 없는 겨울철을 제외한 1989년 4월부터 11월까지이며, 구름의 영향이 있는 경우 실제의 NDVI보다 매우 낮은 값을 표시하기 때문에 구름의 영향을 없애는 것이 중요하다. 그러나, 본 연구의 피복분류는 한반도 전역을 대상으로 하고 있기 때문에 한반도 전역에 구름의 영향이 전혀 없는 data는 존재하지 않는다. 따라서, 구름의 영향을 가능한한 없애기 위해 구름의 영향이 적은 날의 data를 1개월에 평균 3~4개 정도를 선택하여, 각 pixel별로 최대치를 취해 그 월을 대표하는 NDVI data로 하였다.

2.3 피복분류

NDVI가 식생의 변화를 잘 반영하고 있으며, 피복 조건에 따른 서로 다른 식생의 양과 활성도, 또한 계절변화의 차이에 의해 개략적인 피복분류가 가능하다. 식물환경이 NDVI로부터 어느 기간 동안을 대표할 수 있는 정량적인 값으로 표현하기 위하여 iNDVI(integral NDVI)가 이용된다. 이는 NDVI를 어느기간 적분함에 의해 얻어지는 지표이며, 다음식에 의해 계산된다.

$$iNDVI = \sum(NDVI_j \times d_j) / \sum d_j \quad (2)$$

여기서, NDVI_j : j번째의 NDVI

d_j : j번째의 관측일수

인공위성 data를 이용한 피복분류에의 이용에는 지금까지 많은 연구가 행하여져왔으나, 이는 대부분 Landsat data를 이용함으로써 한반도 전체를 대상으로 한다면 상당히 방대한 량의 data가 필요

하게 되며, 일련의 복잡한 과정을 거치는 해석방법으로 원하는 category를 넓은 범위에 있어서 손쉽게 분류하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 자세한 분류는 피하고, 증발산량의 추정에 있어서 최소한의 category를 선정하여 분류하는 것으로 하였으며, NOAA 위성의 지상분해능을 감안하면 일시에 한반도 정도의 넓은 범위를 대상으로 하는 피복분류는 가능하나, 보다 자세한 분류에는 한계가 있는 것을 알 수 있다.

미노(美濃(1993))는 일본에 있어서 기존의 국토수치정보를 이용하여, 각 피복조건에 따른 NDVI와 iNDVI의 변화의 차이를 조사하였다. 그 결과를 보면, 물의 경우에 있어서는 -0.2 부근, 도시역 0.0 부근, 논 0.2 부근, 삼림 0.4 부근의 iNDVI의 평균치가 얻어졌으며, 이 결과를 바탕으로 분류한 피복분류의 결과를 기존의 국토수치정보와 비교하여 본 결과 상당히 높은 정확도로 분류가 가능하다고 보고하고 있다. 이 결과를 바탕으로 1989년의 4월부터 11월까지의 평균NDVI로부터 iNDVI를 계산하여 적당한 한계치를 부여함으로써 한반도에 있어서도 피복분류가 가능하다. 또한 낙엽림의 경우에는 4월과 11월에 상록림에 비해 NDVI가 낮은 값을 나타내기 때문에, 이 성질을 이용해 낙엽림과 상록림과의 분류가 가능하다. 본 연구에 있어서는 1989년 11월의 평균NDVI가 지역에 따라 옅은 구름의 영향이 있어, 4월의 평균NDVI를 이용하여 낙엽림과 상록림을 분류하였다. 본 연구에서 선택한 category로는 물, 도시, 논, 낙엽림, 상록림으로서, 한반도 전역에 대하여 분류를 실시하였으며, 그 중 한강유역만의 분류결과를 표 1과 같다. 또한, 피복별 평균NDVI는 그림 2에 표시하였다. 한강유역에서의 분류결과를 보면, 낙엽림의 경우가 90% 이상을 차지하고 있으나, 이것은 순수한 낙엽림만이라 보기에는 어려우며, NDVI가 산지와 논 사이의 값으로 존재하는 경우에 낙엽림으로 구분되어 있어, 실제의 경우보다 더 많은 비율을 차지하고 있는 것으로 보여진다.

표 1. 한강의 피복상황

분류항목	Pixel수	비율(%)
도시	443	2.01
논	1,281	5.81
낙엽림	20,111	91.11
상록림	225	1.02
기타	12	0.05
계	22,072	100.00

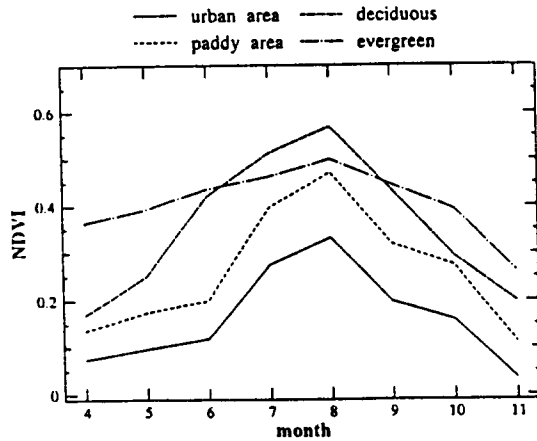


그림 2. 피복별 NDVI의 변화

3. 증발산량의 산정

3.1 보완관계식에 의한 증발산량(Ea)의 산정

포화표면으로부터의 증발산량 추정방법으로는 여러가지가 있지만, 이들은 가능 증발산량을 추정하는 식으로서 이를 다시 유역의 실 증발산량으로 환산하기 위해서는 유역 고유의 parameter와 경험계수 등의 사용이 불가결하다.

포화상태에서의 실 증발산량은 가능 증발산량에 상당하나, 점점 건조상태로 이동함에 따라 실 증발산량은 가능 증발산량에 비해 작아지게 된다. 그러나 건조상태하에서의 온도의 증가에 따른 포화증기압의 상승으로 인하여 Penman의 가능 증발산량 추정식의 공기역학적 항이 증가되어 Penman의 가

능 증발산량은 역으로 증가한다. 즉, Penman법에 의한 가능 증발산량은 실 증발산량에 대해 보완적으로 변화한다. 이러한 성질로부터 Morton (1978)은 일반의 지상관측자료로부터 실 증발산량을 직접 산정하는 보완관계식을 제안하였다. 그러나, Morton의 보완관계식은 대단히 복잡하고, 많은 경험계수가 필요하기 때문에 후에 Brutsart and Stricker(1979)에 의해 Priestly and Taylor의 가능 증발량과 Penman의 가능 증발산량을 직접 사용할 수 있도록 하는 관계식을 제안하였으나, 이식에 의한 증발산량은 겨울철에 과소 평가되는 경향이 있어 본 연구에서는 이식에 겨울철에 순방사량에 대한 이유항을 고려한 다음식을 이용하였다.

$$E_a = 2E_p - E_{pp} \quad (3)$$

$$E_p = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G + M) \quad (4)$$

$$E_{pp} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G + M) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) (e_s - e_a) \quad (5)$$

$$M = 0.66L_n - 0.44R_n \quad (6)$$

- 여기서, E_a : 유역 증발산량(mm/d)
- E_p : Priestly and Taylor의 가능증발량(mm/d)
- E_{pp} : Penman의 가능증발산량(mm/d)
- R_n : 순방사량(J/m²/d)
- G : 지중열flux(J/m²/d)
- M : 이유항(J/m²/d)
- L_n : 단파방사수지(J/m²/d)
- Δ : 포화증기압곡선의 경사(Hpa/°C)
- γ : 건습계정수(Hpa/°C)
- $f(u)$: 풍속함수(m/s²)
- e_s : 공기의 포화수증기압(Hpa)
- e_a : 공기의 수증기압(Hpa)

이 보완관계식을 이용하여 인공위성data의 각 pixel별로 피복상황에 따른 증발산량을 계산한다.

계산시에 필요한 기상관측치에는 기온, 풍속, 상대 습도, 일조시간 등이 있지만, 이들은 단지 몇개의 지점에서만 얻어질 수 있는 것이 보통이다. 따라서, 본 연구에서는 기온, 상대습도, 풍속을 표고의 함수로 표시하여 각 pixel 별로 계산한다. 기온의 경우에는 단순히 0.5°C/100m의 고도에 의한 기온 감율을 고려하였으며, 수증기압이 대체로 고도에 반비례하는 성질을 이용하여 표고에 따른 상대습도를 계산한다. 또한 풍속의 경우에는 대수법칙(Robinson(1962))에 의해 피복조건에 따른 계수 즉, 조도길이 d(roughness length)와 지면 수정량 z₀(ground displacement)를 계산하면 표고에 따른 풍속이 계산 가능하다. 하토리(服部(1985))는 여러종류의 식생에서 측정된 피복면의 높이를 h라 할때, d/h, z₀/h의 값을 구하였다. 여기서 얻어진 한강유역의 피복별 평균 증발산량을 그림 3에 표시하였다. 논외의 경우가 가장 큰 증발산량을 보였으며, 상록림과 낙엽림의 경우에는 상록림의 경우가 약간 큰 값을 보이고 있다.

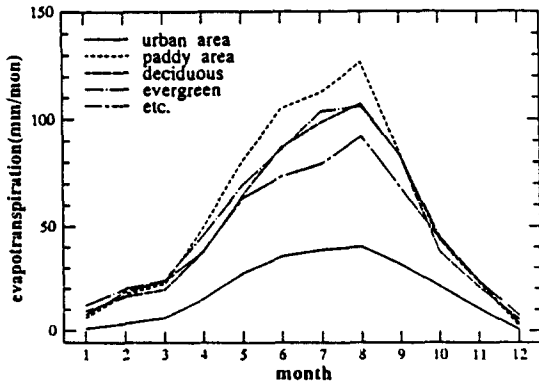


그림 3. 한강유역의 피복조건에 따른 증발산량

3.2 물수지에 의한 증발산량(Ew) 추정

자연유역에 있어서 어느 기간의 물수지식은 유역 밖에서의 지표류 또는 지하수의 유입이 없는 것으로 한다면, 다음식에 의해 증발산량을 구할 수 있다.

$$E_w = P - R \pm \Delta S \tag{7}$$

여기서, E_w : 증발산량(mm), P : 강수량(mm)
 R : 유출량(mm), ΔS : 저류량 변화(mm)
 비교적 큰 유역의 장기간 평균 저류량변화 ΔS는 0에 가깝다. 따라서, 장기간의 유출량과 강수량을 정확히 측정한다면, 비교적 정확한 증발산량이 구해질 수 있다. 한강유역에는 몇개의 인공적인 댐이 있으므로, 다음식에 의해 1989년의 증발산량을 구하였다.

$$E_w = P - R \tag{8}$$

$$R = \Sigma(\text{댐유입량} - \text{댐방류량}) + \text{유역출구에서의 유량} \tag{9}$$

유역의 평균강수량을 구하는 방법에는 여러가지가 있으나, 그중 Thissen에 의한 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나, 스가와라(菅原(1972))에 의하면 Thissen법은 이론적인 근거 및 합리성도 결여되어 있으며, 오히려 산술평균법이 더 합리적이라고 지적하고 있다. 이에 본 연구에서는 한강유역의 평균강수량을 산술평균법에 의해 구하고, 유역 출구를 고안 지점으로 선택하여 관측된 수위를 수위-유량 곡선에 의해 유량으로 환산하였다. 다년간의 물수지에 있어서는 ΔS=0로 가정할 수 있지만, 1년의 증발산량을 구하기 위하여 1년의 수문자료에서 ΔS를 0로 가정하는 것에는 문제가 있는 것으로 생각된다. 그러나, 우리나라의 경우 겨울철에 강수량이 적으므로, 기간을 1년간(1월-12월)으로 취한다면, 이 기간을 하나의 물수지기간(water year)으로 선정할 수 있으며, 그에 따른 ΔS는 비교적 적은 값으로 생각된다. 그러므로, 식(8)과 식(9)를 이용하면 년 단위의 증발산량을 구할 수 있다. 이 식에 의해 얻어진 1989년의 증발산량은 586.1mm 이었으며, 보완관계식으로부터 얻어진 연간 증발산량은 572.7mm 이었다. 이 결과로부터 보완관계식으로부터 얻어진 증발산량은 비교적 타당한 값으로 생각되며, 이 식으로 구하여진 증발산량을 1989년의 한강유역의 실 증발산량으로

한다.

4. NDVI에 의한 증발산량(E) 추정

4.1 해석 방법

NDVI의 계절변화와 증발산량의 변화를 비교해 보면, NDVI와 증발산량과의 사이에는 상관성이 있다는 것을 예상할 수 있다. 또한, 증발산량을 지배하는 인자에는 기온, 풍속, 상대습도, 일사량 등을 생각할 수 있지만, 이 모든 인자는 그 지점의 식생 조건에 영향을 준다고 생각할 수 있다. 신(申(1994))과 타다(多田(1994))의 연구에서도 식생의 활성도와 증발산량과의 사이에는 거의 비례관계가 있다는 것이 확인되었다. NDVI의 histogram이 식생의 계절변화를 잘 반영하고 있는 것으로부터 NDVI를 어느 일정한 값으로 구분하고, 각각의 치역에 대응하는 pixel수를 변수로 하는 다음의 회귀분석을 피복 조건별로 연간을 통해 시행함으로써 NDVI에 대응하는 증발산량을 구할 수 있다.

$$E_a = e_1 p_1 + e_2 p_2 + \dots + e_n p_n \quad (10)$$

여기서, E_a : 보완관계식으로부터 구한 증발산량(mm/mon)
 e_i : NDVI에 대응하는 증발산량(mm/mon)
 p_i : 각 단계의 pixel수
 n : 구분된 NDVI의 단계수

보완관계식으로부터 구해진 증발산량(E_a)을 목적변수, NDVI data로부터 구할 수 있는 구분된 각 단계에서의 pixel수 p 를 설명변수로 하면, 회귀분석에 의해 n 개의 회귀계수 e 가 구해진다. 결국 어느 pixel에서의 NDVI를 알면, 그 NDVI에 대응하는 e 의 값이 그 지점에서의 증발산량이 된다.

NDVI의 histogram분할수 n 을 크게 하면, 회귀분석에 있어서 설명변수가 많아지게 되며, 그에 대응하는 많은 인공위성 data를 준비하지 않는다면, NDVI와 증발산량과의 물리적인 의미는 없 어지게 된다. 현재의 시점에서 많은 수의 인공위성 data를 확보하기에는 구름의 영향 등 여러 이유에서 어

려움이 있는 점을 감안하면 n 을 단순히 크게 하는 것은 의미가 없게 된다.

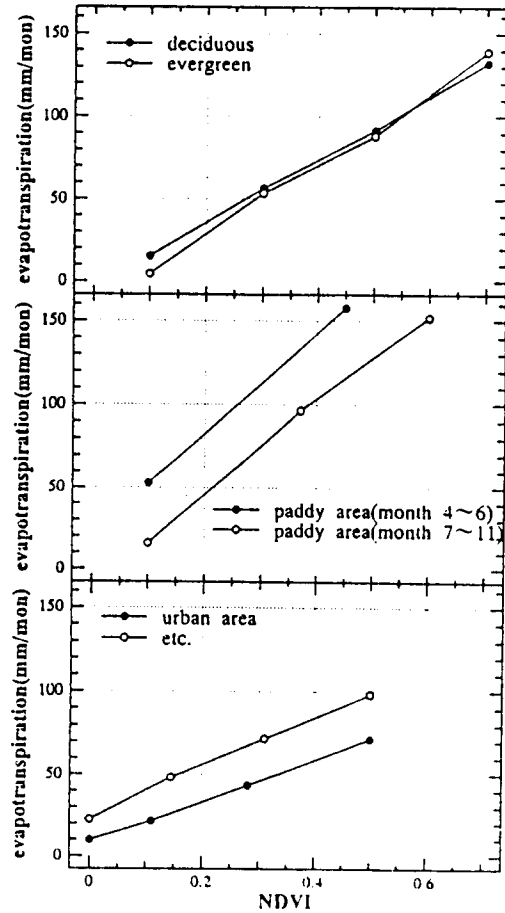


그림 4. NDVI-증발산량의 관계

4.2 해석 결과

현재의 인공위성 data 수로는 논을 제외하고는 $n=4$ 의 경우에 가장 좋은 결과를 얻었으며, 논은 경우에 4월-6월에는 NDVI가 낮은 값을 나타내지만, 수면에 의한 증발현상에 의해 증발산량은 비교적 큰 값을 나타내기 때문에, 4월-6월은 $n=2$, 7월-11월은 $n=3$ 으로 분리하여 상관관계를 비교함으로써 e 의 값을 구하였다.

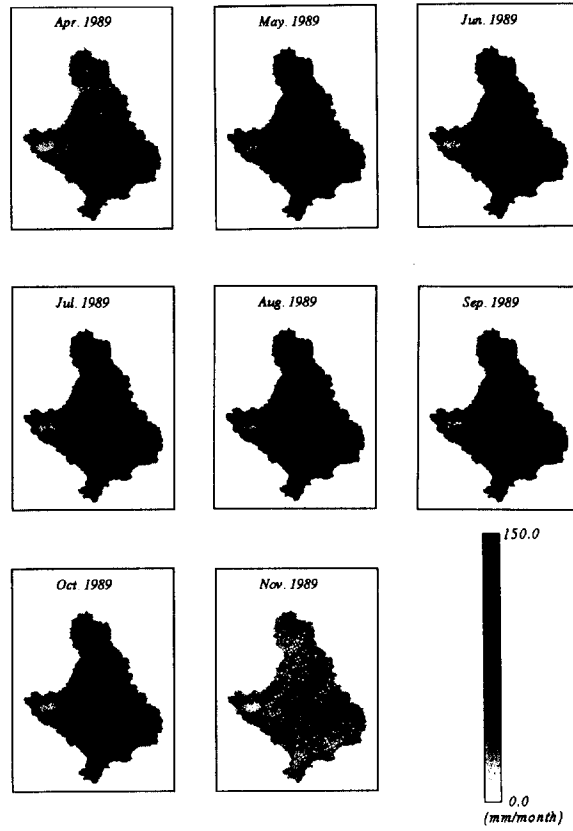


그림 5. 증발산량의 공간적 분포

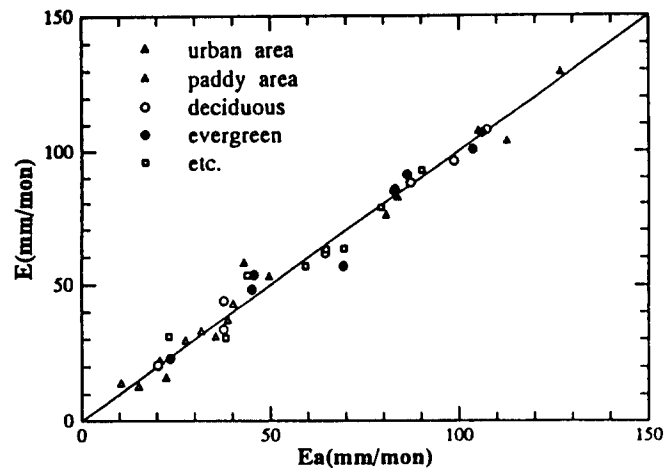


그림 6. E_a 와 E 의 비교
(E_a : 보완관계식, E : NDVI에 의함)

또한 분류된 피복상황 중 낙엽림의 경우, 순수한 낙엽림만이 아니라 몇 종류의 피복이 복잡하게 형성되어 있다 하더라도 이들의 차이는 그 점의 NDVI에 의해 반영되므로, 그 점의 피복조건에 해당하는 증발산량을 구할 수 있다. 분류된 피복조건에 따른 NDVI와 증발산량(e)과의 관계를 그림 4에 나타내었으며, 이 결과로부터 NDVI와 증발산량과는 거의 비례관계가 성립한다는 것을 알 수 있다. 이 관계로부터 어느 지점의 NDVI를 NOAA data로 부터 계산해 두면, 그점의 증발산량을 용이하게 구할 수 있으며, 얻어진 한강유역의 공간적 분포는 그림 5와 같다. 피복조건별의 각 pixel 당 증발산량의 합을 같은 피복을 갖는 총 pixel수로 나누어 얻은 피복별의 평균증발산량(E)과 보완관계식으로부터 얻어진 증발산량(Ea)과의 관계는 그림 6과 같으며, 대략 $\pm 10\%$ 의 오차로 증발산량을 구할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이상, NOAA-AVHRR data를 이용하여 1989년의 한강유역의 증발산량과 그 공간적인 분포를 추정하였다. 이것은 증발산량을 지배하는 인자가 NDVI에 의해 잘 반영되고 있다는 가정하에 개발된 방법이며, 이 가정이 실제의 현상에서도 큰 차이가 없을 것을 기대하고 있다.

NDVI의 성질을 이용하여 한반도 전체에 대한 개략적인 피복상황을 알 수 있으며, 우리나라와 같이 피복상황의 수치분류체계가 구축되어 있지 않은 경우 또는 북한과 같이 지형정보를 전혀 얻을 수 없는 경우에 있어서 유효하게 사용될 수 있으리라 생각된다. 본 연구의 결과, 보완관계식은 우리나라와 같이 계절적으로 건조상태와 습윤상태가 반복되는 경우에 있어서도 적용 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한, NDVI의 histogram이 증발산량과 거의 비례한다는 것을 확인하였으며, 인공위성 data를 이용함으로써 광역면에 대한 증발산량을 용이하게 추정하는 것이 가능하다. 본 연구를 우리나라 5대강 유역에 대해 확대 실시하여 정확도를 검토함으로써, 장래에는 기상자료 혹은 수문자료가 필요 없이 NDVI만으로 광역 지표면에 있어서의 증발산

량의 추정이 가능하게 되어, 기상자료가 얻어지지 않는 북한의 경우에도 NDVI만으로 증발산량을 추정하여, 한반도 전역에 대한 증발산량을 추정하고자 한다.

감사의 글

본 연구에 사용된 NOAA data는 일본 東北大學과 일본 東北電力과의 공동연구의 일환으로 수신하고 있는 것으로서 관계자 여러분에게 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 申 十澈·多田 毅·風間 聰·澤本正樹(1994), 韓國의蒸發散量空間分布의推定, 日本 上木學會 水工學論文集, Vol.38, pp.161-166.
2. 多田 毅·風間 聰·澤本正樹(1994), NDVIを用いた廣葉樹林帶の蒸發散分布の推定, 日本 水文·水資源學會誌, Vol.7, No.2, pp.114-119.
3. 美濃 憲·風間 聰·澤本正樹(1993), iNDVIを用いた環境評價について, 環境システム研究, Vol. 21, pp.40-45
4. 内田 諭·星 仰(1987), ランドサツツトおよび國上數值情報標高データを用いた廣域蒸發散量の算定, 日本 寫眞測量とリモートセンシング, Vol.26, No.4, pp.13-23.
5. 佐渡公明·根田聖兒(1994), ランドサツツトTMデータと補充關係式を用いた流域實蒸發散量年變化の推定-常呂川流域について, 日本 上木學會 水工學論文集, Vol.38, pp.149-154.
6. 服部重昭(1985), 蒸發散量推定式の誘導過程と林分への適用における問題點, 林誌研報 332
7. 菅原正巳(1972), 流出解析法, 共立出版株式會社.
8. Kotoda, K.(1986), Estimation of river basin evapotranspiration, Environmental research center paper, Univ. Tsukuba, Japan, Vol.8, pp.1-92.
9. Morton, F.I.(1978), Estimating evapotranspiration from potential evaporation : practically of an iconoclastic approach, J. Hydrol., 38, pp.1-32.

10. Brutsaert, W. and Stricker, H.(1979), An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration, *Water Resour. Res.*, 15, pp.443-450.
11. Robinson, S.M.(1962), Computing wind profile parameters, *J. Atmos. Sci.*, 19, pp.189-190.
12. Tucker, C.J, Townshend, J.R.G, and Goff, T. E. (1985), African land-cover classification using satellite data, *SCIENCE*, Vol.227, pp.369-375.

〈접수 : 7월 12일〉