

분포 증발산량 산정 결과의 격자형 GIS 표현

박진혁^{1*} · 황의호¹ · 이근상¹ · 채효석¹

Grid-typed GIS Representation of Distributed Evapotranspiration Estimation Results

Jin-Hyeog PARK^{1*} · Eui-Ho HWANG¹ · Geun-Sang LEE¹
Hyo-Sok CHAE¹

요 약

본 연구에서는 원격탐사나 지리정보시스템 등을 적용하여 ASCII형태의 수치표고자료와 원격탐사 자료를 이용하여 분류한 토지피복도를 이용하여 각 토지피복별로 알베도와 바로크계수, 증발효율 등을 이용할 수 있는 격자형 토지피복자료를 격자단위로 분할하여 모형의 입력값으로 이용하였기 때문에 지역의 공간적인 특성을 반영한 보다 정확하고 신뢰성있는 자료의 구축이 가능했고, 기존의 열수지법을 이용하여 증발산량의 시·공간적인 분포양상을 계산할 수 있는 격자기반의 분포형 증발산량 추정 프로그램을 포트란언어로 개발하였으며, 격자형 증발산량 산정 모형은 향후 연구될 격자기반의 분포형 강우-유출모형과 통합할 수 있도록 고려하였다. 또한, 격자기반의 계산으로 증발산량에 대한 유역내 특정지점에서의 시간적 변화 양상과 공간적 분포 양상을 GIS상에서 나타낼 수 있도록 구성하였다. 모형의 적용성 검증을 위해서 비교적 정확한 기상자료와 수문자료를 보유하고 있는 일본의 쇼나이강 유역(532km²)을 대상으로 적용한 결과, 유역 연평균 증발산량은 825.4mm로 나타났다.

주요어 : 분포형모형, 열수지법, 증발산량

ABSTRACT

A Grid-based distributed evaporation prediction model which calculates temporal and spatial evaporation with a heat balance method was developed. And, the model was considered as the integration with distributed hydrological model in near future. This model was programmed by fortran language and used ASCII formatted map data of DEM (Digital Elevation Model) and land cover map extracted by remote sensing data. Also, temporal variations and spatial distributions of evaporation are presented by using GIS. To verify the applicability of the model, it was applied to the Shonai river basi

2004년 10월 20일 접수 Recieved on October 20, 2004 / 2004년 12월 3일 심사완료 Accepted on December 3, 2004
1 한국수자원공사 수자원연구원 Water Resources Corporation, Korea Institute of Water and Environment
* 연락처 E-mail : park5103@kowaco.or.kr

n (532km²) which has sufficient meteorological and hydrological data, Japan. The result shows that the estimated mean annual evaporation was 825.4mm, and this value is estimated as suitable things in considering rainfall and discharge data in study area.

KEYWORDS : *Distributed Model, Heat Balance Method, Evaporation*

서 론

최근 수문학 분야에서 가장 큰 관심은 수문 자료를 정확히 관측하고, 유역에 대한 물리적인 요소를 고려할 수 있는 수문모형을 개발하는 것이며, 또한 GIS 및 원격탐사 등을 적용하여 수문분석 및 정확한 수문인자를 추출하고자 하는 것이다(채효석, 1999). GIS나 원격탐사기법을 이용할 경우 유역의 물리적인 요소를 고려할 수 있으며 넓은 지역에 대한 정보를 공간적으로 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다.

수문순환에서 증발산량은 유출해석, 저수면 증발산량계산, 작물 소비수량 계산 등에서 수자원을 계획하고 운영하는데 고려되는 주요 항목이다(기상월보, 2001). 증발산량을 정확히 산정하기 위해 지금까지 제시된 방법에는 물수지법, 열수지법, 공기역학적 방법 및 조합방법 등이 제안되었다. 물수지법은 유역단위의 넓은 면적에서 사용하고 이론적으로는 가장 간단한 방법이지만 실제 적용에는 불확실성이 많은 방법 중의 하나이다. 유입수량은 강수량 및 계류수량의 측정을 통하여 얻어지며, 계절과 같이 상대적으로 장기간 동안의 유입수량과 유출수량과의 차이로 증발산량을 산정한다. 이때, 해당 지역에는 또 다른 유입원이나 유출원이 없어야 하며, 산정결과는 연구지역과 기후, 식생 및 관개조건이 유사한 지역에서만 적용될 수 있다.

열수지법과 공기역학적 방법은 고도에 있어서 기온, 습도, 풍속의 관측데이터로부터 잠열 플럭스를 구하는 방법이다. 조합방법의 대표적인 것으로는 Penman식 혹은 Penman-Monteith식을 들 수 있다. Penman의 공식은 습윤한

표면의 증발산량을 평형온도와 관련시키는 기본원리들을 통합하는 데 최초로 성공하였고(Monteith, 1981), Braney-Cridle 또는 Thornthwaite 방법보다 정확한 것은 사실이나 많은 기상자료가 필요하기 때문에 적용에는 제한이 있다. Penman-Monteith 식에서는 Penman식에서 고려하지 않은 기공의 개폐에 따른 증발산 제어구조를 표현하였다(近藤, 1994). Morton(1978)은 대상지역이 건조해지면 실제 증발산량은 감소하는 반면, Penman의 잠재 증발산량은 증가한다는 보완관계에 있으며, 실제 증발산량과 잠재 증발산량의 합은 Priestly와 Taylor(1972)에 의해 제안된 잠재 증발산량의 2배와 거의 유사하다는 보완관계식을 제안하였다. 보완관계식을 이용하는 경우 토양이나 식물 등에 대한 정확한 측정이 어려운 인자에 대한 정보가 필요하지 않으며, 단지 기상 자료만을 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, Brusaert와 Stricker(1979)는 Penman법과 Priestly와 Taylor법을 직접 이용하여 실제 증발산량을 산정하는 모형을 제안하였지만, 겨울철에 계산되는 월 단위의 증발산량이 과소 평가 되어 실제 적용하기가 어렵다(Ben-Ahser, 1981).

본 연구에서는 단기적인 해석이 가능하고, 비교적 안정된 결과가 얻어지는 열수지법을 이용하여 증발산량의 시·공간적인 분포양상을 계산할 수 있는 격자기반의 분포형 잠재 증발산량 추정 프로그램을 포트란언어로 개발하였다. 또한 격자형 증발산량 산정 모형은 향후 분포형 수문모형과 통합할 수 있는 장점을 고려하였다. ASCII형태의 수치표고자료와 원격탐사 자료를 이용하여 추출된 토지피복도를 이용하여 각 토

지피복별로 알베도 값과 바로크계수, 증발효율 등을 이용할 수 있는 격자형 토지피복자료를 격자단위로 분할하여 모형의 입력값으로 이용하였다. 또한, 증발산량에 대한 유역내 특정지점에서의 시간적 변화 양상과 공간적 분포 양상을 GIS상에서 나타낼 수 있도록 구성하였다. 모형의 적용성 검증을 위해서 비교적 정확한 기상자료와 수문자료를 보유하고 있는 일본의 쇼나이강 유역(532km²)을 대상으로 적용하였다.

증발과정의 모형화

1. 조건 및 가정

- 1) 각 격자마다 1일 시간간격으로 계산한다.
- 2) 각 격자의 기온은 관측지점을 각 격자의 표고차와 기온감소율을 이용하여 산정한다.
- 3) 각 격자마다의 기압, 공기밀도는 측고공식을 이용하여 산정한다.
- 4) 각 격자의 풍속, 일조시간은 티센 분할법을 이용하여 관측소의 데이터를 할당한다.
- 5) 바로크계수, 증발효율, 알베도 등은 각 피복조건에 할당된 값과 그 면적율에 의해서 결정한다.

2. 기본이론

열수지법(近藤, 1994)은 지표면온도 TS를 가정하고, 식 (1)의 열수지식의 각 플럭스를 구해서 식 (2)와 같은 수지식에 대입해서 성립되도록 TS를 추정해 가는 것이다.

$$\text{Heat balance; } IR = \sigma T^4 + HS + \iota E \quad (1)$$

IR : 방사량(Wm⁻²), σ : 스테판볼츠만정수 (5.67×10⁻⁸Wm⁻²K⁻⁴), T : 지표면온도(K),

HS : 현열운송량(Wm⁻²), ιE : 잠열운송량(Wm⁻²)

$$\text{Input radiation; } IR = (1 - ref)SR - LR \quad (2)$$

ref : 알베도, SR : 일사량(Wm⁻²), LR : 장파방사량(Wm⁻²)

증발산량은 다음의 잠열운송량에 의해 산정된다.

$$\text{Latent heat; } \iota E = \iota \rho \beta C_E U (q_s S_{at} - q_a) \quad (3)$$

ιE : 잠열운송량(Wm⁻²), ι : 기화잠열(J/kg), ρ : 공기밀도, β : 증발효율, C_E : 잠열의 바로크계수,

U : 풍속(m/s), $q_s S_{at}$: 포화비습, q_a : 비습

비습, 포화비습, 바로크계수, 증발효율은 다음과 같이 구할 수 있다. 측고공식으로부터 기온 T_v 가 일정감을 σ 에서 고도 z 와 함께 낮아진다고 가정하면,

$$T_a = T_v = T_{t0} - \Gamma z' \quad (4)$$

로 된다. z' 는 기준점으로부터 대상 격자까지의 고도차, T_{t0} 는 기준점의 기온, Γ 는 일정감율이다. 각 지점의 대기압 P_a , 수증기압 e_a ,
는,

$$P_a = P_{t0} \left(\frac{T_{t0} - \Gamma z'}{T_{t0}} \right)^k \quad (5)$$

$$e_a = e_{t0} \frac{P_a}{P_{t0}} = e_{t0} \left(\frac{T_{t0} - \Gamma z'}{T_{t0}} \right)^k \quad (6)$$

$$k = \frac{g}{R_d} \Gamma \quad (7)$$

여기서, R_d : 건조공기의 기체정수(J/K/mol),
 g : 중력가속도(9.81%), P_{t0} : 기준점에서의 대기

압(hPa), e_a : 기준점에서의 수증기압(hPa)으로 되고, 대기중의 포화수증기압 $e_a S_{at}$ 는

$$e_a S_{at} = 6.1078 \times \exp^{aT_a/(b+T_a)} \quad (8)$$

에서 구해진다. 따라서 비습 q_a 와 포화비습 $q_a S_{at}$ 는

$$q_a = \frac{0.622(e_a/p_a)}{1-0.378(e_a/p_a)} \quad (9)$$

$$q_a S_{at} = \frac{0.622(e_a S_{at}/p_a)}{1-0.378(e_a S_{at}/p_a)} \quad (10)$$

로 된다. 기준지점의 공기밀도분포는, 각 기준점에서 관측된 수증기압 e_a 를 이용해서,

$$\rho_a = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_a} \cdot \frac{p_a}{1013.25} \left(1 - 0.378 \frac{e_a}{p_a}\right) \quad (11)$$

로 된다.

바로크계수와 증발효율은 표 1과 같이 토지 피복별로 주어진다. 여기서, 바로크계수는 관측 기준고도에 대응한 형태로 주어지고, 풍속계의 높이에서의 높이값을 관측기준고도에서의 값으로 보정할 필요가 있다. 보정은 다음과 같은 식에서 구한다.

$$U = U_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0.25} \quad (12)$$

여기에, U_0 : 풍속의 관측치(m/s), z : 관측기 준고도(m), z_0 : 풍속계의 높이(m)

3. 모형의 개요

본 모형의 구조적 흐름도는 그림 1과 같다. 모형의 입력자료로는 유역의 Landsat 위성자료로부터 분류된 토지피복도(일본 국립지리원, 1995)를 비롯하여 수치표고자료에서 추출한 경사방향도, 그리고 티센으로 분할한 풍속, 기온, 기압, 수증기압, 일조시간 등과 같은 기상관측소에서 측정된 자료 등이 있다. 상기의 입력자료들은 GIS소프트웨어인 ARC/VIEW에서 ASCII 형태의 입력자료로 생성하였으며, 모형이 수행되면 유역의 각 격자별 시계열 증발산량, 지표면온도 및 토지피복별 증발산량 등과 같은 자료들이 ASCII형태로 출력된다. 또한, 대상지역에 대한 증발산량의 공간분포도, 토지피복별 분포도, 지표면온도 분포도 등이 GIS상에서 격자기반으로 표현이 가능하다.

연구 대상지

본 연구에서는 비교적 정확한 기상자료와 수문자료를 갖고 있는 일본의 쇼나이강 유역을 연구대상지로 선정하였다. 쇼나이강 유역은 행정구역상으로는 기후현(岐阜縣)에 위치하고 있는 1급 하천으로, 중부지방을 대표하는 도시하천이다. 본 연구대상지는 그림 2와 같이 유역면적은 532km²이고, 유로연장은 약 80km이며 현재 나고야 시를 중심으로 최근 급격하게 도시화가 진행되고 있다.

TABLE 1. Parameters by land cover

토지피복상황	바로크계수	관측기준고도	증발효율
산지	0.005	30	0.2
논	0.005	10	0.7
밭	0.003	1	0.3
도시	0.0001	10	0.2
수역	0.001	10	1.0

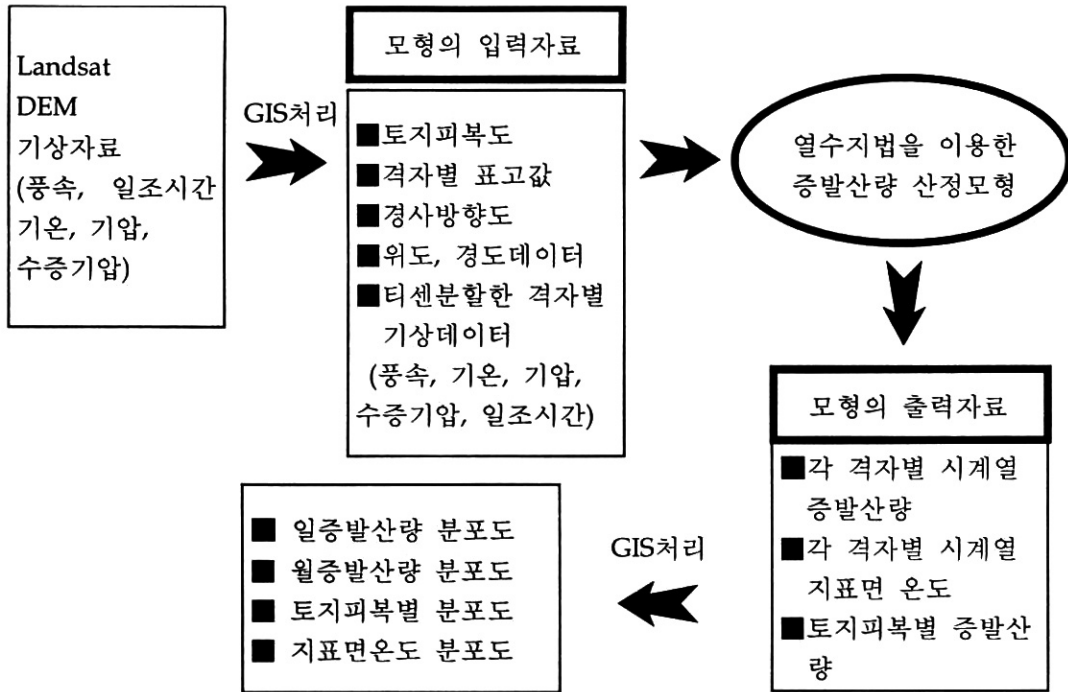


FIGURE 1. Schematic diagram of GIS-based distributed evaporation model

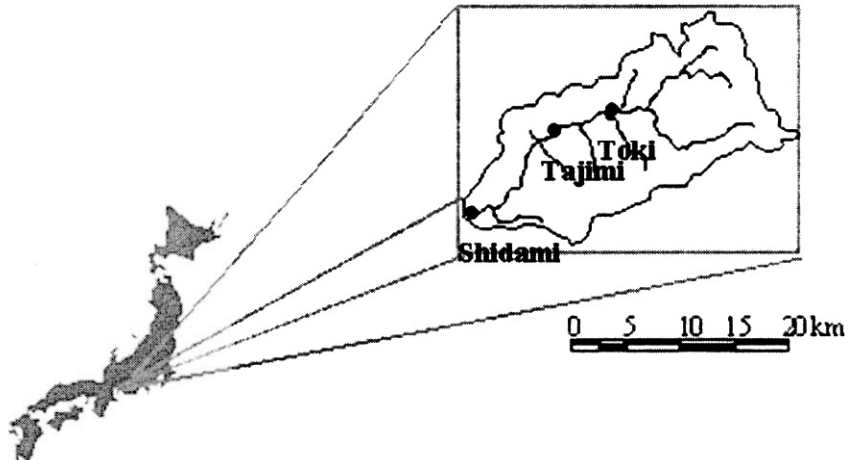
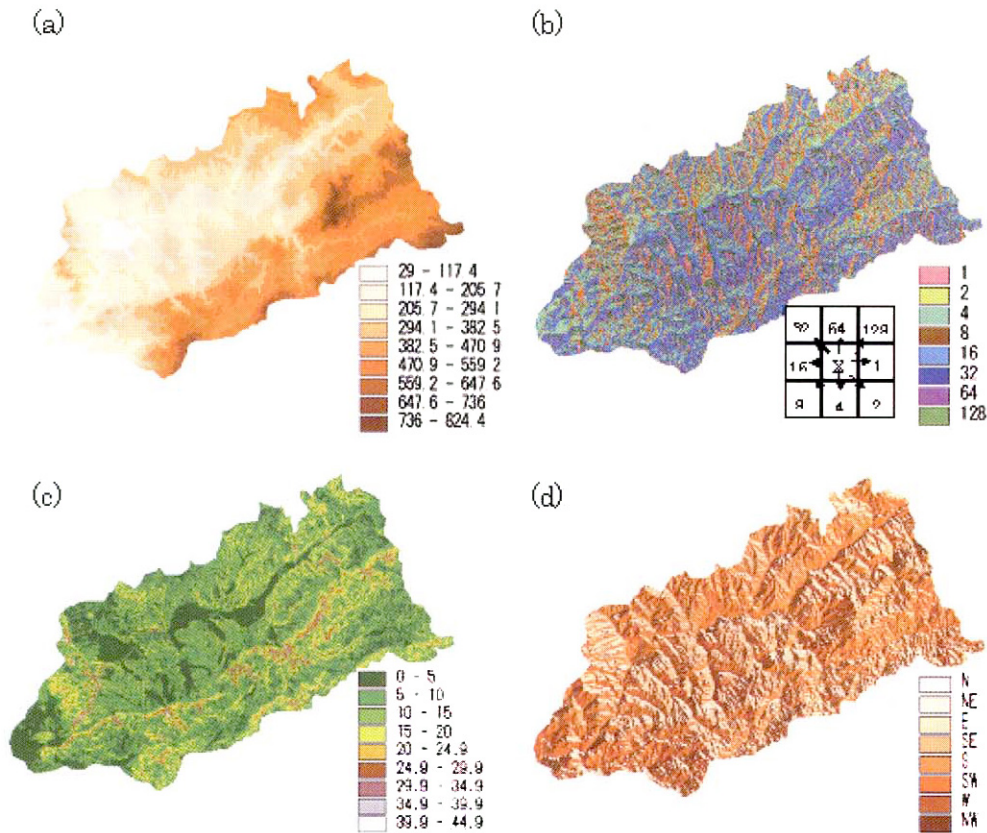


FIGURE 2. Study area

GIS 격자기반 입력자료 추출

격자형 증발산량 산정모형을 적용하기 위하여 필요한 자료는 기본도로서 DEM이 있으며,

주제도로서는 Landsat 자료로부터 추출한 토지 피복도와 DEM으로부터 계산한 경사방향도 등이 있다. 본 연구에 필요한 지형 및 토지피복자료는 일본 국토지리원에서 발간하는 수치정보를



(a) DEM (b) Flow direction (c) Slope (d) Aspect
FIGURE 3. Topographic thematic map by GIS analysis (Resolution: 50m)

이용하였다. DEM 자료는 격자 해상도가 50m, 250m, 1km의 3종류가 있으며, 토지피복도는 Landsat에서 15종류로 분류한 토지피복자료가 100m 해상도로 구축되어 있다. 본 연구에서는 15종류의 토지이용분류를 유사한 유출특성 및 부하발생특성을 가진 항목을 하나의 항목으로 묶어서 산림, 논, 밭, 도시, 수역으로 5종류로 재분류하였다. 격자기반의 분포형 증발모형을 구축하기 위한 격자의 해상도는 계산시간, 컴퓨터의 처리용량 및 광역적인 분석 등을 고려해서 1km로 결정하였다. 증발산량을 계산하고 일사량을 보정하기 위해서 필요한 연구 대상지역에 대한 DEM, 흐름방향도, 경사흐름도 및 경사방향

도 등은 그림 3과 같다. 흐름방향도는 DEM에 존재하는 함몰의 제거처리를 한후, 각 셀의 최대 경사방향에 따라 흐름방향을 결정하여 산정한다. 토지피복도는 그림 4와 같이 5종류로 재분류하였다.

적용 결과

기온, 풍속등의 기상관측데이터로부터 잠열 플럭스를 구하는 열수지법을 이용하여 산정한 쇼나이강 유역내 관측지점(Toki, Tajimi, Shidami)에서의 일증발산량의 시계열변화는 그림 5와 같다. 분석 결과, 평균 증발산량은 825.4

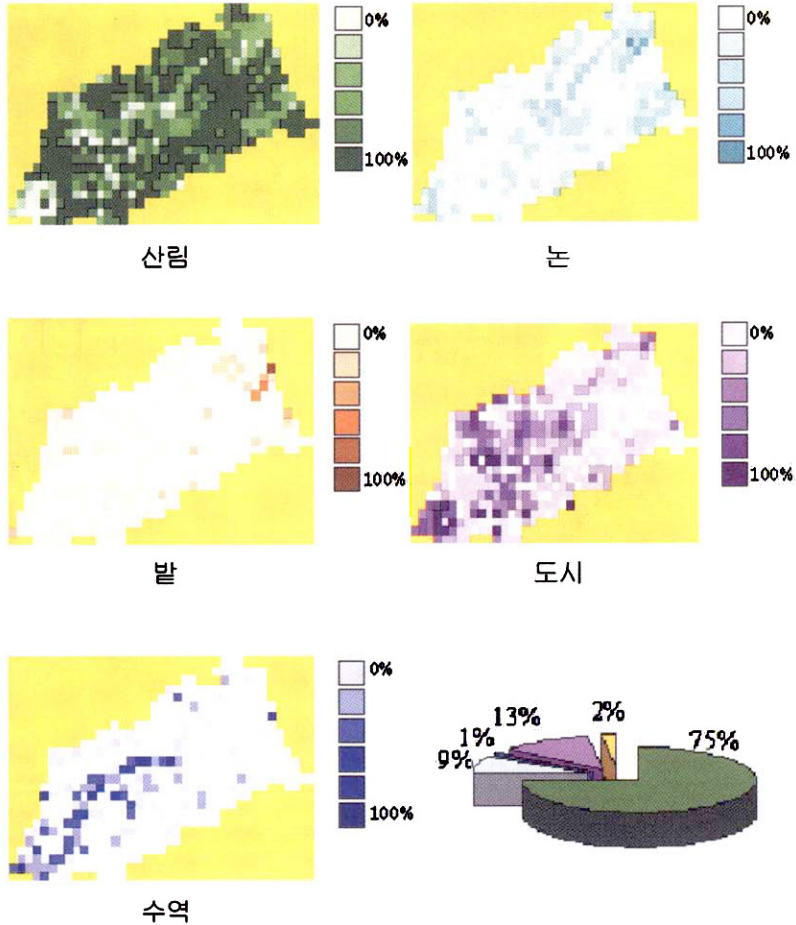


FIGURE 4. Land cover distributions of the Shonai river basin (Resolution:1km)

mm로 계산되었으며 본 연구대상지의 강수량과 관측치의 유출량을 고려해 볼 때 적절한 값을 나타낸 것으로 판단된다. 각 토지피복별 증발산량은 산림지역이 939mm, 수역이 851mm, 논이 812mm, 밭이 803mm, 그리고 도시지역에서는 708mm로 나타났다. 따라서 토지피복별 증발산량은 산림지역 > 수역 > 논 > 밭 > 도시지역 순으로 나타나고 있으며, 특히 여름철에는 토지피복별 증발산량의 차이가 크게 나타난 것으로 분석되었다. 또한 산림지역의 경우 증발산량이 매우 커

지는 것을 볼 수 있는데, 이는 겨울철에 비해 봄부터 식생의 생육이 시작되어 증산의 양이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

그림 6은 쇼나이강 유역을 대상으로 산정한 분포형 증발모형의 특성을 살펴 격자마다의 월 평균 증발산량의 공간분포를 GIS상에서 표시한 것이다. 1995년 1월부터 1995년 12월까지의 월 평균증발산량의 공간분포를 나타낸 것으로 여름에 증발산량은 기온과 지표면온도의 영향으로 높고, 겨울에는 낮음을 알 수 있다.

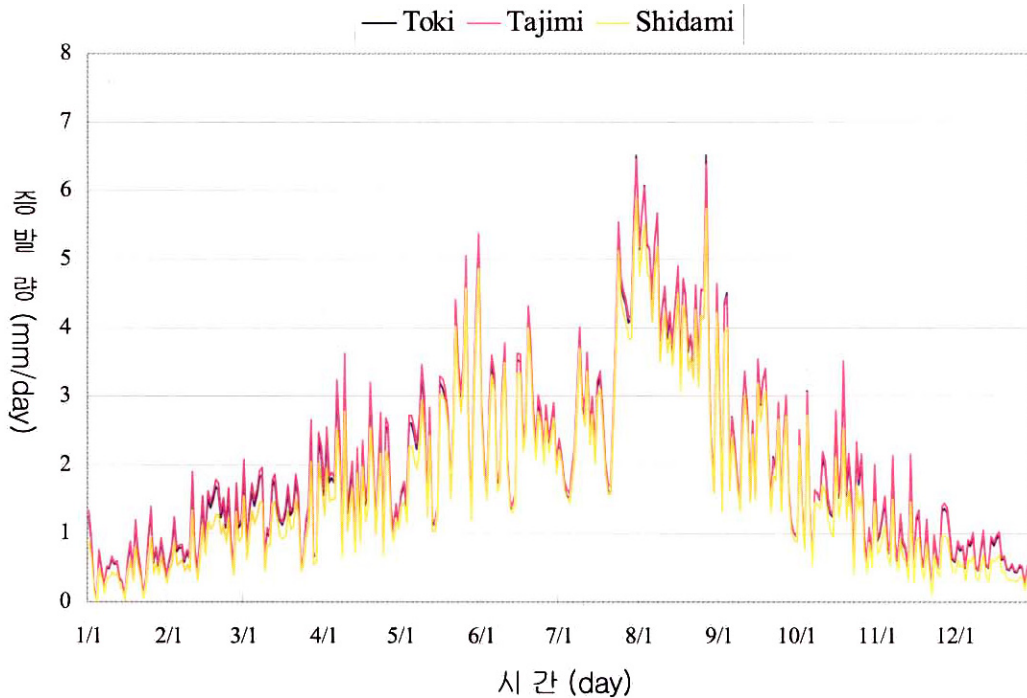


FIGURE 5. Evaporation sequences in the Shonai river basin

결론

본 연구에서는 원격탐사나 지리정보시스템 등을 적용하여 유역의 공간적인 특성을 반영한 보다 정확하고 신뢰성있는 자료의 구축이 가능했고, 기존의 열수지법을 이용하여 증발산량의 시·공간적인 분포양상을 계산할 수 있는 격자기반의 분포형 증발산량 추정 프로그램을 포트란언어로 개발하였으며, 격자형 증발산량 산정 모형은 향후 연구될 대유역적용을 위한 격자기반의 분포형 강우-유출모형과 통합할 수 있도록 고려하였다. 또한, 격자기반의 계산으로 증발산량에 대한 유역내 특정지점에서의 시간적 변화 양상과 공간적 분포 양상을 GIS상에서 나타낼 수 있도록 구성하였다. 일본의 쇼나이강유역을 대상으로 계산시간 간격을 1일로 하여 모형을 적용한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. GIS기반의 표고자료 및 토지피복자료 그리고 신뢰성 있는 수문기상 자료를 이용함으로써 기존의 증발산모형에 비해 유역의 공간적 특성을 반영한 보다 정확한 입력자료를 생성할 수 있었다.
2. GIS 격자기반 열수지법을 이용하여 유역내 특정지점에서의 공간적으로 분포하는 증발산량 및 지표면온도를 산정할 수 있었다.
3. 열수지법을 이용하여 구축한 증발산량 모형의 적용결과 대상지역의 강우량(1,706mm) 및 실제 유출고(910mm)의 결과와 공간적인 변동의 경향 및 일 최대값 등을 고려해 볼 때 비교적 만족할 만한 증발산량 산정 결과를 얻었으며 이를 통해 모형의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
4. 본 연구에서 제시한 증발산량 산정 기법은 향후 격자기반의 분포형 장기 강우-유출모형의 입력자료를 위한 전처리 과정으로 활용이

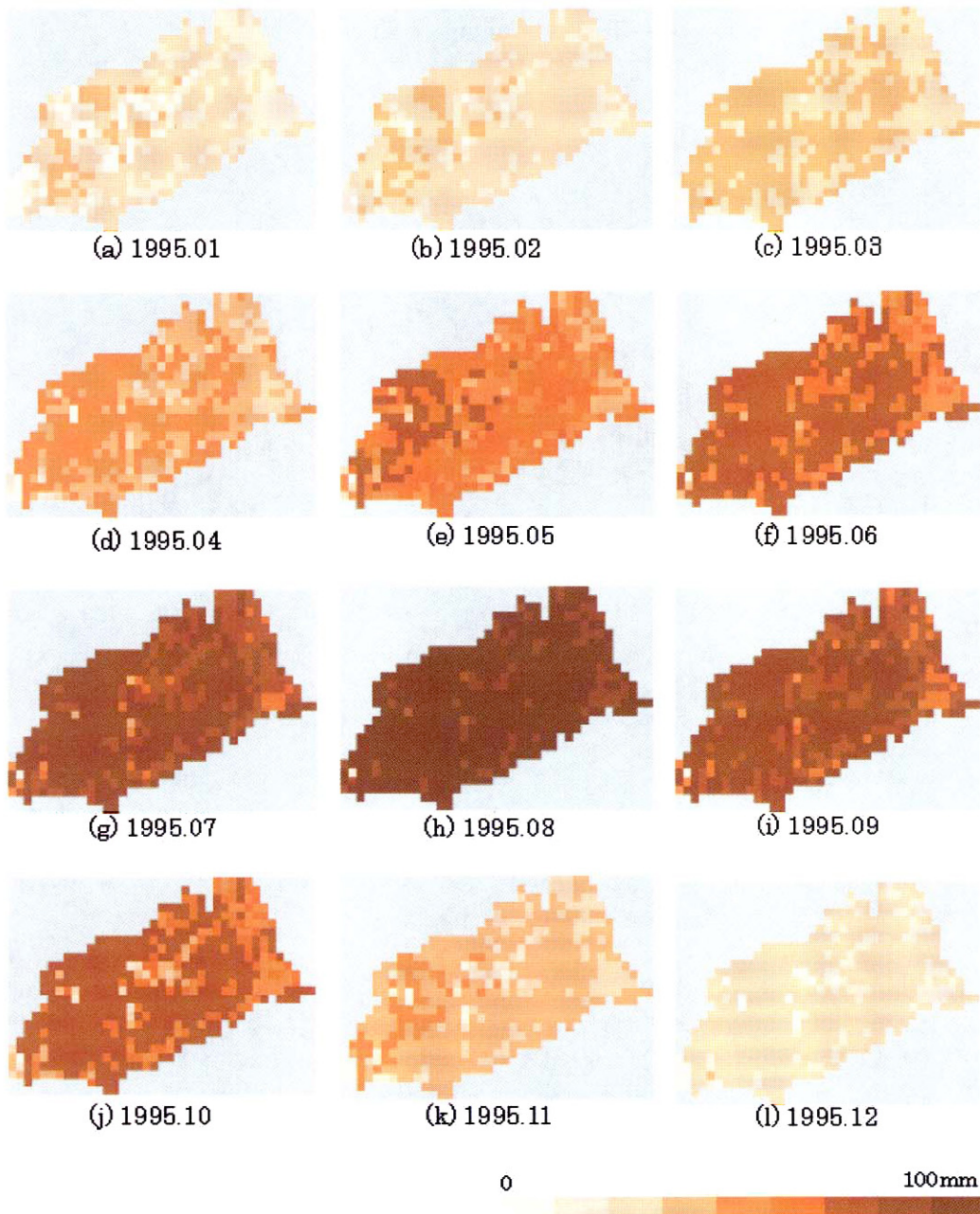


FIGURE 6. Spatial distribution of evaporation (Shonai river basin)

기대된다.

이 논문은 향후 대유역에서의 적용을 위한 GIS격자기반의 분포형 장기 강우-유출모형 개

발을 위한 전처리과정으로 분포형 증발산량을 추정하기 위한것으로, 일본 교토대 방재연구소에서 대유역적용을 위해 적정가능한 메쉬간격으

로 500km²의 유역의 경우엔 1km 정도로 했을 때 비교적 신뢰할 만한 유출량이 계산되었다는 분석에 의한 것이다. 격자의 크기가 증발산량 및 유출량에 미치는 영향에 대한 구체적인 연구는 향후 연구과제로 남긴다. **KAGIS**

참고문헌

- 기상청. 2001. 기상월보
- 일본국립지리원. 1995. 토지피복도
- 채효석, 김성준, 정관수. 1999. 격자기반의 일 증발산량 추정모형 개발. 한국수자원학회논문집 32(6):721-730.
- Ben-Asher, J. 1981. Estimating evapotranspiration from the Sonoita Creek watershed near Patagonia. Arizona. Water Resources Res. 17:901-906.
- Brusaert, W. and H. Stricker. 1979. An advection aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. Water Resources Res. 15:443-450.
- Monteith, J.L. 1981. Evaporation and surface temperature. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 107:1-27.
- Morton, F. I. 1978. Estimating evapotranspiration from potential evaporation—practically of aniconoclastic approach. J. of Hydrology 38:1-32.
- Priestly, C.H.B. and R. J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Mon. Weather Rev. 100:81-92.
- 朴珍赫. 2003. GIS베이스의 분포型流出モデルを用いた比較水文學の提案. 京都大學大學院博士學位論文.
- 近藤純正. 1994. 水環境の氣象學. 朝倉出版. 333pp.