

준 분포형 수문모형에서의 원격탐사자료의 적용 및 평가*

김병식¹ · 김경탁¹ · 박정술^{1*} · 김형수²

Application and Evaluation of Remotely Sensed Data in Semi-Distributed Hydrological Model*

Byung-Sik KIM¹ · Kyung-Tak KIM¹ · Jung-Sool PARK^{1*} · Hung-Soo KIM²

요 약

수문모형은 많은 물리적, 식생적, 기후적, 인위적 요소들의 결과로 기인하는 수문학적 특성을 나타내는 유역의 복잡한 시스템을 현실적으로 표현하는 도구로써 인식되어 왔다. 공간적으로 분포된 수문모형들은 1960년대 처음으로 개발되었으며, 수문학과 수자원관리 분야에서 원격탐사데이터와 지리정보시스템의 역할은 급속도로 증가하였다. 비록 원격탐사자료가 수문학분야에 실제 적용된 경우는 매우 적지만, 그 효용성은 크다고 할 수 있다. 수문 모델링과 모니터링분야에서 원격탐사자료를 이용함에 있어 가장 큰 장점 중의 하나는 시공간적인 정보를 지속적으로 생산할 수 있게 되었다는 점이다. 이와 같은 능력은 성공적인 모형의 분석과 예측, 검증을 위한 작업에 필수적이다. 본 연구는 준 분포형 수문학적 모형인 SLURP 모형을 경안천 유역을 대상으로 적용하였으며, MODIS 위성영상을 이용하여 제작한 엽면적지수(LAI), 정규식생지수(NDVI)를 수문모형의 입력자료로 활용하여 경안 수위표 지점에서 일 유출량 모의를 실시하였다. 또한, 각각의 원격탐사자료가 모의된 증발산량의 민감도에 어떤 영향을 미치는 가를 분석하였다.

주요어 : 위성영상, 지리정보, 엽면적지수, 정규식생지수, 준 분포형 수문모형, SLURP

Abstract

Hydrological models are tools intended to realistically represent the basin's complex system in which hydrological characteristics result from a number of physical, vegetative, climatic, and anthropomorphic factors. Spatially distributed hydrological models were first developed in the 1960s, Remote sensing(RS) data and Geographical Information System(GIS) play a rapidly increasing role in the field of hydrology and water resources development. Although very few remotely sensed data can applied in hydrology, such information is of great. One of the greatest advantage of using RS data for

2006년 3월 31일 접수 Received on March 31, 2006 / 2006년 6월 20일 심사완료 Accepted on June 20, 2006

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

1 한국건설기술연구원 수자원연구부 Water Resources Research, Division, Korea Institute of Construction Technology

2 인하대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Inha University

* 연락처 E-mail: parkjs@kict.re.kr

hydrological modeling and monitoring is its ability to generate information in spatial and temporal domain, which is very crucial for successful model analysis, prediction and validation.

In this paper, SLURP model is selected as semi-distributed hydrological model and MODIS Leaf Area Index(LAI), Normalized Difference Vegetation Index(NDVI) as Remote sensing input data to hydrological modeling of Kyung An-chen basin. The outlet of the Kyung An stage site was simulated. We evaluated two RS data, based on ability of SLURP model to simulate daily streamflows, and How the two RS data influence the sensitivity of simulated Evapotranspiration.

KEYWORD : RS, GIS, LAI, NDVI, Semi-Distributed Hydrological Model, SLURP Model

서 론

장래 용수 부족으로 인해 용수를 확보하기 위한 수요자간의 경쟁은 심각한 문제가 아닐 수 없다. 특히, 이러한 문제 해결과 조정을 위하여 물 배분 문제 또한 수자원 분야에 있어 중요한 과제중의 하나이다. 현재, 수문모형은 유역내 수자원을 평가하고 적절한 배분을 위하여 이용하고 있다. 이러한 수문모형은 강수가 유출로 변환되는 현상을 물리적 과정으로 나타내고자 하는 방법으로, 모형 설계의 조건은 모형의 목적에 따라 달라지게 된다. 수문모형은 과거의 유출량에 대한 평가와 보완 및 정도의 개선 등을 위하여 사용되고 있으며, 과거에는 집중형 모형에 대한 연구가 많이 수행되었으나, 최근에는 지형특성을 표현하는 많은 기법들의 개발로 분포형 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(김병식 등, 2004). 하천 유출량은 관측을 통하여 얻을 수 있지만, 아직까지는 신뢰성 있는 장기유출 해석을 하기는 쉽지 않은 것이 현실이다. 이는 근본적으로 유출해석에 필요한 신뢰성 있는 자료의 빈곤에서 그 이유를 찾을 수 있으며, 이러한 측면에서 인공위성 영상자료의 이용은 그 가치가 크다고 할 수 있다. 장기유출 해석과 관련한 최근의 연구는 지리정보체계(GIS)의 발달과 인공위성 영상에 의한 원격탐사자료(RS)의 이용 증가와 밀접히 관련되어 있다. 특히, 엽면적지수(Leaf Area Index, 이하

LAI) 또는 정규식생지수(normalized difference vegetation index, 이하 NDVI)자료를 인공위성 영상을 이용한 원격탐사자료로부터 획득하여 이용하게 되면서 대상유역의 식생 및 토지 이용의 상황을 쉽고 정확하게 파악할 수 있게 되었으며, 기존의 토양정보나 지형정보와 함께 지리정보체계라는 도구 안에서 쉽게 조작할 수 있게 되었다. 즉, 유출해석에 필요한 여러 가지 소 유역별 정보뿐만 아니라, 모형의 매개변수들을 직접 추정할 수 있게 되었다. 유역의 물 순환과정에서 유역에 내린 강수량의 60% 이상이 증발산량으로 소모되고 있지만, 유역내의 정확한 식생정보를 추정하기에 현실적으로 많은 어려움이 있는 관계로 수문모형에서 엽면적지수(LAI) 활용은 아직까지 활발하지 않은 상태이다.

원격탐사를 이용한 LAI자료를 수문모형에 적용한 연구사례를 살펴보면, 국외의 경우, Refsgaard와 Storm(1995)이 MIKE SHE 모형에 이용하였으며, Kite(1995)가 SLURP 모형에 입력하여 토지피복 정보로써 활용한 바 있다. 국내에서는 임혁진 등(2004)이 NOAA/AVHRR 인공위성영상 자료를 이용하여 제작한 NDVI를 LAI 산출을 위한 입력인자로 활용하였다.

지금까지 개발된 장기 강우-유출 모형 중 LAI를 직접 입력인자로 이용하는 모형은 ANSWERS2000, CLEAMS, EPIC, GLEAMS, Mike-SHE, SLURP 등이 있으며, 그 밖의 SWAT, SSARR, PRMS, HBV96 그리고 HSPF 등의 모형에서도 식생 피복에 의한 차

단 기능을 모형에 탑재하고 있다.

본 연구에서는 인공위성 영상자료를 이용하여 수문모형에 적용될 수 있는 지역적 규모의 LAI를 추정하는 현실적인 방법론을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 MODIS 위성영상을 이용하여 제작한 NDVI와 LAI를 SLURP 모형의 LAI 입력인자로 활용하여 각각의 입력 자료가 물 순환과정에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 하였다.

수문모형에서의 LAI의 역할

식생관련 정보 중 엽면적지수(LAI)란 단위 지표 면적당 총 엽면적의 비를 나타내는 것으로, 환경생태, 기상, 수문 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 식물에서 있는 에너지 순환, 이산화탄소 및 산소의 교환, 수분의 순환에 있어서 중심역할을 하는 부분이므로, 식생지역에서 단위면적 당 엽량은 매우 중요한 정보로 활용될 수 있다. 수문모형에서도 LAI 수치가 높을수록 강우가 토양에 떨어지기 전에 식생에서의 차단이 증가하게 되며, 또한 증발산량에도 많은 영향을 미치게 된다.

$$\text{엽면적지수} = \frac{\text{대상 지역 식물 잎의 총 면적 (m}^2\text{)}}{\text{대상 지역의 총 면적 (m}^2\text{)}} \quad (1)$$

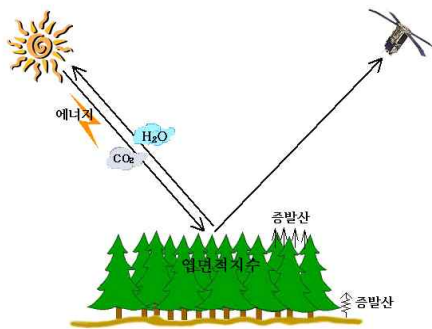


FIGURE 1. 물 순환 과정에서의 엽면적 지수의 역할

LAI는 강수의 침투와 식생에 의한 강수의 차단 및 증발산량에 영향을 미친다. 엽면적이 넓으면 넓을수록 강수를 많이 차단하고, 일시적으로 많은 엽면적에 강수를 포함하고 있으면서 증발산을 이루어지게 한다. 즉, LAI는 수문모형의 증발산량 산정 요소에 중요한 역할을 한다고 할 수 있다. 수문모형에서 잠재 증발산량으로부터 실제 증발산량을 산정하기 위해서 간단한 것부터 복잡한 것까지 다양한 방법들이 개발되어 왔다. 물리적 기반의 준 분포형 수문모형에서 실제 증발산량을 계산하기 위해 이용되는 가장 복잡하고 물리적인 방법으로는 Penman-Monteith나 Morton CRAE 그리고 Spittlehouse-Black 등과 같이 많은 기상자료를 이용하는 것으로 이는 실제 유역에 적용하는데 있어서 기상자료의 가용성 때문에 제한이 있을 수 있다. 대부분의 수문모형에서는 실제 증발산량을 잠재증발산량과 토양습윤의 함수로써 간주한다(Palmer, 1965; Saxton와 McGuinness, 1982; Dyck, 1983). 모형에서의 저류비(storage ratio, 실제 토양저류량/최대토양저류량)는 토양에서의 습윤정도를 대표하는 것으로 일반적으로 준 분포형 수문모형(강수-유출 모형)에서의 실제 증발산(AET)과 잠재 증발산(PET)은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(김 병식 등, 2004).

$$AET = PET \cdot f(\text{Precipitation}, LAI, SMT/SMC) \quad (2)$$

여기서, SMT : 실제 토양습윤량
 SMT : 포장수량(filed capacity)에서의 토양습윤량
 LAI : 엽면적 지수

SLURP 모형의 개요

본 논문에서는 SLURP 모형을 LAI의 유용성을 확인하기 위한 수문모형으로 선택하였으며, 본고에서는 지면 관계상 이 모형에 대한

일반적 개요, 기본적 구조 그리고 LAI와 직접 관계가 있는 모형의 요소만을 기술하고자 한다. SLURP 모형의 자세한 내용은 참고문헌으로 대체함을 미리 밝히는 바이다.

SLURP 모형은 SSARR 모형과 같은 복잡한 모형의 대안으로서 중규모 유역에 사용하기 위해 1975년에 처음 개발되었으며 그 이후 12 차례에 걸쳐 개선되어 왔다(Kite 등, 1999; 김병식 등, 2003). 초기에는 SLURP(Simple Lumped Reservoir Parametric)으로 개발되었으나, SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes)의 준 분포형 모형으로 변환되었다. SLURP는 준 분포형 모형이지만, 분포형 모형으로 사용이 가능한 물리적 해석 모형으로써 강수사상을 강우사상과 강설사상으로 분리하여 고려할 수 있다.

1. SLURP 모형의 구조

1.1 연직방향 물수지

SLURP 모형은 전체유역을 ASA(aggreated simulation area)라는 소유역으로 구분하여 모의하는 일 단위(daily time step) 유출 모형이며 지상학적 매개변수(ASA의 평균고도, 하도 길이, 토지피복특성 등), 시계열 자료(온도, 강수 등) 그리고 물리적 매개변수(Manning 계수, 침투율 등)를 입력 자료로 이용한다. 특히, 지상학적 매개변수들은 수작업 또는 수치지형 분석(digital terrain analysis) 모형을 이용하여 추출할 수 있다. SLURP 모형의 유출모의는 ASA별로 연직방향 물수지(vertical water balance)분석을 실시한 후 다시 각각의 ASA들에 대하여 하도 추적을 통해 전체유역의 출구지점에서의 유출량을 얻게 된다. SLURP 모형의 연직방향 물수지는 4개의 층 구조로 구성되어 있으며, 주요 매개변수는 강설 초기 저류량, 지표하 초기 저류량, 최대 침투율, Manning 계수, 지표수 보존상수와 지표하 보존상수 및 최대 저류량, 강수 보정계수, 융설 온도 등이 있다. 그림 2는 SLURP 모형의 연

직방향 물수지 구조를 나타낸 것이다.

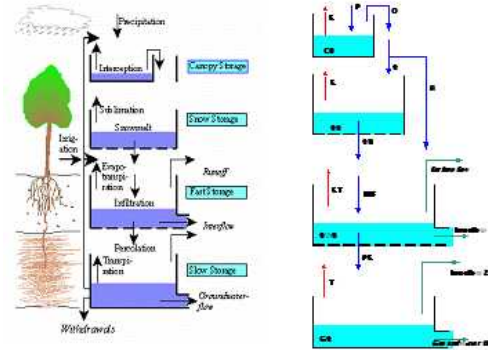


FIGURE 2. SLURP 모형의 연직방향 물수지 구조

1.2 SLURP 모형에서의 LAI의 역할

강수는 작물에 의해서 차단(Interception)되며, 최대 차단량은 작물의 차단 능력과 엽면적 지수(LAI: leaf area index)에 의한 함수로써 표현된다(Spittlehouse, 1989). 강수입자크기와 다중차단층을 고려할 경우도 있지만(Calder, 1996), 대부분의 경우에 있어서 차단된 수분으로부터의 증발량 자체가 상대적으로 적기 때문에 물순환 해석에서는 제외해도 무방하다. SLURP 모형은 SiB(simple biosphere model)이라는 작물 계수를 이용하여 NDVI로부터 LAI를 계산할 수 있다.

$$I = A \cdot P^B \tag{3}$$

여기서, P : 강수량(mm)

I : 차단량(mm)

A : 차단 계수 $\left(\frac{\text{초기화} = 1}{LAI_{max}} \right)$

B : 차단 계수 (초기화 = 1)

이렇게 차단된 강수는 e_{water} 의 비율로 증발된다. Penman-Monteith 방법의 경우, 토양에 대한 반사계수는 0.15, 수관의 저항은 0으로 초기화하며, 경작물(30s/m)에서부터 산림지역(150s/m)까지 다양하다. 이런 매개변수들은 Penman-Monteith

방법에서만 이용된다(김병식 등 2003).

SLURP 모형은 5가지의 증발산 방법이 탑재되어 있으며, 유역에 대한 토지피복도와 LAI 자료를 이용하여 토지피복별 증발량, 증산량 그리고 증발산량을 산정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 가령, 5가지 모형 중의 하나인 Morton CRAE(complementary relationship areal evapotranspiration) 모형의 예를 들어 나타내면 식 (4)과 같다.

$$M(\text{이류에너지}) = 1.37R_{nl} - 0.394R_s \quad (4a)$$

$$E_p(\text{잠재증발산량}) = \frac{s \cdot R_n}{\lambda(s + \gamma)} + \frac{\gamma \cdot f_A(e_a^* - e_a)}{\lambda(s + \gamma)} \quad (4b)$$

$$E_w(\text{습윤증발량}) = \frac{\alpha \cdot s(R_n - M)}{\lambda(s + \gamma)} \quad (4c)$$

$$E_a(\text{실제증발산량}) = 2E_w - E_p \quad (4d)$$

여기서, γ : 습도계 상수 (= 0.066kPa/°C)

λ : 증발량에서의 잠열(J/kg)

R_{nl} : 순 장파복사 플럭스밀도(MJ/m²)

R_s : 태양일사량(MJ/m²)

$$soilcover = e^{-0.6LAI} \quad (4e)$$

$$cropcover = 1 - soilcover$$

$$e_{soil}(\text{토양으로부터의 증발량}) = E_a \times soilcover \quad (4f)$$

$$e_{water}(\text{작물에대한증발량}) = E_a \times cropcover \quad (4g)$$

$$e_{actual} = e_{potential} \times \frac{store - \max \times w_p}{\max \times (f_c - w_p)} \quad (4h)$$

여기서,

store : 지표면 저류량 or 지표하 저류량

max : 최대 지표면 저류량 or 최대 지표하 저류량

f_c : 강수 후, 토양 속에 남아 있는 수분량(mm)

w_p : 식물이 말라 죽게 될 때의 토양함수량(mm)

모형의 적용

본 연구에서는 연구 대상 지역을 선정한 후

LAI를 관측하여, 위성영상으로부터 얻은 LAI 또는 NDVI 값과 비교하였다. 또한, 각각의 LAI 자료에 대하여 SLURP 모형의 매개변수를 보정한 후 SLURP 모형에 의해 모의된 수종별 증발량을 산정함으로써 유출량 변화 및 증발산량에 미치는 영향을 검토하였다. 그림 3은 본 연구의 흐름을 나타낸 것이다.

본 연구는 위성영상자료를 준 분포형 수문모형에 입력함으로써 그 활용성을 검토하는데 목적이 있으므로, 대상유역의 위성영상 존재여부 및 수문기상자료와 지형자료 보유여부를 우선적으로 고려하였다. 또한, NDVI와 LAI 자료의 특성이 잘 반영될 수 있도록 식생이 넓게 분포하고 산림유형이 다양한 지역을 대상으로 하였다. 이와 같은 사항을 고려하여 최종적으로 경안천 유역의 경안교 상류 지역을 대상 유역으로 선정하였다.

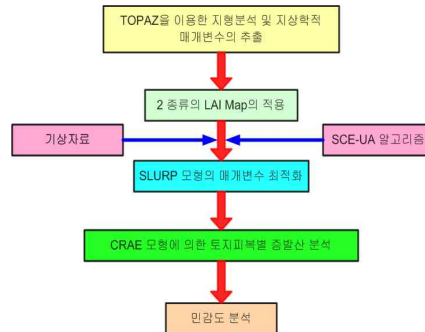


FIGURE 3. 분석 흐름도

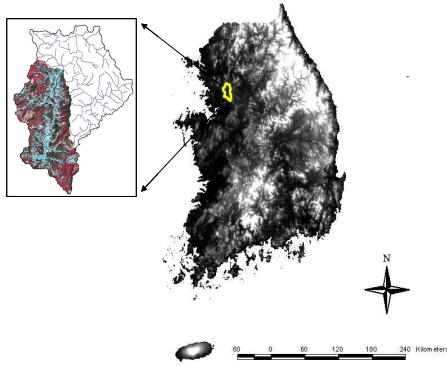


FIGURE 4. 경안천 상류 유역도

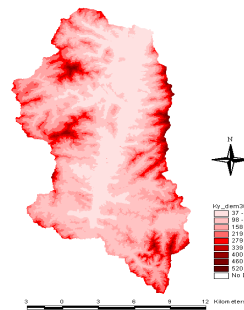
1. 자료의 수집 및 입력자료 구축

경안천 상류유역은 한강 대권역에 포함되어 있는 24개 중권역 중 하나로 3개의 표준 유역으로 이루어져 있다. 유역 면적은 253.35 km²이며 전체 유역 중 산림이 차지하는 비율은 67.3%이고 임목의 수령은 20년~50년이 주류를 이루고 있다. 본 연구에서는 경안천 상류유역내의 경안교 지점을 대상으로 강우-유출 모의를 실시하였다. 경안교 지점은 양질의 수위자료를 보유하고 있으며 수위-유량 관계곡선식이 작성되어 있으며, 성남, 경안, 낙생, 용인, 남곡, 운학 등 6개의 우량관측소가 분포되어 있다. 본 연구는 2001년 1월~2003년 12월간의 일 유출량 자료, 6개 우량 관측소의 일 강우량 자료, 수원기상대의 기상자료를 이용하였다.

1.1 공간자료의 수집 및 분석

본 연구에서는 SLURP 모형에 공간자료를 입력하기 위해 표 1과 같은 GIS 자료와 위성영상 자료를 이용하였다.

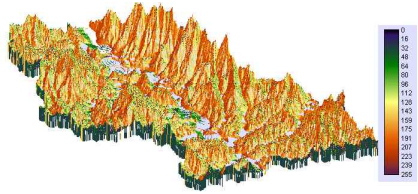
DEM은 1:5,000 수치지도에서 추출한 등고선과 표고점을 이용하여 TIN을 생성한 후 이를 격자화하여 생성하였다. 그림 5의 (a)와 (b)는 경안천 상류 유역의 DEM과 이를 이용하여 생성한 3차원 유역도이다. 주하천이 유역의 중앙을 가로질러 흐름을 알 수 있으며, 유역의 동쪽이 서쪽 보다 경사가 급함을 확인 할 수 있다.



(a) DEM

TABLE 1. SLURP 수문모형의 입력자료로 쓰인 시공간자료의 속성

| | DEM | 정밀토양도 | 토지피복도 |
|--------|--------------|----------|----------------------------------|
| 공간해상도 | 30m | 1:25,000 | 30m |
| 입력자료포맷 | ASCII | shape | ASCII |
| 원시자료 | 1:5,000 수치지도 | - | Landsat7 ETM+ 2000년 4월 27일 영상 |
| 분류체계 | - | 88개 토양통 | 8개 클래스 |

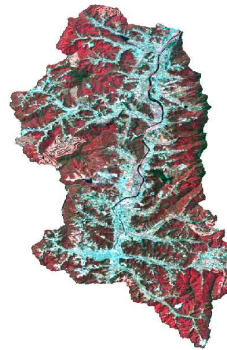


(b) 3차원 유역도

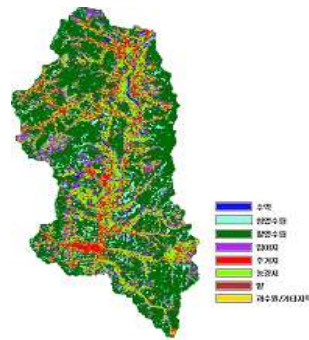
FIGURE 5. 경안천 상류 유역의 수치고도 자료

토지피복도는 2000년 4월 27일의 LANDSAT7 ETM+ 영상을 감독분류하여 제작하였다. 영상의 전처리는 ERDAS IMAGINE 8.5를 사용하였으며, 기하보정은 image-to-image 기법을 적용하여 실시하였다. 영상재배열은 최근린 내삽법(Nearest Neighbor)을 적용하였으며 기하보정에 의한 RMSE(root mean square error)는 0.642 pixel로 계산되었다. 토지피복도 작성을 위해 침엽수림, 활엽수림, 논경지 등 8개의 훈련지역을 선정 후 최대우도법(maximum likelihood classification) 기법을 통해 훈련지역들의 통계적인 수치를 계산하였다. 그림 6-(b)의 토지피복도는 참조지도와 일치여부를 빈도로 계산하였으며, 전체정확도는 80.5%를 Kappa 지수는 0.7557로 나타났다.

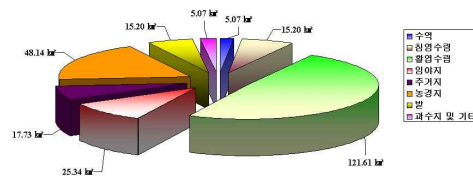
토지피복도의 분류항목은 환경부 대분류항목을 기준으로 하였으며, 산림을 침엽수림과 활엽수림으로 세분류하였고 나대지를 임야지로 분류하였다. 그림 6-(c)에서와 같이 경안천 상류 유역은 전체 유역 중 활엽수림 지역이 약 48 %, 침엽수 10% 그리고 논경지가 19%로 구성되어 있다. 시기별 특성을 고려할 때 4월은 활엽수림의 성장이 초기단계로 30m 급의 위성영상으로는 활엽수와 침엽수림의 구분이 용이하지 않은 시기이다. 향후 정확한 수종별 구분을 위해서는 다중시기의 토지피복도나 수치임상도의 활용이 요구된다.



(a) Landsat 7 ETM+



(b) 토지피복도



(c) 토지피복 구성비

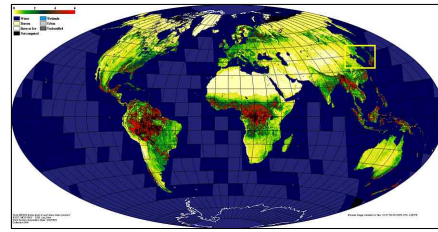
FIGURE 6. 경안천 상류 유역의 토지피복상태 분석

1.2 NDVI 및 LAI 시공간 자료의 수집 및 분석

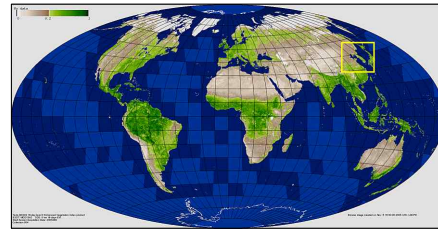
SLURP 모형에서는 작물에 의한 강수의 차단 정도를 고려하고, 토양과 작물로부터의 증발량과 작물로부터의 증산을 분리하기 위해서 LAI를 사용하며, 만일, LAI가 부재할 경우, 이는 SiB작물 계수에 의해서 분류된 월별 NDVI로부터 모형 내에서 계산된다(Kite, 1995). 본 연구에서는 MODIS 위성영상자료를 이용하여

경안천 상류 유역의 식생별 월별 LAI와 NDVI 값을 산정하였으며 이를 이용하여 식생조건을 반영하고자 하였다. 표 2는 본 연구에서 이용한 MODIS 위성영상자료의 특성에 대하여 수록한 것이며, 그림 7은 MODIS LAI, NDVI 공간분포도를 나타낸 것이다. 본 연구에서 이용한 MODIS영상 자료의 특성은 표 2와 같다.

MODIS의 LAI 영상은 수학적 모델링을 통해 LAI를 계산하는 방법을 채택하고 있으며, 대기의 영향을 받아 수학적 모델의 적용이 불가능한 경우에 대해서는 백업알고리즘으로 영상의 NDVI와 LAI와의 관계식을 적용하는 방법을 활용하고 있다. MODIS LAI는 입력영상으로 사용되는 MODIS 토지피복분류영상의 정확도에 영향을 받으며 김선화(2003)는 광릉지역을 대상으로 MODIS LAI를 검증하여 MODIS LAI가 산림지역 및 비 산림지역 모두 과다추정된다는 것과 입력자료로 사용되는 MODIS 피복분류영상이 14.28%의 분류정확도를 갖는다는 것을 제시하였다. MODIS NDVI는 적외선과 근적외선 분광 밴드의 조합으로 이루어지며, 식생 구조와 생물기후학적, 생물리학적 요소들의 변화를 계절별, 년 별로 분석하는데 사용된다.



(a) MODIS LAI



(b) MODIS NDVI

FIGURE 7. MODIS 위성 영상 자료의 분포도

본 연구에서는 그림7-(a)과 7-(b)와 같이 획득한 MODIS 위성영상자료로부터 수종별 월별 LAI 및 NDVI 대표값을 추출하기 위하여 그림 8과 같은 순서에 의하여 분석을 실시하였다.

영상의 수집은 EOS(earth observing system)의 Data Gateway를 통해 이루어 졌으며, 1200Km×1200Km의 공간범위를 갖는 Sinusoidal 투영체계를 TM 좌표체계로 변환하기 위해 DAAC(data active archive center)에서 제공하는 MODIS reprojection tool을 사

TABLE 2. MODIS 위성영상자료의 특성

| | MODIS NDVI | MODIS LAI |
|--------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 파일명 | Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m | Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 1km |
| 공간해상도 | 250m | 1 Km |
| 분광해상도 | 16 bit | 8 bit |
| 입력사용영상 | 반사율영상 (MOD09) | 반사율영상 (MOD09), 피복분류영상(MOD12) |
| 공급주기 | 16일 | 8일 |
| 투영법 | 원통투영법 | 원통투영법 |
| 수집기간 | 2003년 1월 1일~2003년 12월 31일 | 2003년 1월 1일~2003년 12월 31일 |

용하였다. 또한, 영상 헤더파일에서 제공하는 gain과 offset을 이용하여 화소값을 변환한 후 경안천 상류유역에 대한 추출 작업을 수행하였다. 또한, 수중에 따른 LAI 값의 변화를 분석하기 위해 토지피복도에서 침엽수 및 활엽수 레이어를 추출한 후 이를 AOI(area of interest)로 설정하여 MODIS LAI, NDVI에서 침엽수 지역과 활엽수 지역을 분리하였다. 마지막으로 SLURP 모형의 입력 자료로 활용하기 위하여 1Km, 250m의 해상도를 갖는 LAI, NDVI를 30m의 공간해상도로 분해하였다.

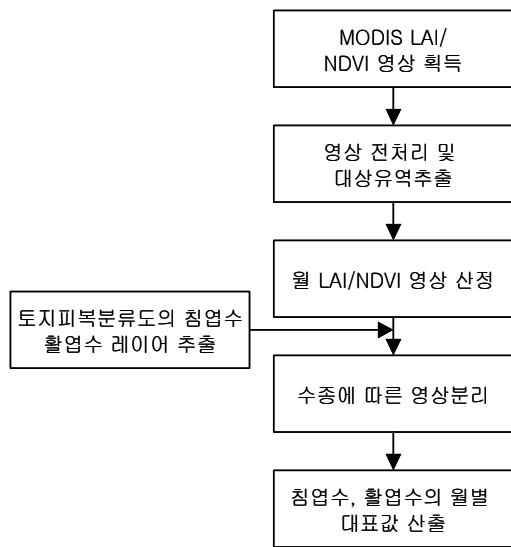
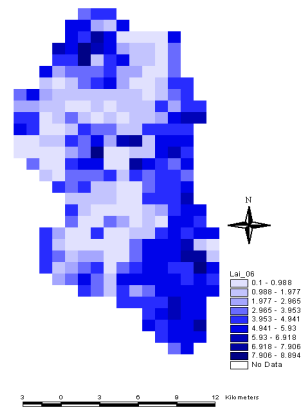
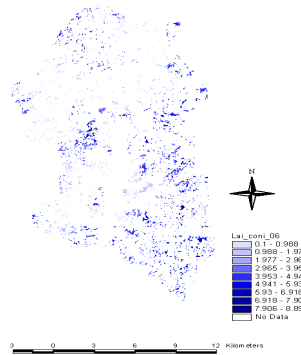


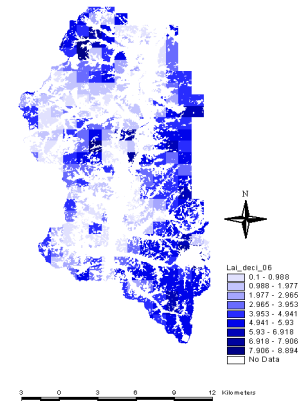
FIGURE 8. MODIS LAI/NDVI 수집 및 수중별 월 대표값 산정 흐름도



(a) 유역 전체 LAI

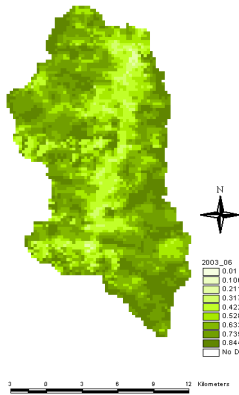


(b) 침엽수 LAI

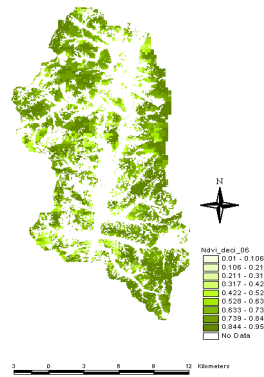


(c) 활엽수 LAI

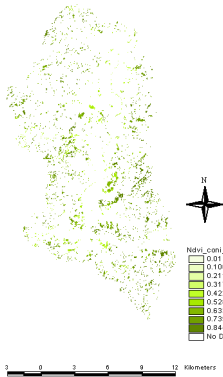
FIGURE 9. MODIS 영상 자료로부터 추출된 경안천 유역의 LAI/NDVI 공간분포도(2003년 6월)



(d) 유역 전체 NDVI



(f) 활엽수 NDVI



(e) 침엽수 NDVI

1.3 TOPAZ를 이용한 지상학적 인자 추출 및 ASA 소유역 분할

본 연구에서는 대상유역을 ASA로 분할하고 SLURP 모형의 지상학적 매개변수(ASA의 평균고도, 하도길이, 물리적 매개변수를 추출하기 위해 IDRISI 32와 수치지형분석모형(digital terrain analysis model)인 TOPAZ(Garbrecht와 Martz, 1993)를 이용하였다. DEM 자료와 토지피복 자료를 TOPAZ에 입력하여 경안교 상류 유역을 13개의 ASA로 구분하였으며, SLURP 모형의 지상학적 매개변수들을 추출하였다. 그림 10-(a)과 10-(b)는 경안교 상류 유역의 ASA 소유역 분할과 강우관측소의 위치를 나타낸 것이다.

TABLE 6. 월별 LAI와 NDVI의 비교

| | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월 | 12월 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MODIS LAI -침엽수 | 0.923 | 0.750 | 0.590 | 1.307 | 3.958 | 3.567 | 2.549 | 2.840 | 2.540 | 2.629 | 0.90 | 0.713 |
| MODIS LAI -활엽수 | 0.982 | 0.761 | 0.596 | 1.388 | 4.097 | 3.749 | 2.605 | 2.950 | 2.627 | 2.729 | 0.906 | 0.735 |
| MODIS NDVI -침엽수 | 0.422 | 0.413 | 0.369 | 0.501 | 0.735 | 0.740 | 0.670 | 0.758 | 0.653 | 0.677 | 0.414 | 0.394 |
| MODIS NDVI -활엽수 | 0.410 | 0.404 | 0.364 | 0.513 | 0.762 | 0.761 | 0.679 | 0.766 | 0.658 | 0.690 | 0.402 | 0.382 |

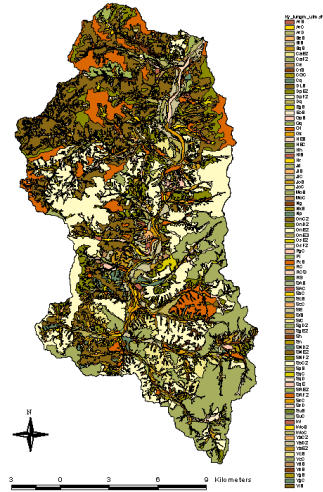


FIGURE 10. 경안천 상류유역의 ASA 소유역 분할과 강우관측소의 위치

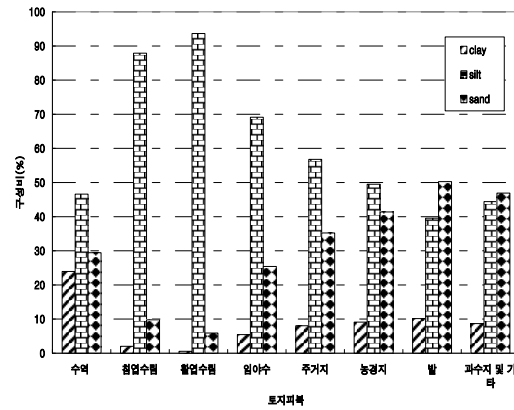
1.4 토양특성

일반적으로 대부분의 준 분포형 수문모형들이 토양층의 특성을 반영하기 위해서 SCS CN 값을 입력 값으로 사용하는 것과는 달리 SLURP 모형은 모형내에서 토양변환함수(pedo-transfer function)을 이용하여 직접 토양 특성인 토양수분 함유량(Field Capacity), 시들

음점(Wilting Point)등을 계산하도록 되어 있다. 본 연구에서는 경안천 상류유역의 정밀 토양도를 이용하여 토지피복별 토양성분을 구분한 후 토양의 특성치들을 계산하였다. 그림 11-(a)는 경안천 상류 유역의 정밀토양도를 나타낸 것이며, 그림 11-(b)는 토지피복별 토성분류 결과를 나타낸 것이다.



(a) 정밀토양도



(b) 토지피복별 토성분류

FIGURE 11. 경안천 상류유역의 정밀토양도 및 토지피복별 토성분류

2. SLURP 모형의 매개변수 보정

2.1 일 유출 수문곡선과 효율계수의 비교

본 연구에서는 2003년 관측 수문기상 자료 및 유출량을 입력 자료로 하여 SCE-UA 최적화 알고리즘을 이용하여 SLURP 모형의 매개변수를 최적화하였다. 그림 12는 2003년 일 수문곡선을 비교한 것이며, 그림 13과 14는 각각 관측 유출량과 모의 유출량의 잔차분석 결과 및 Q-Q plot 결과를 나타낸 것이다. 보정 결과, Nash 효율 계수는 0.71, Garrick 효율계수는 0.95였으며, 평균계산 유출량은 56.17 m³/s, 평균관측유출량은 54.97 m³/s로써 1.20의 평균 오차를 나타내었다. 이를 통해 본 SLURP 모형의 매개변수가 적절히 보정되었음을 확인 수 있다.

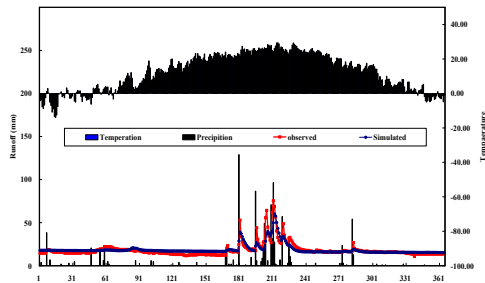


FIGURE 12. 2003년 일 수문곡선의 비교

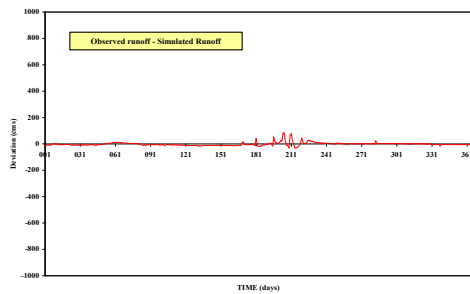


FIGURE 13. 잔차분석 결과

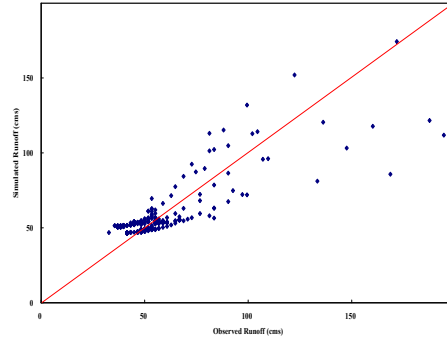


FIGURE 14. Q-Q plot

그림 15는 Morton CRAE 모형에 의해 산정된 경안천 상류유역의 토지피복별 실제 증발산량을 비교한 것으로 산림지역의 경우 증발산량이 증발량에 비해 크게 산정되며, 활엽수림 지역이 침엽수림 지역에 비해 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 그림 16은 SLURP 모형에 의해 모의된 경안천 상류의 물순환 성분의 시공간적 분포를 나타낸 것이다.

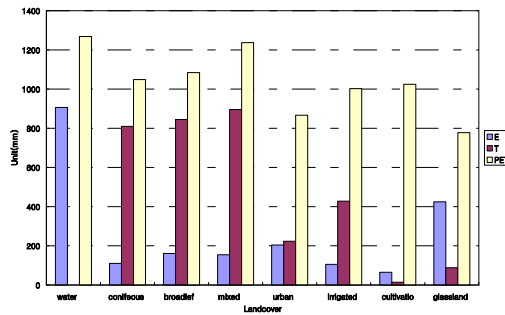
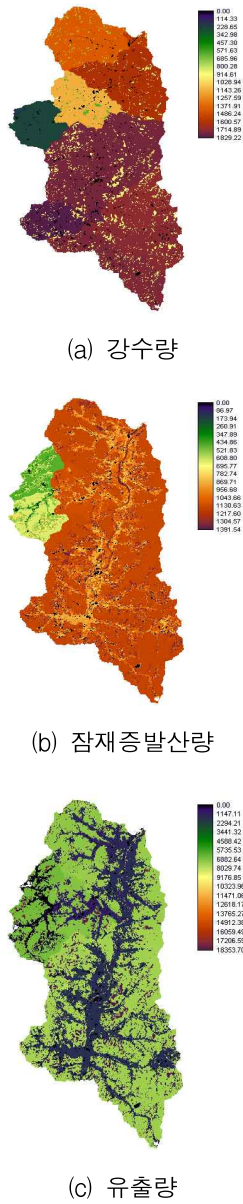


FIGURE 15. 토지피복별 증발산량의 비교



의 증발산량 산정 모형을 탑재하고 있으며 각각의 증발산 모형이 SLURP 모형의 매개 변수에 미치는 민감도분석을 국내유역에 대하여 분석한 바가 있다(김 병식, 2004). 본 연구에서는 이를 근거로 하여 5가지 증발산 모형 중 Morton CRAE 모형을 이용하여 경안천 유역의 실제 증발산량을 산정하였으며, 앞에서 언급한 위성영상자료에 따라서 유출량 및 증발산량에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 분석하였다 그림 17-(a)는 위성영상자료별 일 유출량을 비교한 것으로 그림에 나타낸 바와 같이 MODIS 위성영상 자료에 따라 일 유출량에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나, 월 유출량의 경우, 그림 17-(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 NDVI 자료를 이용하여 식생 특성을 반영하는 경우가 LAI를 이용하는 경우보다 7월과 8월의 월 평균 유출량이 각각 0.847, 0.459 만큼 크게 모의됨을 알 수 있었다.

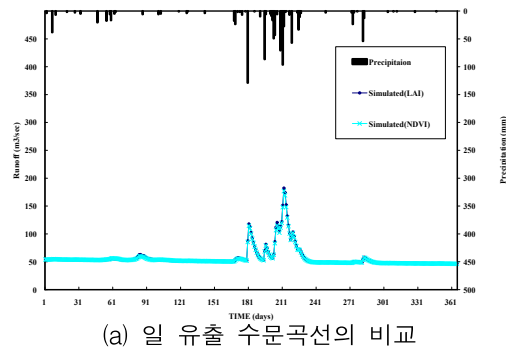
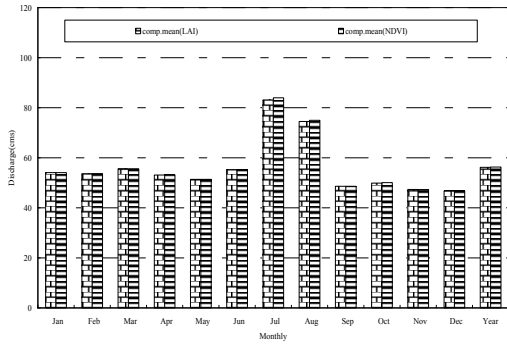


FIGURE 16. SLURP 모형에 의해 모의된 경안천 상류의 물순환 성분의 공간 분포도

3. 위성영상자료가 증발산량 및 유출량에 미치는 영향 분석

본 연구에서 이용한 SLURP 모형은 5종류



(b) 월유출량의 비교

FIGURE 17. 위성영상 자료별 유출량의 비교

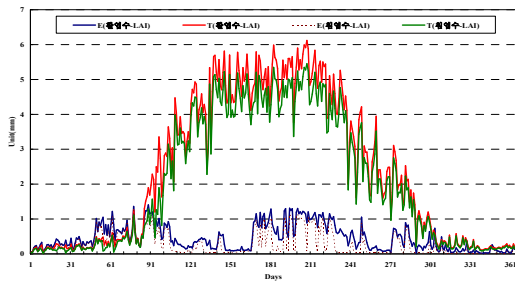


FIGURE 18. 수종별 일 증발산량 비교(MODIS LAI)

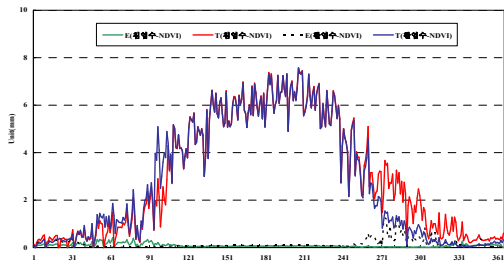


FIGURE 19. 수종별 일 증발산량 비교(MODIS NDVI)

본 연구에서는 침엽수종과 활엽수종에 대한 실제 일 증발량과 실제 일 증산량을 모의하였다. 그림 18과 19는 각각 MODIS LAI와 MODIS NDVI에 의해 모의된 증산과 증발량을 나타낸 것으로써, 두 수종 모두, 증산량이 증발량 보다 상당히 크게 산정됨을 알 수 있다. 각 LAI값에 대한 증발산량의 반응을 보면, 그림 18에 볼 수 있는 바와 같이 LAI 영상자

료를 이용한 경우 전반적으로 활엽수의 증산량과 증발량이 침엽수에 비해 큼을 확인할 수 있다. 그림 19에서 볼 수 있듯이, NDVI를 이용한 경우, 전반적으로 증발량이 LAI에 의해 산정된 것보다 작게 산정됨을 알 수 있으며, 일년 중 겨울로 접어드는 10월, 11월 그리고 12월로 갈수록 침엽수의 증산량이 활엽수의 증산량보다 증가됨을 확인할 수 있었다. 그리고 봄으로 접어드는 1월에서 4월로 갈수록 활엽수의 증산량이 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과만을 보면, NDVI를 이용하여 증발산을 모의하는 경우가 LAI를 이용하는 경우 보다 일반적으로 인식하고 있는 자연 현상을 잘 재현 한다고 할 수 있다. 이는 MODIS LAI 제작을 위한 입력자료인 MODIS 토지피복분류영상의 낮은 분류정확도와 MODIS NDVI에 비해 낮은 공간해상도의 영향으로 판단되며, 향후 대상유역에 대한 MODIS LAI의 검증 및 공간해상도를 고려한 분석이 요구된다.

결론

본 연구에서는 SLURP 모형의 입력자료로 위성영상으로부터 얻은 LAI와 NDVI를 활용하였으며, 각각의 LAI 자료에 대하여 SLURP 모형의 매개변수를 보정한 후 SLURP 모형에 의해 모의된 수종별 증발량을 산정함으로써 유출량 변화 및 증발산량에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 2003년 관측 수문기상 자료 및 유출량을 입력자료로 하여 SCE-UA 최적화 알고리즘을 이용하여 SLURP 모형의 매개변수를 최적화하였으며, 보정 결과, Nash 효율 계수는 0.71, Garrick 효율계수는 0.95였으며, 평균계산 유출량은 56.17 m³/s, 평균관측유출량은 54.97 m³/s로써

1.20의 평균 오차를 나타내었다. 이를 통해 본 SLURP 모형의 매개변수가 적절히 보정되었음을 확인 수 있다.

- (2) 본 연구에서는 위성영상자료에 따라서 유출량 및 증발산량에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 분석하였다 그 결과, 위성영상 자료에 따라 일 유출량에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인 할 수 있었으나, 월 유출량의 경우, NDVI 자료를 이용하여 식생 특성을 반영하는 경우가 LAI를 이용하는 경우보다 7월과 8월의 월 평균 유출량이 크게 모의됨을 알 수 있었다.
- (3) 각 위성 영상 자료에 대한 증발산량의 반응을 보면, LAI 영상자료를 이용한 경우가 전반적으로 활엽수의 증산량과 증발량이 침엽수에 비해 큼을 확인 할 수 있었으며, NDVI를 이용한 경우, 전반적으로 증발량이 LAI에 의해 산정된 것보다 작게 산정됨을 확인할 수 있었다. 또한, 일년 중 겨울로 접어드는 10월, 11월 그리고 12월로 갈수록 침엽수의 증산량이 활엽수의 증산량보다 증가되며, 봄으로 접어드는 1월에서 4월로 갈수록 활엽수의 증산량이 증가함을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과만을 보면, NDVI를 이용하여 증발산을 모의하는 경우가 LAI를 이용하는 경우 보다 일반적으로 인식하고 있는 자연 현상을 잘 재현 한다고 할 수 있다.
- (4) MODIS LAI의 경우 MODIS NDVI에 비해 넓은 공간해상도와 자료제작에 사용되는 MODIS 토지피복분류 영상의 분류오차로 인해 수종의 시기별 증발산량 변화를 적절히 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 향후 MODIS LAI를 수문모형의 입력 자료로 활용하기 위해서는 자료의 정확도 검증 및 공간해상도에 대한 고려가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 공공기술연구회의 일반연구사업 (사업명 : 위성자료 공공활용 연구-위성영상을 이용한 하천정보생산 및 활용에 관한 연구)과 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비 지원(과제:1-2-2)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. **KAGIS**

참고 문헌

- 김병식, 김형수, 서병하. 2004. SLURP 모형의 증발산 모형에 대한 평가. 한국수자원학회 37(9):745-758.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원. 2003. SLURP 모형을 이용한 하천 유출량 모의. 대한토목학회 23(4B):289-303.
- 김선화, 2003. 한반도 중부 온대림지역에서 MODIS 엽면적지수 검증. 인하대학교 대학원 석사학위논문. 64쪽.
- 임혁진, 권형중, 장철희, 김성준. 2004. SLURP 모형을 이용한 유출수문분석 -소양강댐 유역을 대상으로-. 한국수자원학회 37(8):631-641.
- Calder, I.R. 1996. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model. Journal of Hydrology 185:363-378.
- Dyck, A. j. 1983. Overview on the present status of the concepts of water balance models. New Approachs in Water Balance Computation. IAHS Publ. 148:3-19.
- Garbrecht, J. and L.W. Martz. 1993. Network and subwatershed parameters extracted from digital elevation models : The Bill's Creek experience. Water Resources Bulletin 29(6): 909-916.
- Kite, G.W. 1995. The SLURP model. In: Singh, V.(ed.). Computer Models of Watershed Hydrology, WRR publication, pp.512-562.
- Kite, G.W. and U. Haberlandt. 1999. Atmospheric

- model data for macroscale hydrology. Journal of Hydrology 217:303-313.
- Palmer, W. C. 1965. Meteorologic drought. Research Report, US Weather Bur. USA, 58pp.
- Refsgaard, J.C. and B. Storm. 1995. MIKE SHE. In: Singh, V.(ed.). Computer Models of Watershed Hydrology, WRR publication, pp.809-846.
- Saxton, K.E. and J. L. McGuinness. 1982. Evapotranspiration ; Hydrologic Modeling of small watersheds. 50pp.
- Spittlehouse, D.L. 1989. Estimating evapotranspiration from land surfaces in British Columbia. In: Estimation of Areal Evapotranspiration. IAHS Publication 177:245-253. [KAGIS](#)