

SLURP모형의 증발산 모형에 대한 평가

Evaluation of the Evapotranspiration Models in the SLURP Hydrological Model

김 병 식* / 김 형 수** / 서 병 하***

Kim, Byung-Sik / Kim, Hung-Soo / Seoh, Byung-Ha

Abstract

Hydrological models simulate the land phase components of the water cycle and provide a mechanism for evaluating the effects of climatic variation and change on water resources. Evapotranspiration(ET) is a critical process within hydrological models. This study evaluates five different methods for estimating ET in the SLURP(Semi-distributed Land Use Runoff Process)model, in the Yongdam basin. The five ET methods were the FAO Penman-Monteith, Morton CRAE (Complementary Relationship Area Evapotranspiration), the Spittlehouse-Black, the Granger, the Linacre model. We evaluated the five ET models, based on the ability of SLURP model to simulate daily streamflow, and How the five ET methods influence the sensitivity of simulated streamflow to changes in key model parameters and validation SLURP independently for each ET methods. The results showed that the Morton CRAE model had more physical significance and gave better agreement simulated stream flow and recorded flows. It noted that the Morton CRAE model might be more appropriate for the simulation of the actual evapotranspiration in SLURP hydrologic model.

Keywords : Climatic variation, Evapotranspiration model, SLURP, Sensitivity analysis

요 지

수문 모형들은 물 순환에 있어서의 지표 성분을 모의하고 기후 변동이 수자원에 미치는 영향을 평가하는데 메커니즘을 제공한다. 이러한 모형들에 있어서 증발산량(Evapotranspiration, ET)은 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 SLURP 모형에서 증발산량 산정을 위하여 제시하고 있는 FAO Penman-Monteith, Morton CRAE(Complementary Relationship Area Evapotranspiration), Spittlehouse-Black, Granger, the Linacre 등, 5 가지의 방법론이 일 하천유출량에 미치는 영향을 분석하고, 각 증발산 방법과 SLURP 모형의 매개변수와의 민감도 분석을 실시하였다. 분석 결과, 본 논문에서는 SLURP 모형을 이용하여 용담댐 유역의 일 유출량을 모의할 경우 여러 증발산 모형 중 Morton CRAE 모형이 가장 적합함을 확인하였다.

핵심용어 ; 기후변동, 증발산 모형, SLURP, 민감도분석

1. 서 론

수자원 관리는 한정된 수자원을 어디에, 어떻게, 얼

마만큼 개발하고 사용할 것인지를 수자원 관리는 한정된 수자원을 어디에, 어떻게, 얼마만큼 개발하고 사용

* 인하대학교 토목공학과 박사과정

Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea (E-mail; hydrokbs@orgio.net)

** 인하대학교 토목공학과 교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea (E-mail; seohydro@inha.ac.kr)

*** 인하대학교 토목공학과 조교수

Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea (E-mail; sookim@inha.ac.kr)

할 것인지를 결정하는 것이라고 할 수 있으며, 이를 위해서는 각 수계 또는 유역별로 물 관리 시스템을 구축할 필요가 있다. 물 관리시스템은 수문학적 측면에서 볼 때 물 수지에 기초하고 있으며, 물 수지의 주요성분은 강수, 증발산, 유출, 침투 등이다. 이러한 물수지 구성 성분중 증발산은 물 순환계에 있어 매우 중요하며, 증발산의 결정은 수자원의 부존량 파악, 저수지의 설계 및 평가를 위해 요구된다. 또한, 지구상의 연평균 강수량의 약 70% 이상이 증발과 증산에 의해 대기로 돌아간다는 점(Singh, 1989)을 고려하면, 증발산의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않는다. 국내의 경우 증발산의 연구는 주로 농업분야에서 작물에 대한 연구를 통해 활발히 수행되어 왔다. 그러나 유역내의 수자원을 운영 관리하는 측면에서의 증발산 연구는 미비하며 이에 대한 연구가 절실히 요구된다.

최근 들어 지형정보시스템, 컴퓨터 계산 능력의 두드러진 발달과 더불어 수문 모형도 집중형 모형에서 준분포형 모형으로 발전하고는 있는 추세이다. 집중형 모형과 준 분포형 모형의 여러 차이점 중의 하나는 증발산 요소 부분으로써 유역에서 수문 모형을 통해 물 순환과정을 성공적으로 모의하기 위해서는 증발산 모형과 수문 모형을 어떻게 연계(coupling)하느냐에 따라 좌우된다. 그러나 대부분의 증발산을 산정하기 위한 모형들은 너무나 많은 종류의 기상자료를 입력 자료로 요구하기 때문에 현실적으로 수문 모형과 연계하는데 있어 많은 불확실성을 포함할 수 있다. 그러나 증발산 산정의 중요성에도 불구하고, 이전의 연구사례들을 살펴보면 증발산 모형에 대한 독립적 연구는 비교적 많은 편이지만, 여러 가지의 증발산 산정 모형이 수문 모형의 거동에 미치는 영향을 분석한 경우는 거의 전무하다. Oliver(1985)는 증발산은 물수지 요소 중 정확하게 추정하기에 가장 어려운 요소라고 언급하였으며, Doyle(1990)은 하천 유출량을 산정하는데 있어서 Morton과 Penman/Thornthwaite 증발산 추정 방법의 상대적 장점 등을 분석하였다. 이 논문에서는 Morton 모형이 Penman/Thornthwaite 방법보다 더 장점이 있다고 결론을 지었다. Doyle는 이러한 결과의 차이는 토양습윤을 모의하는데 있어서의 차이점 때문이라고 하였으며, 수문 모형이 토양습윤에 종속되어 있는 증발산모형을 이용하는데 있어 많은 불확실성(위험성)이 있을 수 있다고 결론을 내렸다. 그러나 건조지역에서의 유사한 연구에서는 Lemeur와 Zhang(1990)은 오히려 Penman/Thornthwaite 방법이 Morton 방법보다 장점이 있다고 하였다. 집중형 모형의 경우 대부분이 증발산 모형과 수문모형의 토양수분관련 인자가 독립적으로 요소로서

모의되지만 준 분포형은 증발산과 토양수분이 연계되어 되먹임(feedback)을 고려하여 모의된다. 그러므로 준분포형 수문모형을 이용하여 하천유출량을 모의할 경우 대상 유역의 지역적 기후를 고려하여 여러 증발산 모형 중 가장 적합한 모형을 선택하는 과정이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 용담댐 유역을 대상으로 준 분포형 모형인 SLURP 모형을 이용하여 유출량을 모의 할 때 5가지의 증발산 모형이 SLURP 모형에 미치는 영향을 분석하였으며, 이 결과를 근거로 용담댐 유역에서의 가장 적합한 증발산 모형을 제시하고자 하였다.

2. 강우-유출모형에서의 증발산 요소의 고찰

수문모형(이하, 강우-유출 모형)에서 잠재 증발산량으로 부터 실제 증발산량을 산정하기 위해서 매우 간단한 것부터 매우 복잡한 것까지 다양한 많은 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 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/최대 토양저류량)은 토양에서의 습윤 정도를 대표하는 것으로 일반적으로 실제 증발산과 잠재 증발산은 다음과 같이 나타 낼 수 있다. 일 강우-유출 모형에서의 실제 증발산 산정 요소의 예를 살펴보면 다음과 같다.

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

여기서, SMT ; 실제 토양습윤량

SMC ; 포장수량(field capacity, F.C)에서의 토양습윤량

2.1 Tank 모형

Tank 모형은 대표적인 집중형 일 강우-유출 모형으로써 증발산량은 최상단 수조에서 공제되며 만약, 이 수조에 저류수가 없으면 2단 수조에서 공제된다. 이러한 방법으로 증발산은 직렬 Tank 중 공제가 가능한 어떤 수조에서든 공제될 수 있다. Tank 모형내에는 증발산 모형이 탑재되어 있지 않기 때문에 외부에서 잠재 증발산량을 계산하거나, Pan에 의한 실측 증발량에 증발접시 계수를 곱하여 실제 증발산량이라고 가정한 후

월단위로 증발산량을 입력하여 사용한다(Sugawara, 1984).

2.2 PRMS 모형

PRMS(Precipitation-Runoff Model System) 모형은 일 단위 Pan 증발량을 직접 입력하거나 모형내에 탑재되어 있는 Hamon, Jensen-Haise 증발산 모형을 이용하여 기상자료로부터 직접 잠재 증발산량을 산정하며, 실제 증발산량은 토양의 선행상태, 토양의 종류의 함수로써 함양지역(recharge zone)과 하부 지역(lower zone)에서 계산 된다(Leavesley, 1983).

2.3 HSPF 모형

HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)

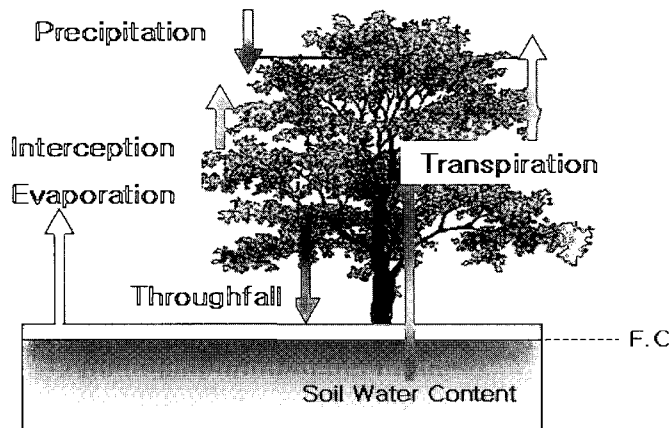


그림 1. 산림생태계의 물순환

모형은 Penman-Monteith 방법을 이용하여 잠재 증발산량을 산정하며 실제 증발산량은 토양수분의 함수로써 산정된다(Mark 등, 2003).

2.4 SWAT 모형

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 Penman-Monteith 모형, Priestley-Taylor 그리고 Hargreaves 모형을 이용하여 잠재 증발산량을 산정한 후, 우선 식생피복에 의해 차단된 강우로부터 증발을 계산하여, Richtie(1972)의 방법과 비슷한 접근법으로 최대 증산량, 최대 승화/토양 증발량을 계산한다. 그런 다음, 실제 승화량과 토양으로부터의 실제 증발산량이 계산된다(Neitsch 등, 2001).

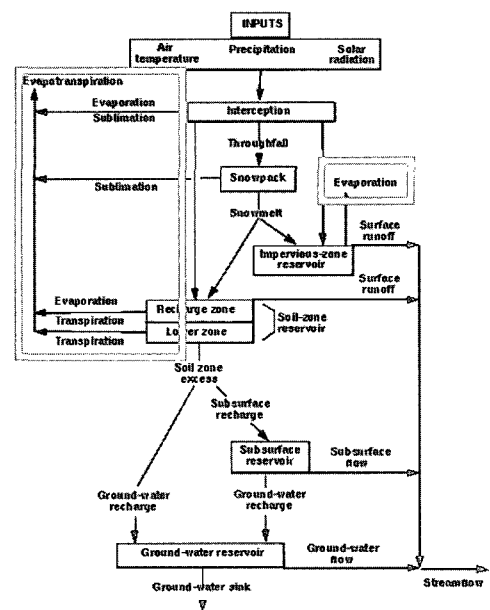


그림 2. PRMS 모형내에서의 증발산

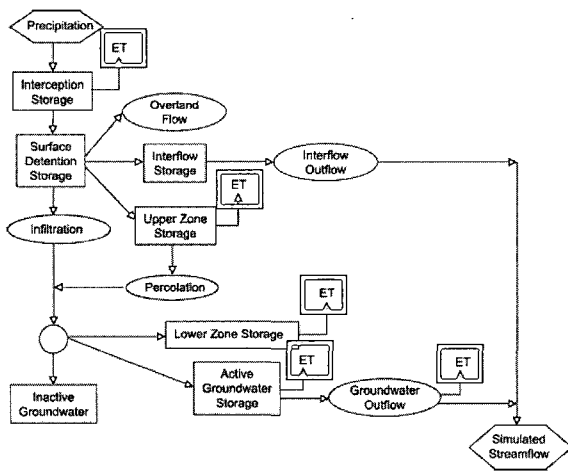


그림 3. HSPF 모형내에서의 증발산

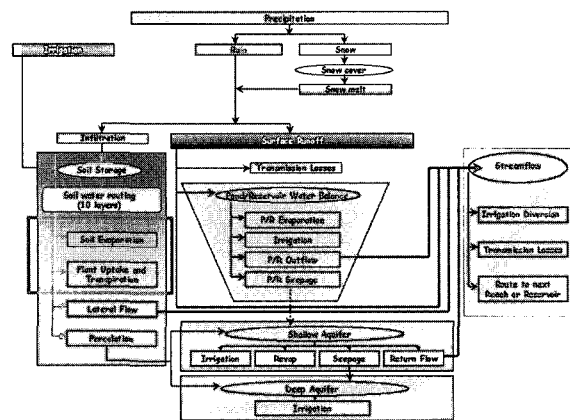


Figure 1.5. Schematic of pathways available for water movement in SWAT

그림 4. SWAT 모형내에서의 증발산

3. SLURP 모형의 개요

SLURP 모형은 SSARR 모형과 같은 복잡한 모형의 대안으로서 중규모 유역에 사용하기 위해 1975년에 처음 개발되었으며 그 이후 12차례에 걸쳐 개선되어 왔다.(Kite 등, 2000; 김병식 등, 2003) 초기에는 SLURP (Simple Lumped Reservoir Parametric)으로 개발되었으나, SLURP(Semi-distributed Land Use-based Run-off Processes)의 준 분포형 모형으로 변환되었으며 SLURP는 준 분포형 모형이지만, 분포형 모형으로 사용이 가능한 물리적 해석 모형으로써 강수사상을 강우사상과 강설사상으로 분리하여 고려할 수 있다.

3.1 SLURP 모형의 구조

3.1.1 연직방향 물수지

SLURP 모형은 전체유역을 ASA라는 소유역으로 구분하여 모의하는 일 단위(daily time step) 유출 모형이며 지상학적 매개변수(ASA의 평균고도, 하도길이, 토지피복특성 등), 시계열 자료(온도, 강수 등) 그리고 물리적 매개변수(Manning 계수, 침투율 등)를 입력자료로 이용한다. 특히, 지상학적 매개변수들은 수작업 또는 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 n, 지표수 보존상수와 지표하 보존상수 및 최대 저류량, 강수 보정계수, 융설 온도 등이 있다. 그림 5는 SLURP 모형의 연직방향 물수지 구조를 나타낸 것이다.

3.2 SLURP 모형의 소유역 분할

SWIM 모형(Krysanova 등, 1996)은 hydrotops라는 소유역 분리 개념을 이용하여 토지 이용상태와 토양 상태에 따라서 전체유역을 분할하였으며, WATFLOOD 모형(Kouwen 등, 1995)은 GRU(Grouped Response Unit)라는 소유역 분리 개념을 이용하여 유사한 토지피복상태를 가지는 지역을 통합하여 하나의 소유역으로 구성하였다. PRMS 모형과 SWAT 모형은 토지이용상태, 토양상태, 경사, 방향에 따라 수문학적 반응단위를 가지는 동질 유역으로 정의되는 HRU(Hydrological Response Unit)라는 소유역 분리개념을 이용하였다(Leavesley 등, 1983). 초기의 SLURP 모형은 GRU 개념으로 소유역을 분할하였으나, GIS를 이용한 준 분포형으로 변화하면서 ASA라는 소유역 개념을 도입하여 전체유역을 분할하였다. 전체유역은 지형에 따라 ASA라는 소유역으로 분리되고, 이는 토지피복상태에 따라 각 소유역별로 더 세분화된다.

3.3 SLURP 모형에서의 증발산 산정

SLURP 모형에서는 다음과 같은 5가지의 증발산 방법이 탑재되어 있다. FAO Penman-Monteith 방법은

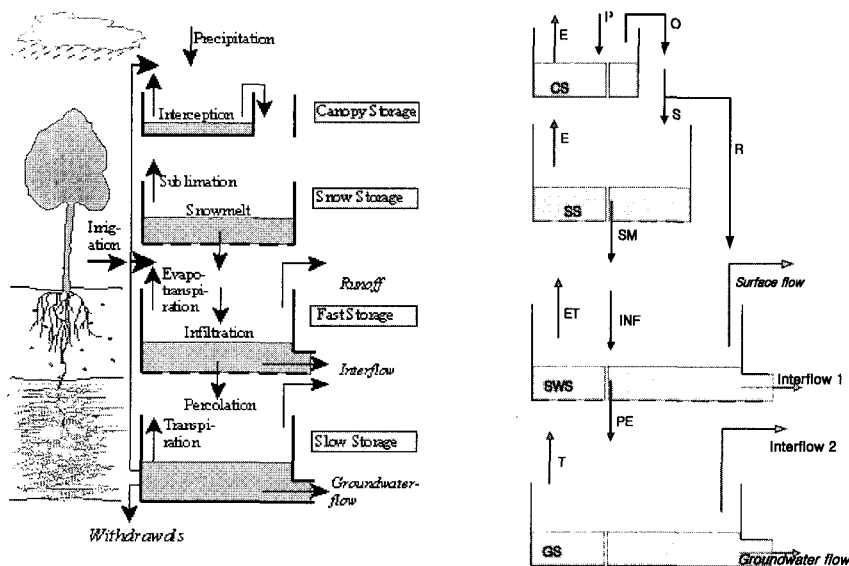


그림 5. SLURP 모형의 연직방향 물수지 구조

유역에 대한 토지피복상태자료가 구축되어있을 경우에는 토지피복에 따른 증발산량을 산정하는 장점을 가지고 있으나, 그만큼 자료가 충분히 확보되어야 한다는 점을 가지고 있으며, Morton CRAE 방법은 장기적인 유출량 확보에는 유리한 면이 있으나, 적용범위가 제한적이라는 단점을 가지고 있다. Spittlehouse-Black 방법은 증발량과 증산량을 분리하여 산정할 수는 있지만, 계수를 이용한다는 점에서 유역에 대한 적용성을 떨어뜨린다. Granger 방법은 자료가 충분히 확보되어야 하는 어려움이 있지만, 위성데이터로 대체할 수 있으며, Linacre 방법은 온도만의 함수로 증발산량을 산정하지만, 그만큼 세부적인 고려에 취약적이어서 근사치만을 산정하게 된다. (Kite 등, 2000)

4. 방법론

본 연구에서는 각각의 증발산 모형에 대하여 SLURP 모형의 매개변수를 보정한 후 SLURP 모형의 27개의 매개변수 중 증발산과 토양수분의 되먹임(feedback)과 관계가 있는 4 종류의 매개변수에 대하여 민감도분석을 실시하였으며, 매개변수의 변화에 따른 유출량의 변화 및 증발산량의 거동변화를 살펴보았다. 그림 6은 본 논문의 분석 흐름을 나타낸 것이다.

5. 적용

5.1 자료수집 및 입력자료 구축

본 연구에서는 대상 유역으로 용담댐 유역을 선정하였다. 용담댐 유역은 한국수원공사의 시험유역으로 운

영 및 관리되고 있기 때문에 SLURP 모형의 입력 자료를 충분히 만족시켜줄 수 있는 자료들을 얻을 수 있으며 특히, DEM과 위성으로부터의 토지이용도를 얻기가 용이한 지역이기에 본 연구에서 대상유역으로 선정하였다. 용담수위표 지점은 35년 이상의 수위자료를 보유하고 있으며 수위-유량 관계곡선 식이 작성되어 있고 유역내에 진안, 무주, 계북, 장수 등 4개의 우량관측소가 분포되어 있다. 본 연구는 용담수위표지점의 1995년 1월~1997년 12월간의 일 수위자료(한국 건설기술연구원 수문D/B), 진안, 무주, 계북, 장수 지점의 일 강수량, 전주축후소의 기상자료를 이용하였다.(김병식, 2003)

5.1.1 수치고도자료(DEM)

본 연구에서는 대상 유역의 격자크기를 25m로 하여 DEM자료(축척; 1: 25,000)를 구축하였다(그림 7 참조).

그림 7-(c)은 DEM에서 추출한 용담댐 유역의 경사도(%)이며 그림 7-(d)은 유역의 aspect을 나타낸 것이다. 그림 7-(e)은 유역의 DEM자료와 aspect 자료를 이용하여 추출된 3차원 유역도로써 이를 통해 더 자세하게 유역의 형상을 파악할 수 있다. 3차원 유역도를 보면 용담댐 유역은 동쪽이 서쪽보다 상당히 경사가 급함을 확인할 수 있다.

5.1.2 대상유역의 토지피복상태 분석

LANDSAT TM 위성영상으로부터 기하보정 등의 전처리 과정을 거쳐 구축된 용담댐 유역의 토지피복도(축척; 1: 25,000)는 토지피복에 따라 9가지로 분류되어진다(그림 8 참조). 그림 9에서 볼 수 있는 것처럼 용담댐 유역은 전체 유역 중 산림지역이 약 68.35 %로 이루어진 산지임을 알 수 있다.

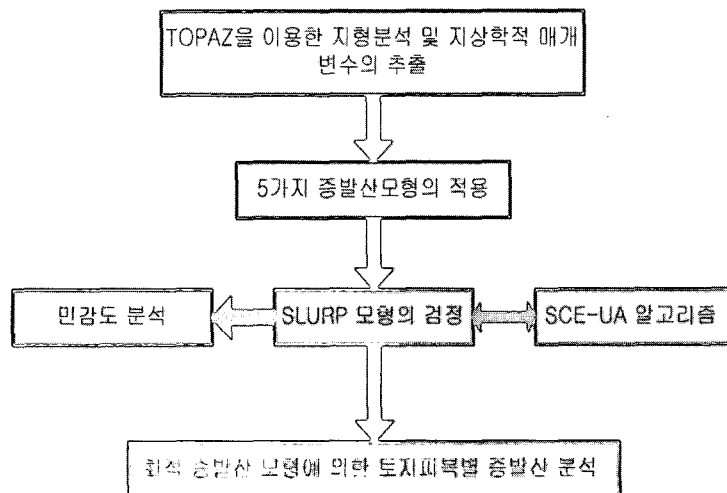
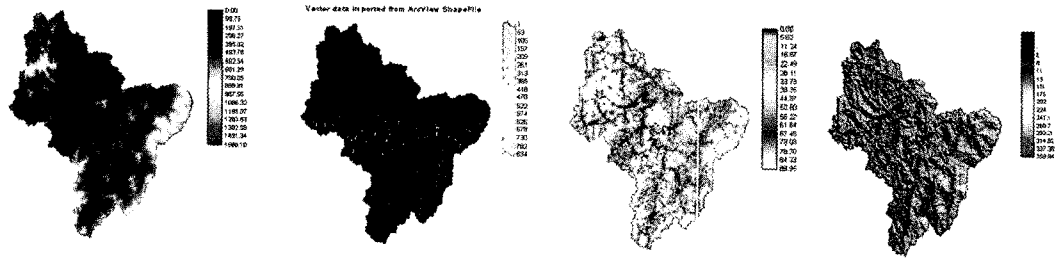


그림 6. 분석 흐름도



(e) 3차원 유역도

그림 7. 용담댐 유역의 지형자료의 분석

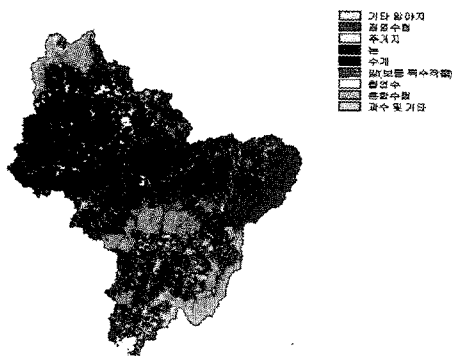


그림 8. 토지피복도

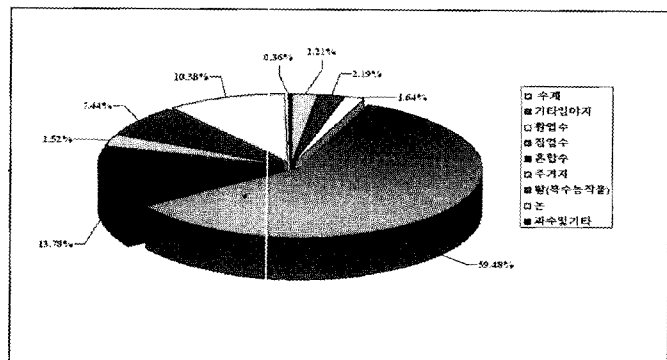


그림 9. 토지피복 구성비

5.1.3 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 IDRISI32와 수치지형분석모형(digital terrain analysis model)인 TOPAZ (Garbrecht 등, 1997; Martz 등, 1993)을 이용하였다. DEM 자료와 토지피복 자료를 TOPAZ에 입력하여 용담댐 유역을 25개의 ASA로 분할하였으며, SLURP 모형의 지상학적 매개변수들을 추출하였다. 그림 10과 11은 용담댐 유역의 ASA 소유역 분할과 관측소의 위치를 나타낸 것이다.

5.1.4 NDVI과 LAI 자료 구성

증발산을 지배하는 많은 인자들은 그 유역의 식생조건에 의해 잘 반영된다고 생각될 수 있으며, 그 유역의 식생의 양과 활성도를 정량적으로 표현할 수 있는 지표로서 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 들 수 있으며, 이는 인공위성 NOAA에 탑재되어 있는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)로부터 구할 수 있다. SLURP 모형에서는 작물에 의한 강수의 차단정도를 고려하고, 토양과 작물로부터의 증발량과 작물로부터의 증산을 분리하기 위해서 LAI (Leaf Area Index)를 사용하며, 이는 SiB(Simple Biosphere Model) 작물 계수에 의해서 분류된 월별 NDVI

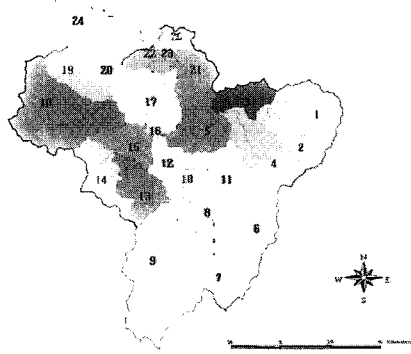


그림 10. ASA 소유역 분할

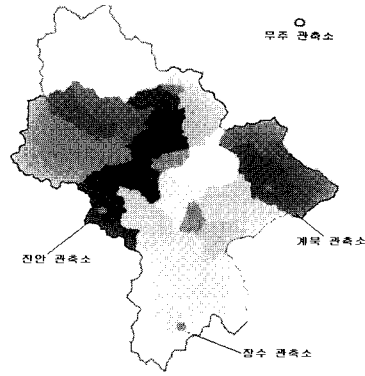


그림 11. 관측소의 위치

로부터 모형 내에서 계산된다(Kite, 1995). NDVI의 값이 클수록 그 지점에서의 식물의 양이 많으며, 활성도가 높은 것을 의미한다.

본 연구에서는 용담댐 유역의 LAI 자료가 부재한 관계로 NOAA - AVHRR의 위성영상으로부터 NDVI를 구하였으며 이를 이용하여 LAI를 산정하였다. 그림 12와 13은 용담댐 유역의 월 NDVI와 LAI를 나타낸 것이다.

5.1.5 토양 특성

일반적으로 대부분의 준 분포형 수문모형들이 토양층의 특성을 반영하기 위해서 SCS CN 값을 입력치로써 사용하는 것과는 달리 SLURP 모형은 모형내에서 pedo-transfer function(Wosten 등, 1998)을 이용하여 직접 토양특성인 토양수분 함유량(Field Capacity), 시들음점(Wilting Point)등을 계산하도록 되어 있다. pedo-transfer function은 유럽의 EU(European Union) 18개 연구팀들이 토양의 동수특성(soil hydraulic properties)에 대한 HYPRES라는 데이터베이스를 구축한 후 이 데이터베이스와 FAO 토성분류(soil texture classes)가 연계되어 구동되도록 개발된 프로그램이다. 여기서, 토양수

분함유량과 시들음점은 각 토지피복상태에 대한 점토(%), 실트(%), 모래(%)의 비율과 단위중량(kg/m³)을 고려하여 각 토지피복상태의 토양성분의 구성에 의해서 계산이 가능하다. 본 연구에서는 용담댐 유역의 정밀 토양도를 이용하여 토지피복별 토양성분을 구분한 후 토양의 특성치들을 계산 하였다. 그림 14는 용담댐 유역의 정밀토양도를 나타낸 것이며, 그림 15는 용담댐 유역의 토지피복별 토성분류 결과를 나타낸 것이다.

5.2 증발산 모형별 SLURP 모형의 매개변수 보정

5.2.1 일 유출 수문곡선과 효율계수의 비교

본 논문에서는 1996년 관측 수문기상 자료 및 유출량을 입력자료로 하여 SCE-UA 최적화 알고리즘을 이용하여 SLURP 모형의 매개변수를 최적화하였다. 그림 16은 5가지의 증발산 모형별 최적화된 최적 매개변수를 이용하여 산정된 일 유출 수문곡선을 비교한 것이며, 표 1은 효율계수와 연 증발산량을 비교한 것으로 5가지 모든 효율계수 값이 0.7이상의 높은 값을 나타내었다. 그러나 그림 16과 같이 일 수문곡선으로 도시하여 비교해 보면 Morton CRAE와 S-B를 제외한 다른 3가지 방

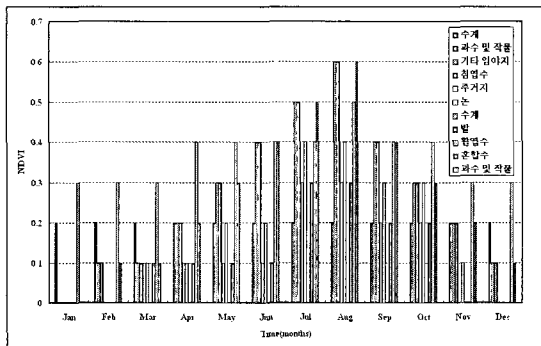


그림 12. 토지피복별 월 NDVI

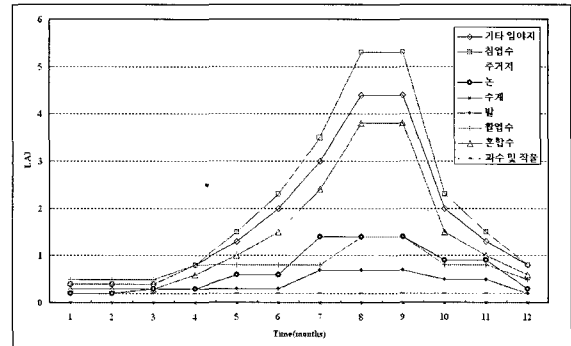


그림 13. 토지피복별 월 LAI

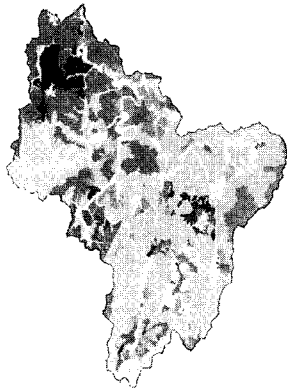


그림 14. 정밀토양도

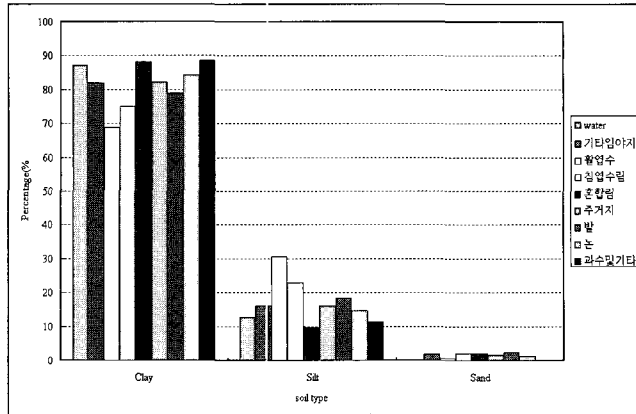


그림 15. 토지피복별 토성분류

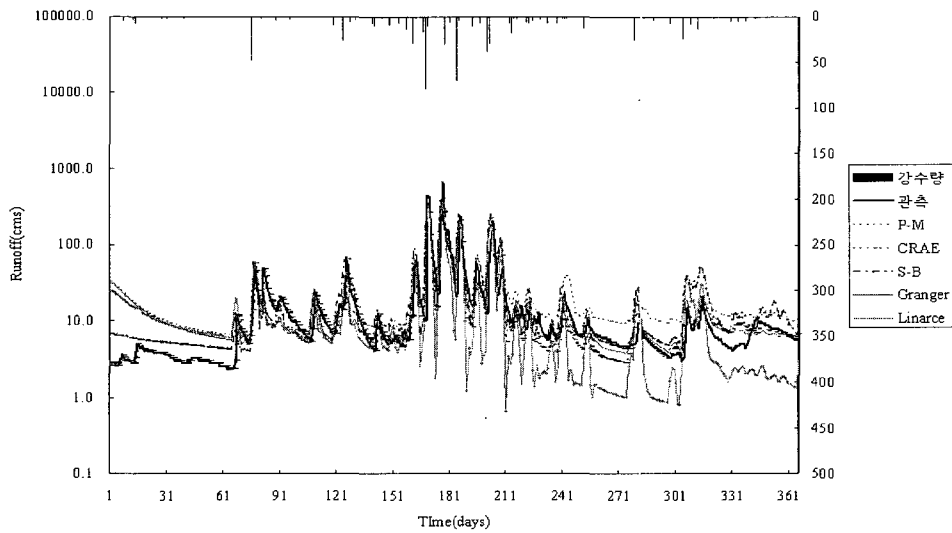


그림 16. 증발산 모형별 일 유출 수문곡선의 비교

표 1. 증발산 모형별 연 증발량 및 효율 계수의 비교

연 증발량 비교						
종류	Pan	P-M	CRAE	S-B	Granger	Linacre
Evapo+ trans(Demand)	1067.34	708.7	982.7	636.5	1294	2208
Evapo		117.2	108.2	94.24	125.7	172.3
Transpir		287	547.8	362	579.7	711.9
Actual	747.138	404.2	656	456.24	705.4	884.2
효율 계수 비교						
종류	P-M	CRAE	S-B	Granger	Linacre	
Nash	0.7	0.76	0.73	0.75	0.75	
Garrick	0.74	0.78	0.76	0.78	0.78	
Previous	0.64	0.7	0.66	0.69	0.68	
WMO 제적오차	-36	1.31	-27.3	-4.53	10.86	

법은 수문곡선의 기저 부분의 모양이 관측치를 잘 재현하지 못함을 알 수 있다.

5.2.2 연 증발산량의 비교

전주 기상대의 관측 Pan 증발량을 잠재 증발산량

(Potential ET; ET_demand)으로 보고 증발접시계수 0.7을 곱한 값을 실제 증발산량의 참값으로 가정(한국수자원공사, 1999)하여, SLURP 모형내에서 산정된 증발산 모형별 연 증발산량을 비교해 본 결과, 잠재 연 증

발산량의 경우 P-M 모형과 S-B모형은 과소하게 산정되었으며 Granger와 Linacre 모형은 과대하게 산정되었다. 실제 연 증발산량은 잠재 연증발량의 결과와 동일하게 P-M 모형과 S-B모형은 과소하게 산정되고 Linacre 모형의 경우 과대하게 산정되었지만 Granger 모형은 실제 값과 비슷한 결과를 보였다(그림 17 참조). CRAE 모형은 잠재/실제 증발산량 모두 실측치에 가까운 값을 나타내었으며, 각 모형별 증발은 비슷하지만 증산량에 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 이를 통해

증발량은 수문기상인자의 함수이지만, 증산은 수문기상인자 이외에 토지피복과 토양인자의 함수이며 토양수분과 되먹임(feedback)관계가 있음을 추론 할 수 있다.

그림 18은 증산발 모형별 토지피복별 매개변수를 도시한 것으로 Morton을 제외한 나머지 모형들은 매개변수의 변화폭이 크을 알 수 있다. 이를 통해 Morton 증발산 모형과 SLURP 모형의 매개변수의 관계가 다른 증발산 모형에 비해 안정적임을 추론할 수 있다.

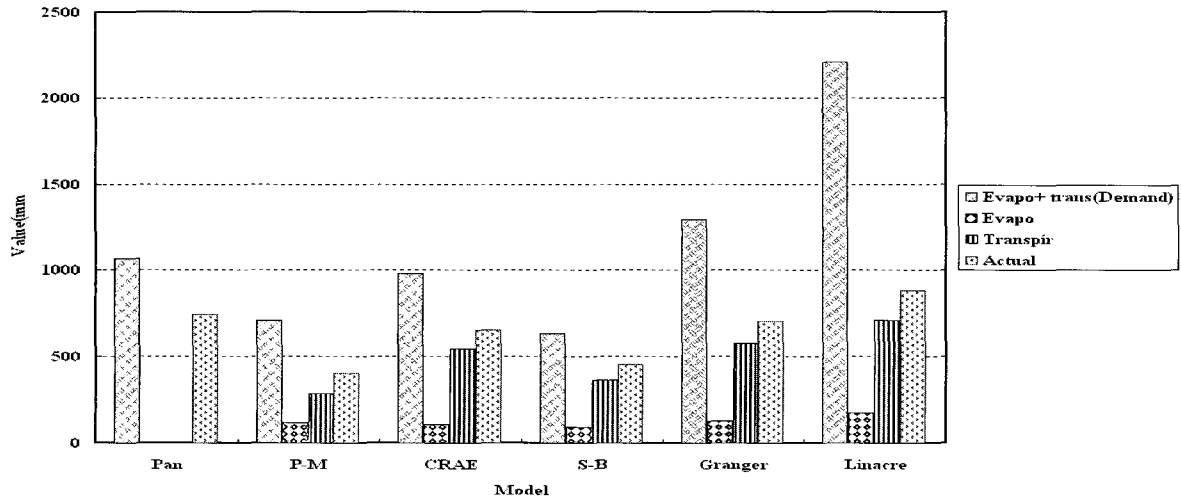


그림 17. SLURP 모형 내에서 증발산 모형별 연 증발산량의 비교

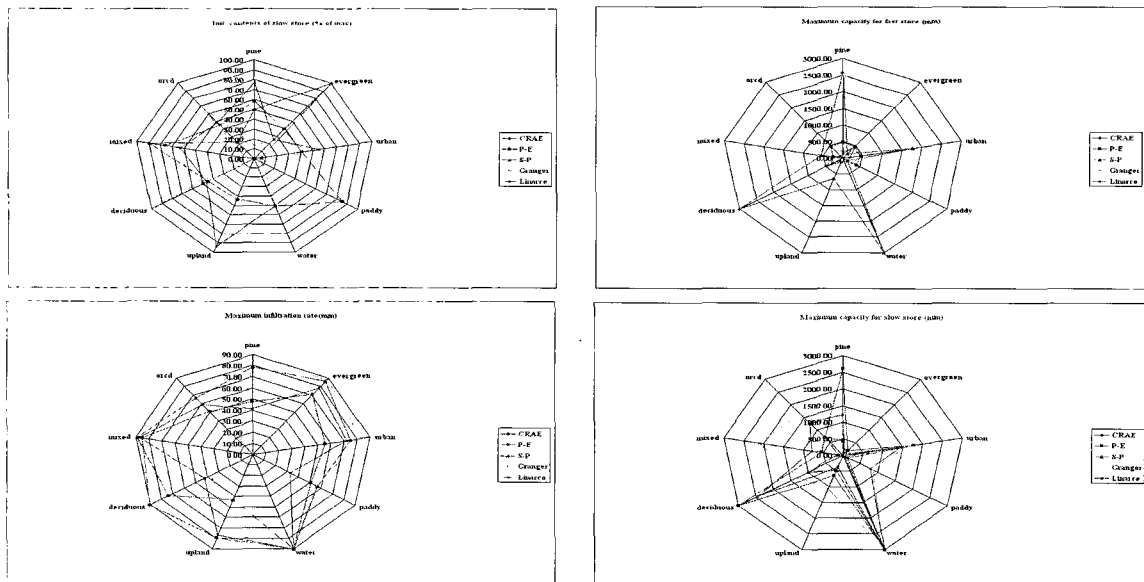


그림 18. 증발산모형별 토지피복별 매개변수의 변화폭의 비교

[시계방향순으로, 초기 지연 지표하 저류량(Initial contents of slow store)
 최대 초기 지표하저류량(Maximum capacity for fast store)
 최대 침투율(Maximum infiltration rate)
 최대 지연 지표하 저류량(Maximum capacity for slow store)]

5.3 민감도분석

본 연구에서는 앞에서 언급한 SLURP 모형의 매개변수 변화에 따른 연 유출량, 증발량, 증산량의 민감도를 분석하여 증발산 모형별로 비교하였다.

그림 19~22는 매개변수 변화에 따른 연 유출량, 증발량 그리고 증산량의 거동을 나타낸 것으로, 증발량의 경우 모형에 상관 없이 모든 매개변수의 변화에 민감도가 낮지만, 유출량과 증산량은 매개변수의 변화에 민감도가 높으며, 모형에 따라서 그 정도가 다를 수 있었다. 특히, 최대 초기 지표하 저류량과 최대 침투

율의 변화에 민감하게 반응함을 확인하였다. 증발산 모형별로 비교하여 보면 CRAE 모형과 Granger 모형이 토양 수분의 변화에 가장 민감한 것으로 나타났으며, 일반적으로 가장 많이 쓰이고 있는 P-M 모형은 토양 수분의 변화에 민감도가 상대적으로 낮은 것으로 분석되었으며, 증산량이 과소하게 산정됨을 알 수 있었다. 그러므로 본 논문에서는 SLURP 모형을 이용하여 용담댐 유역의 일 유출량을 모의할 경우 여러 증발산 모형 중 Morton CRAE 모형이 가장 적합함을 확인하였다. 그림 23은 Morton CRAE 모형에 의해 산정된 토지피복별 증발산량을 도시한 것이다.

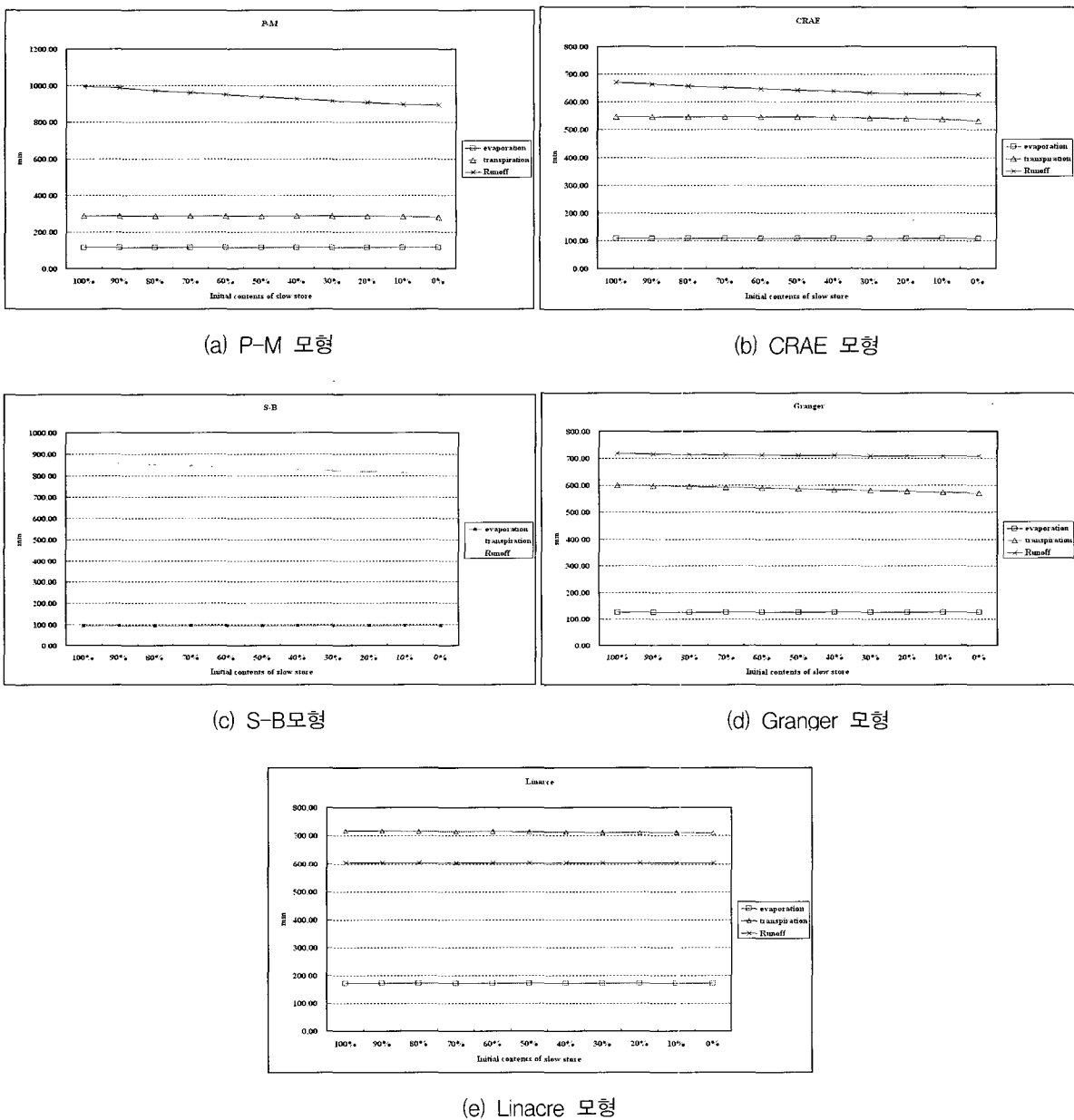
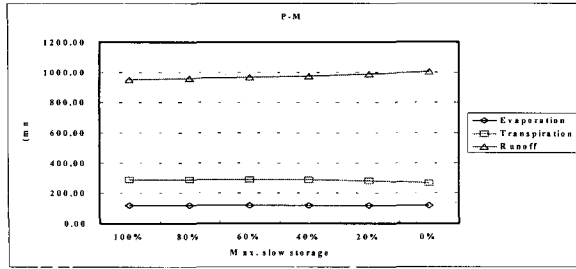
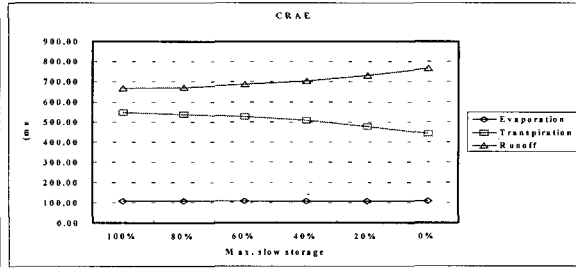


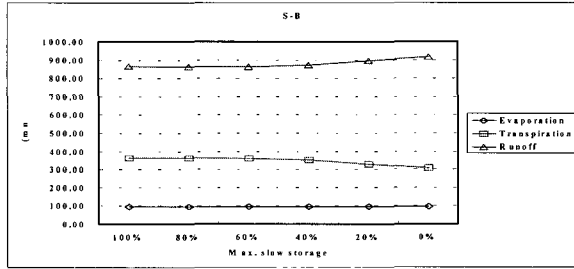
그림 19. 초기 지면 지표하 저류량 변화에 따른 유출량, 증발량, 증산량의 거동



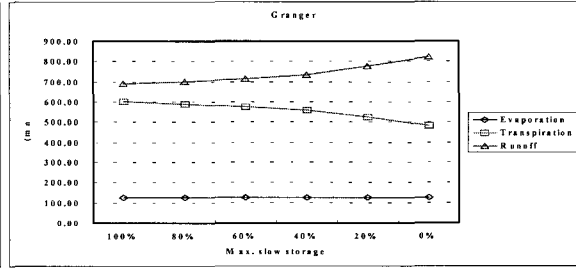
(a) P-M 모형



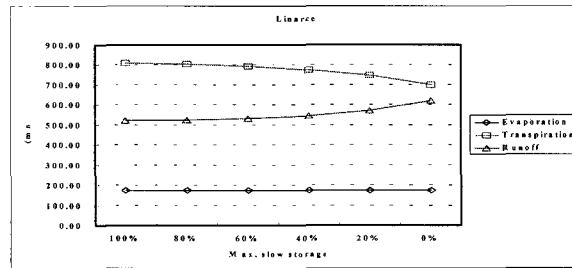
(b) CRAE 모형



(c) S-B 모형

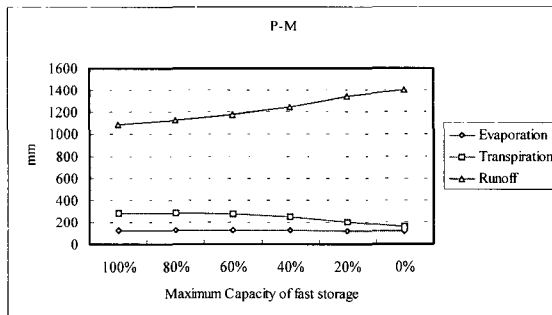


(d) Granger 모형

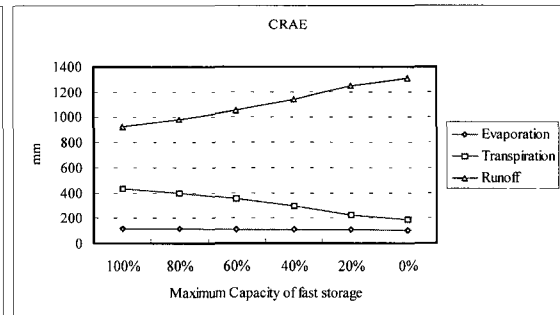


(e) Linacre 모형

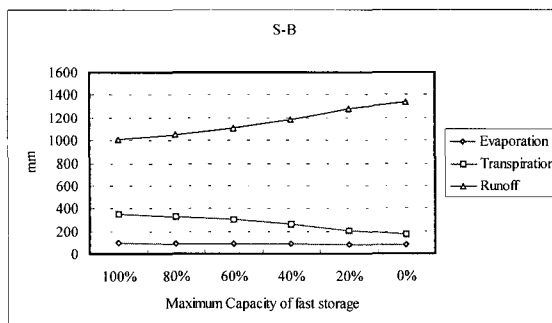
그림 20. 최대 지연 지표하 저류량 변화에 따른 유출량, 증발량, 증산량의 거동



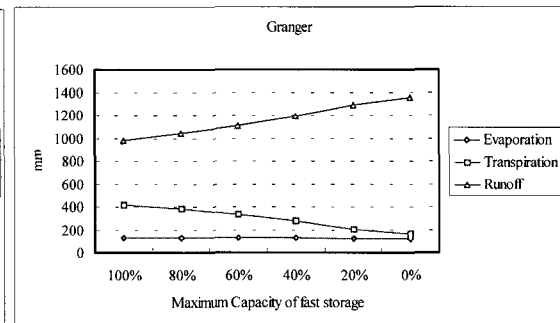
(a) P-M 모형



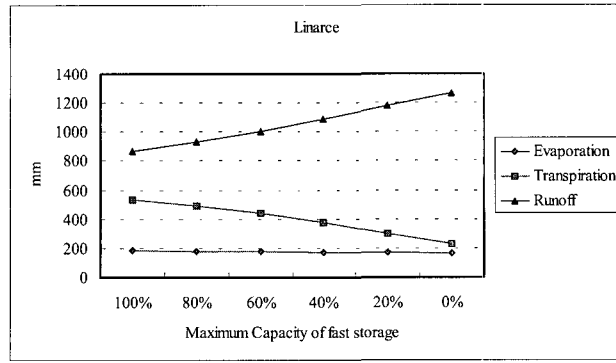
(b) CRAE 모형



(c) S-B 모형

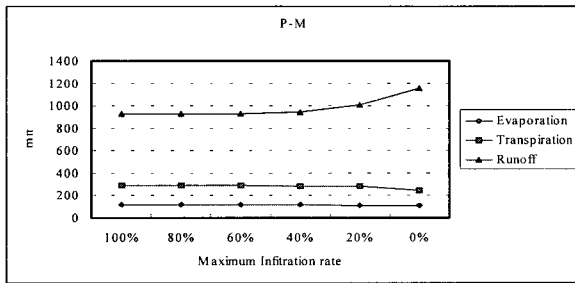


(d) Granger 모형

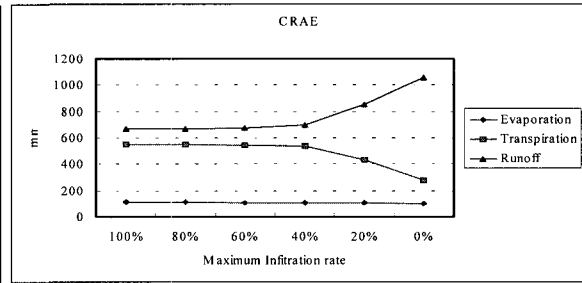


(e) Linacre 모형

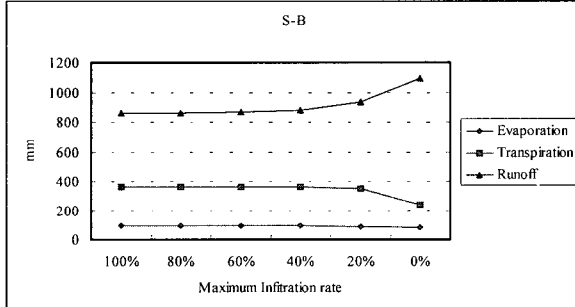
그림 21. 최대 조기 지표하 저류량 변화에 따른 유출량, 증발량, 증산량의 거동



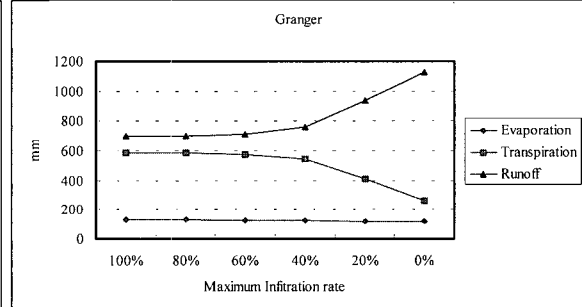
(a) P-M 모형



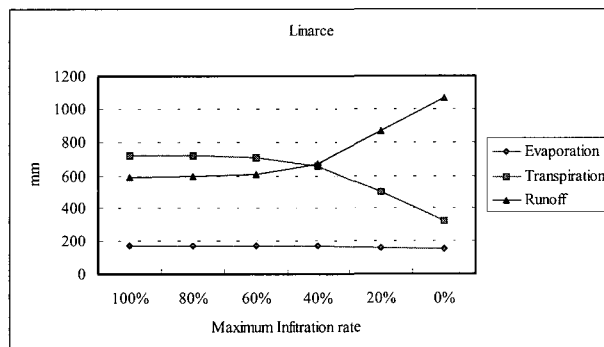
(b) CRAE 모형



(c) S-B 모형



(d) Granger 모형



(e) Linacre 모형

그림 22. 변화에 따른 유출량, 증발량, 증산량의 거동

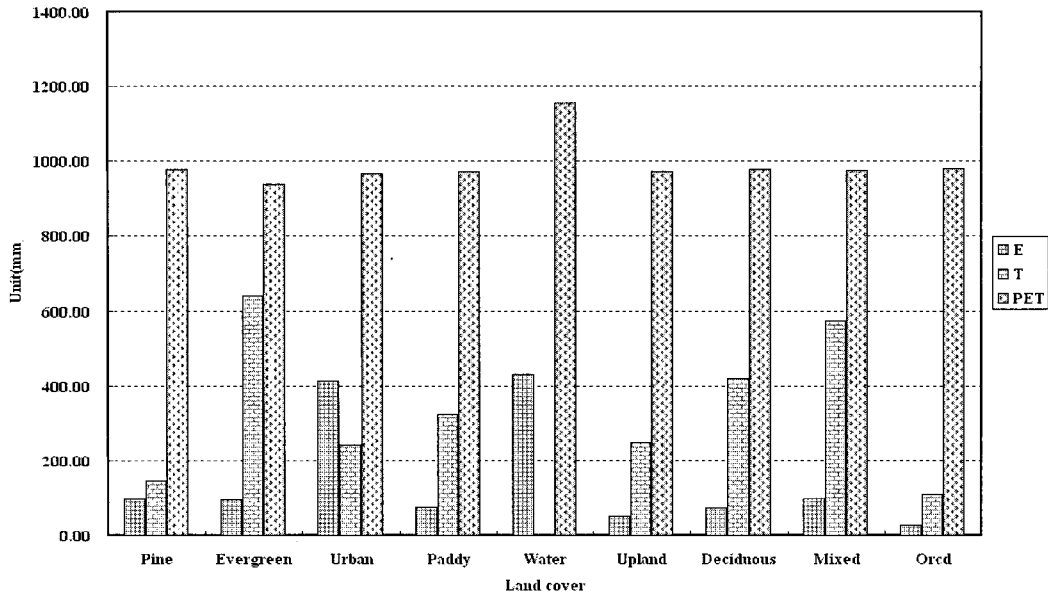


그림 23. Morton CRAE 모형에 의해 산정된 토지피복별 증발산량

6. 요약 및 결론

위의 모든 결과를 토대로 결론을 요약하면, 다음과 같다.

- (1) SLURP 모형내의 5가지의 증발산 모형을 대상으로 매개변수를 보정 한 결과 효율계수 값은 모두 높게 나타났으나 일 유출수문곡선을 비교해 본 결과 CRAE 모형을 제외한 나머지 모형들은 수문곡선의 기저 부분에서 관측치를 잘 재현하지 못함을 알 수 있었다.
- (2) 전주 기상대의 관측 Pan 증발량을 잠재 증발산량으로 보고 증발접시계수 0.7을 곱한 값을 실제 증발산량의 참값으로 가정하여, SLURP 모형내에서 산정된 증발산 모형별 연 증발산량을 비교해 본 결과, 잠재 연 증발산량의 경우 P-M모형과 S-B 모형은 과소하게 산정되었으며 Granger와 Linacre 모형은 과대하게 산정되었다. 실제 연 증발산량은 잠재 연증발량의 결과와 동일하게 P-M모형과 S-B모형은 과소하게 산정되었다.
- (3) 각 모형별 증발량은 비슷하지만 증산량에 많은 차이가 있음을 알 수 있으며 이를 통해 증발량은 수문기상인자의 함수이지만, 증산은 수문기상인자 이외에 토지피복과 토양인자의 함수이며 토양수분과 되먹임(feedback)관계가 있음을 추론 할 수 있다.
- (4) 증발산 모형별 토지피복별 매개변수를 도시한 것으로 Morton을 제외한 나머지 모형들은 매개변

수의 변화폭이 큼을 알 수 있다. 이를 통해 Morton 증발산 모형과 SLURP 모형의 매개변수의 관계가 다른 증발산 모형에 비해 안정적임을 추론할 수 있다.

- (5) 4종류의 매개변수 변화에 따른 연 유출량, 증발량, 증산량의 민감도를 분석하여 증발산 모형별로 비교하였다. 증발량의 경우 모형에 상관 없이 모든 매개변수의 변화에 민감도가 낮지만, 유출량과 증산량은 매개변수의 변화에 민감도가 높으며, 모형에 따라서 그 정도가 다름을 확인 할 수 있었다. 특히, 최대 조기 지표하 저류량과 최대 침투율의 변화에 민감하게 반응함을 확인하였다. 증발산 모형별로 비교하여 보면 CRAE 모형과 Granger 모형이 토양 수분의 변화에 가장 민감한 것으로 나타났다. 일반적으로 가장 많이 쓰이고 있는 P-M 모형은 토양수분의 변화에 민감도가 상대적으로 낮은 것으로 분석 되었으며, 증산량이 과소하게 산정됨을 알 수 있었다.

위의 모든 결과를 토대로 결론을 요약하자면, 용담댐 유역에서는 5가지의 증발산 모형 중, Morton CRAE 모형이 가장 유출모의를 하는데 있어 적합한 증발산모형을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 김병식, 서병하, 김형수, 김남원 (2003) SLURP 모형을 이용한 하천유출량 모의, 大韓土木學會論文彙, 대한

- 토목학회 제 23권 제 4B호. pp. 289~303.
- 한국수자원공사(1999). 확률갈수량 산정 및 이용방법의 연구
- Barr, A. G., Kite, G.W., Granger, R. and Smith, C.(1997). "Evaluation three evapotranspiration methods in SLURP macroscale hydrological model." *Hydrological processes*, Vol. 11, pp. 1685~1705
- Dyck, A. j. (1983). "Overview on the present status of the concepts of water balance models." *New Approaches in Water Balance Computation*. IAHS Publ. Vol.148, pp. 3-19.
- Garbrecht, J. and Campbell, J. (1997). *TOPAZ version 1.20: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and sub-catchment parameterization*. In: *TOPAZ User Manual*. Rep.# GRL 97-4. Grazinglands Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service, El Reno, OK
- Kite, G. W. and Spence (1995). "Land cover, NDVI, LAI and evapotranspiration in hydrologic modeling. In: Applications of Remote Sensing in Hydrology." *Proceedings of the Second International Workshop*, PP. 18-20.
- Kite, G.W. (2000) Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation, *Journal of Hydrology*, Vol. 229, pp. 59~69.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D. I. and Becker, A. (1996). "Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds." *Proc. Third Int. Conf. on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, New. Mexico, January pp. 21-25.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M. and Saindon, L.G. (1983). *Precipitation-Runoff Modeling System: User's manual*, Water Resources Investigation 88-4238.
- Lemur, R. and Zhang, Lu. (1990). "Evaluation of three evapotranspiration models in terms of their applicability for an arid region." *Journal of Hydrology*, Vol. 114, pp. 395~411.
- Mark, S. J., William, F.C., Vishal, K.M. and Tammo, S. S. (2003). "Application of two hydrologic models with different runoff mechanism to a hillslope dominated watershed in the northeastern US; a comparison of HSPF and SMR." *Journal of Hydrology*, Vol. 284, pp. 57~76.
- Martz, L.W. and Garbrecht, J. (1993). "Automated extraction of drainage network and watershed data from digital elevation models." *Water Resources Bulletin*, ASCE. Vol. 29(6), pp. 901~908.
- Morton, F.L. (1983). "Operational estimates of area evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology." *Journal of Hydrology*, Vol. 66, pp. 1~76.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. R.(2001). Soil and Water Assessment tool; Theoretical Documentation Version 2000, USDA ARS, Temple, Texas.
- Oliver, H. R. (1985). "Availability of evaporation data in space and time for use in water computations." *New Approaches in Water Balance Computation*. IAHS publ., Vol. 148, pp. 21~31.
- Palmer, W. C. (1965). "Meteorologic drought." Res. Pap. US Weather Bur., Vol. 45, pp.58.
- Saxton, K.E. and McGuinness, J. L. (1982). *Evapotranspiration ; Hydrologic Modeling of small watersheds*.
- Singh, V. P. (1989). *Hydrologic system*, Vol. II, prentice Hall, Eaglewood Cliffs, New Jersey.
- Sugawara, M. I.(1984). Tank model with snow component, N.R.C. for Disaster prevention.
- Wosten, J. H. M., Lilly, A., Nemes and Le Bas, C.(1998). Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Report 156, DLO-Staring Centre, Wageningen.

(논문번호:04-61/접수:2004.06.11/심사완료:2004.08.17)