

## 배수시간과 격자크기와 반동력학적 또는 동력학적 습윤지수에 대한 연구

### The Analysis of Drainage Time and Resolution of the Quasi-dynamic and Dynamic Wetness Index

김 상 현\* / 한 지 영\*\* / 이 가 영\*\* / 김 남 원\*\*\*

Kim, Sang Hyun / Han, Ji Young / Lee, Ga Young / Kim, Nam Won

---

#### Abstract

The resolution issue of wetness index with relaxation of the steady state assumption is explored on the platform of Digital Elevation Model (DEM). The variabilities of the quasi-dynamic wetness index and the dynamic wetness index are discussed on the base of the spatial and statistical aspects depending upon resolutions of DEM and the drainage time. The organization patterns of the wetness index can be observed upon various drainage times and pixel size. The transient behaviour of wetness patterns of the Sulmachun watershed are shown in the relatively short drainage time. The statistical analysis of the quasi-dynamic and dynamic wetness analysis provide the convergence of analysis results to the steady state characteristics later than 10,000 hours drainage time. The probability density functions of the quasi-dynamic and the dynamic wetness index shows the existence of the threshold pixel size of DEM which provide stability and consistency in the computation result of these two wetness index.

**Keyword** : the quasi-dynamic wetness index, the dynamic wetness index, resolution issue, drainage time

---

#### 요 지

정상상태 가정을 완화시킨 습윤지수의 해상도 문제가 수치지형모형에서 다루어졌다. 반 동역학적 습윤지수와 동력학적 습윤지수의 변화성을 수치고도모형의 격자 크기와 배수시간을 변화시키면서, 공간적 통계적으로 고찰하였다. 변화하는 배수시간과 격자크기에 따라 습윤지수의 구조화 양상이 관찰 되었다. 설마친 유역의 적용결과 비교적 짧은 배수시간에서는 습윤도의 천이성이 관찰되었고, 10,000 시간 이상의 배수 시간에서는 통계적 분석 결과가 정상

---

\* 정희원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Busan, 609-735, Korea  
(E mail: kimsangh@pnu.edu)

\*\* 부산대학교 환경공학과 석사과정

Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Busan, 609-735 Korea  
(E mail : blanc1107@hanmail.net)

\*\*\* 수석연구원 한국건설기술연구원

Senior Researcher, KICT koyang, kyonggi-do, 411 712, Korea  
(E-mail: nwkim@kict.re.kr)

상태의 특성으로 수렴함을 보여주고 있다. 반 동역학적 및 동역학적 습윤지수의 확률밀도 함수들은 계산결과의 안정성과 일관성에 관련이 있는 경계 격자 크기가 존재함을 보여주고 있다.

**핵심용어** : 반동역학적 습윤지수, 동역학적 습윤지수, 해상도 문제, 배수시간

## 1. 서 론

강우 사상 후 지표 혹은 지표하에서 일어나는 증발, 침투, 유출 등의 수문 과정들은 지형에 많은 영향을 받는다. 지형은 흐름의 가속 정도와 수렴 혹은 발산 정도 뿐만 아니라 습윤 포화도에 영향을 준다고 알려져 있다 (Barling 외, 1994; Beven과 Kirkby 1979). 지형을 표현하는 인자로서 상부사면 기여면적과 경사도의 비로써 계산되는 습윤지수가 수문 모형에 쓰여지고 있다 (Beven과 Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1986). 상부사면 기여면적은 잠재 흐름량을 가정하여 계산되나 지표 하 흐름 속도는 매우 완만하기때문에 정상상태에 도달할 수 없으며 이에 대한 비현실성이 지적되었다 (Wigmosta와 Lettenmair, 1999; Beven과 Freer, 2001). Barling(1994)은 단위 우량을 가정하여 습윤지수를 시간에 따라 변화시켜 계산한 반동역학적 습윤지수를 개발하였으며, 국내 유역의 실제 우량 자료를 이용하여 습윤지수를 시간에 따라 모의한 반동역학적 및 동역학적 습윤지수에 관한 연구가 수행되었다(한지영과 김상현, 2003b).

이러한 인자는 실제 수문 모형 입력값으로 활용될 경우 공간적 분포를 표현하기 위하여 격자 단위로 계산이 수행된다. 이 때 사용되는 수치고도모형은 지형의 고도를 나타내는 것으로 격자크기에 따라 지형을 표현하는 정도가 달라진다. 하지만 지형을 자세히 표현한다고 수문 모델의 효율이 증가되는 것이 아니기 때문에 (Watson 외, 1998) 선택된 유역에서 어떤 수문 과정에 중점을 둘 것인가에 따라 적절한 수치고도모형의 단위격자 크기를 결정해야 한다. 수치고도모형의 격자 크기에 따른 정상상태 가정하의 수문 인자들의 통계 특성들의 차이에 관한 연구가 수행된 바 있다(한지영과 김상현, 2003a). 한편, 정상상태의 가정을 완화한 반 동역학적 및 동역학적 습윤지수의 경우, 수치지형 모형의 적용과정에서 발생하는 격자 크기의 문제와 배수시간의 문제에 대한 종합적인 검토가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 수문 모형의 입력값으로 쓰이는 반동역학적 습윤지수와 동역학적 습윤지수를 배수시간을 변화하여 모의하고 격자 크기를 변화시켜감에 따른 모의

결과와 공간적 분포 특성과 통계적 특성들을 고찰하는 것을 주목적으로 하였다.

## 2. 습윤지수와 수치고도모형의 해상도

습윤지수는 Beven(1979)에 의해 제안된 이후로 TOPMODEL의 운영에서 지형을 나타내는 인자로서  $\ln(a/\tan B)$ 로 표시되는데,  $a$ 는 단위격자 크기당 상부사면 기여 면적이고,  $\tan B$ 는 경사도를 나타낸다. 관련된 최근 연구로는 흐름 분배 알고리즘 개선을 위해 웅덩이나 평평한 지형을 처리하기 위한 연구 (Band와 Mackay, 1998)가 수행되었으며, 수로형성 면적값을 제안하여 수로 격자로 인식된 격자에서는 경사에서 가장 급한 방향으로 흐름을 분배함으로써 습윤지수를 개선시켜 강우사상 후 유출 모의를 개선하였다 (김상현과 이지영, 1999). 또한 습윤지수를 공간적 분포로 변화시킨 연구(김상현과 김경현, 1999)와, 지형에 따라 흐름 분산 정도를 다르게 하여 습윤지수를 유도하는 연구(이지영과 김상현, 2000)가 수행되어져 왔다. 하지만 이러한 개선들은 습윤지수의 정상상태 가정 전체화에 이루어져왔으며 여기서는 정상상태 가정을 완화한 습윤지수의 도입은 발전된 수문성분 해석기술의 개발에 필수적인 요소이다.

### 2.1 반동역학적 습윤지수

#### (quasi-dynamic wetness index)

Barling 외(1994)에 의해 제안된 반동역학적 습윤지수는 기존의 습윤지수(Beven과 Kirkby, 1979)의 정상상태 가정을 시간의 변화에 따라 상부사면 기여면적을 변화시킴으로써 완화시켰다.

Darcy의 법칙을 고려하여 지표하 흐름 속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \frac{K_s}{\eta} \tan \beta \quad (1)$$

여기서,  $K_s$ 는 포화 투수계수 [ $L T^{-1}$ ]이고,  $\tan \beta$ 는 불투수층의 경사이고  $\eta$ 는 토양 공극율이다.

단위 격자를 통과하는데 걸리는 시간은 지표하 흐름

속도를 사용하여 구할 수 있다. 만약 흐름이 직각 방향이면 단위격자를 평행하게 통과하는데 걸리는 시간,  $T_p$ , 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_p = \frac{l}{v} \quad (2)$$

여기서,  $l$ 은 격자의 길이를 의미한다. 만약 흐름이 대각선 방향이면 격자 하나를 지나는데 걸리는 시간,  $T_d$ , 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_d = \sqrt{2} \frac{l}{v} \quad (3)$$

반동역학적 습윤지수는 기여면적 계산시 재충전율을 단위 재충전율 1로 가정하기 때문에 상부사면 기여면적을 고려해 주고 단위 등고선에 대한 상부사면 기여면적은 격자 하나를 지나는데 걸리는 시간과 배수시간의 비를 대상격자의 면적에 곱해줌으로서 계산해 줄 수 있다. 만약 배수시간,  $T_D$ , 이 단위격자를 통과하는데 걸리는 시간보다 짧다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{accum} = \frac{T_D}{T_p \text{ or } T_d} * R * A_{grid} \quad (4)$$

여기서,  $A_{accum}$ 은 상부사면 기여면적,  $R$ 은 재충전율,  $A_{grid}$ 는 단위격자면적이다.

만약 배수시간이 격자 하나를 지나는데 걸리는 시간보다 길다면 상부사면 격자로부터 유출량을 받기 때문에 상부로 격자 추적을 해야하며 상부사면 기여면적은 다음식으로 구해진다.

$$A_{accum} = \sum_{i=1}^n A_i \quad (5)$$

여기서  $n$ 은 격자에 기여하는 상부 격자의 수를,  $A_i$ 는 지표하 흐름에 기여하는  $i$ 번째 격자 면적을 의미한다.

## 2.2 동역학적 습윤지수 (dynamic wetness index)

재충전율이 시간에 따라 변화는 것을 고려하고 재충전율을 그 시간 때에 강우량과 같다고 가정한다면 동역학적 습윤지수는 다음과 같이 구할 수 있다. 만약 배수

시간이 단위격자 통과시간보다 적다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{accum} = \sum_{i=1}^{T_p} \frac{1}{T_p \text{ or } T_d} * r(i) * A_{grid} \quad (6)$$

여기서  $r(i)$ 는 강우량 혹은 유효우량의 시계열이다.

만약 격자 하나를 지나는데 걸리는 시간보다 배수시간이 더 길다면 상부사면 격자로부터 받는 양을 고려하여 누적해 주어야 한다. 이때 현재 격자에서 받는 양은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{accum} = \sum_{i=1}^{T_p \text{ or } T_d} \frac{1}{T_{grid}} * r(i) * A_{grid} \quad (7)$$

여기서,  $T_{grid}$ 는 단위격자 통과시간이다. 상부사면으로부터 받는 양은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{accum} = \sum_{i=T_p \text{ or } T_d+1}^{T_p} \frac{1}{T_p \text{ or } T_d} * r(i) * A_{grid} \quad (8)$$

이 때, 상부사면 격자로부터 받는 흐름방향을 고려해 주어야 하며 본 연구에서는 단방향 흐름 알고리즘(O'Callaghan과 Mark, 1984)을 사용하여 흐름을 한 방향으로만 형성시킨다고 가정하여 모의하였다.

## 2.3 수치고도모형의 해상도와 정상상태 습윤지수의 관계

격자 중심의 유역 모형을 운용하는데 격자 크기의 중요성은 많은 연구자에 의해 지적 되어졌다(Grayson 외, 1992). 수치고도모형은 대부분 지형도나 지점 조사를 통하여 구한 다음 내삽 등을 통하여 결정된다. 이러한 수치고도모형은 격자 크기에 따라 모델이 명시적으로 표현할 수 있는 지형의 정도를 결정하게 된다. 격자 크기의 변화에 따른 작은 변화나 특징들은 매우 중요할 수 있으나 적절하게 표현하지 못할 수도 있다. 특히, 경사도나 습윤지수와 같이 수치고도모형으로부터 유도된 값들은 격자 크기에 영향을 직접적으로 받는다. 이상적인 격자 크기는 모델 과정을 개념화하는 것에 간접적인 영향을 준다. 이는 충분히 세밀한 격자 크기가 큰 공간의 세부적인 변동성을 표현할 수 있는 모델이 있다 할 지라도 공간적인 변동성을 정의한 자료가 없다면 작은 격자를 사용하는 의미가 축소된다는 것을 의미한다. 한

지형 외(2003a)에 따르면 흐름의 분배를 결정짓는 흐름 분배 알고리즘인 단방향 흐름 알고리즘, 다방향 흐름 알고리즘, DEMON 알고리즘이 격자 크기에 따라 알고리즘으로부터 얻는 상부사면 기여면적이나 습윤지수가 격자 크기에 따라 다른 양상을 보이는 것을 증명하였다. 또한, 경사도, 윤곽구배, 등고선구배, 접선구배, 평균구배와 같은 수치고도모형으로부터 획득한 지형인자들이 격자 크기에 따라 통계값들이 다른 양상을 보이는 것을 보여주었다.

### 3. 대상구역

본 연구의 대상이 되는 구역은 경기도 파주시 적성면에 위치하고 있는 설마천 유역으로 유역면적이  $8.5 \text{ km}^2$  이고, 2%의 경사도를 가진 산지지형이다. 전형적인 급

경사 산지 사행하천이며 곡류하천이며 비교적 자연환경이 잘 보존되어 있다. 설마천 유역은 한국건설기술연구원에서 운영하고 있는 시험유역으로 우량, 유량, 기상자료 등 다양한 자료들을 다년간 관측하고 있는 중이다. 그림 1은 10m격자로 나타낸 설마천 유역의 수치고도모형이다.

본 연구에서 사용한 우량자료는 한국건설기술연구원에서 제공하는 설마천 유역의 전체 평균우량을 사용하였으며 결측 자료는 동두천 자료를 이용하였다. 자료의 기간은 1999년 1월 6일 12시부터 2001년 4월 18일 19시까지 총 20,000시간이다. 그림 2는 설마천 우량을 보여주며 시간 1은 1999년 1월 6일 12시를 의미한다.

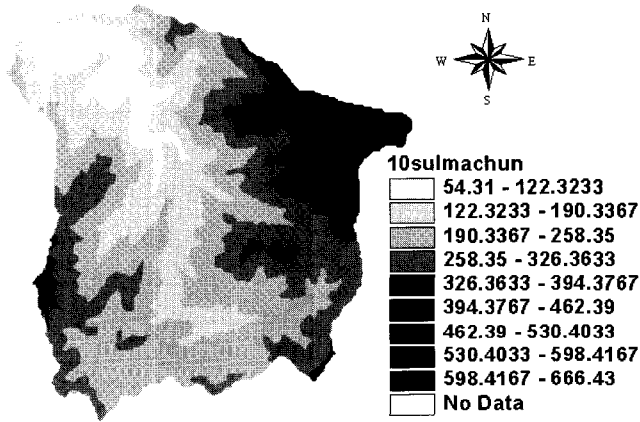


그림 1. 설마천 유역 DEM[m]

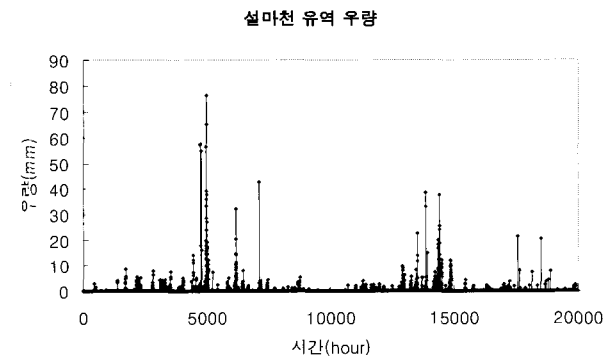


그림 2. 설마천 유역 우량

#### 4. 결과 및 토론

반동역학적 습윤지수와 동역학적 습윤지수를 격자 크기 10m, 20m, 30m, 50m, 80m 그리고 100m에 대해 각각 계산하였다. 그림 3은 1,000시간동안 배수시켰을 때 각 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수의 공간적인 분포를 보여준다. 격자 크기가 커짐으로써 국소 지점의 습윤 포화 정도가 퇴색되어가고 격자 크기가 100m일 경우 습윤 정도의 공간적 표현이 부적절함을 관찰할 수 있다.

그림 4는 10,000시간 동안 배수시켰을 때 각 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수의 공간적인 분포를 보여준다. 시간이 흐를수록 습윤정도가 증가되고 있으며 1,000시간에 비해 훨씬 더 구조화되고 있음을 나타낸다.

그림 5는 20,000시간 동안 배수시켰을 때 각 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수의 공간적인 분포를 보여준다. 전체적인 분포가 정상상태 습윤지수 분포에 상당히 근접함을 알 수 있다.

그림 6은 1,000시간동안 배수시켰을 때 각 격자 크

기에 따른 동역학적 습윤지수의 공간적인 분포를 보여준다. 실제 우량 자료를 사용하였으므로 상당히 낮은 습윤지수 값이 계산되었고 공간적인 분포는 반동역학적 습윤지수와 유사하게 나타났다.

그림 7은 10,000시간동안 배수시켰을 때 각 격자 크기에 따른 동역학적 습윤지수의 공간적인 분포를 보여준다. 1,000시간 배수시켰을 때보다 훨씬 구조화됨을 보여주고 있으며 100m격자에서도 습윤 정도를 상당히 표현하고 있음을 보여준다.

그림 8은 20,000시간동안 배수시켰을 때 각 격자 크기에 따른 동역학적 습윤지수의 공간적인 분포를 보여준다. 10,000시간동안 배수시켰을 때보다 습윤정도의 집중성을 보여주고 있다.

그림 9는 각 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수의 통계값을 보여준다. 격자 크기가 커짐에 따라 배수시간에 관계없이 평균이 증가함을 보여준다. 분산과 표준편차 그리고 왜곡도의 경우 거의 감소 추세를 보여주고 있으며 이 경향은 배수 시간 사이에서 차이가 없음을 보여준다.

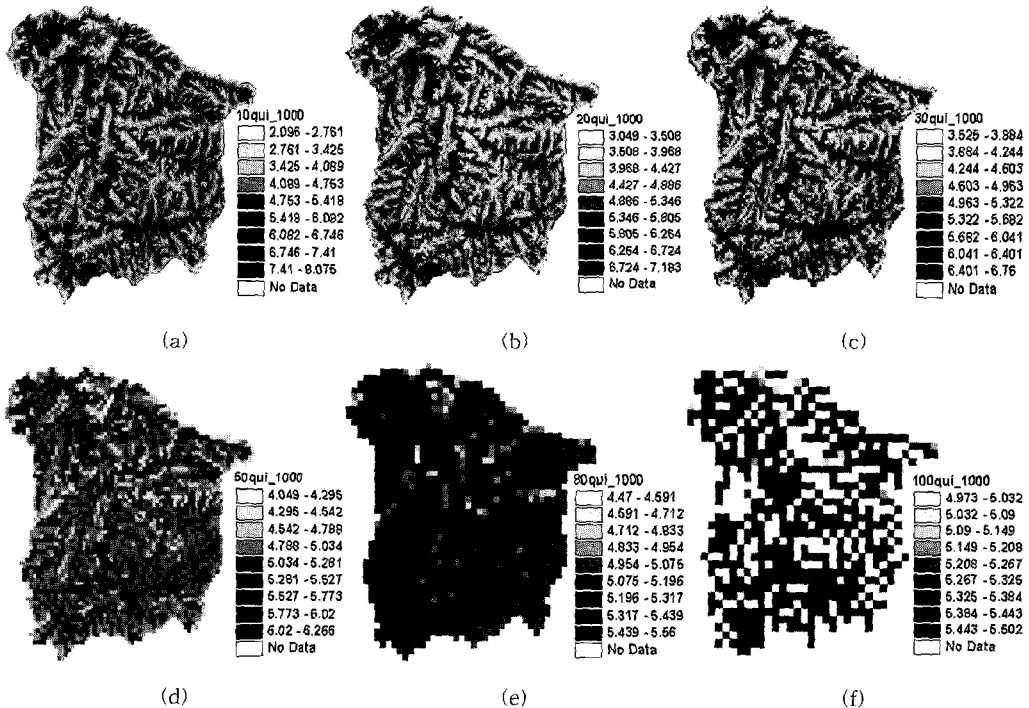


그림 3. 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수의 공간적인 분포(1,000시간)  
(a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m

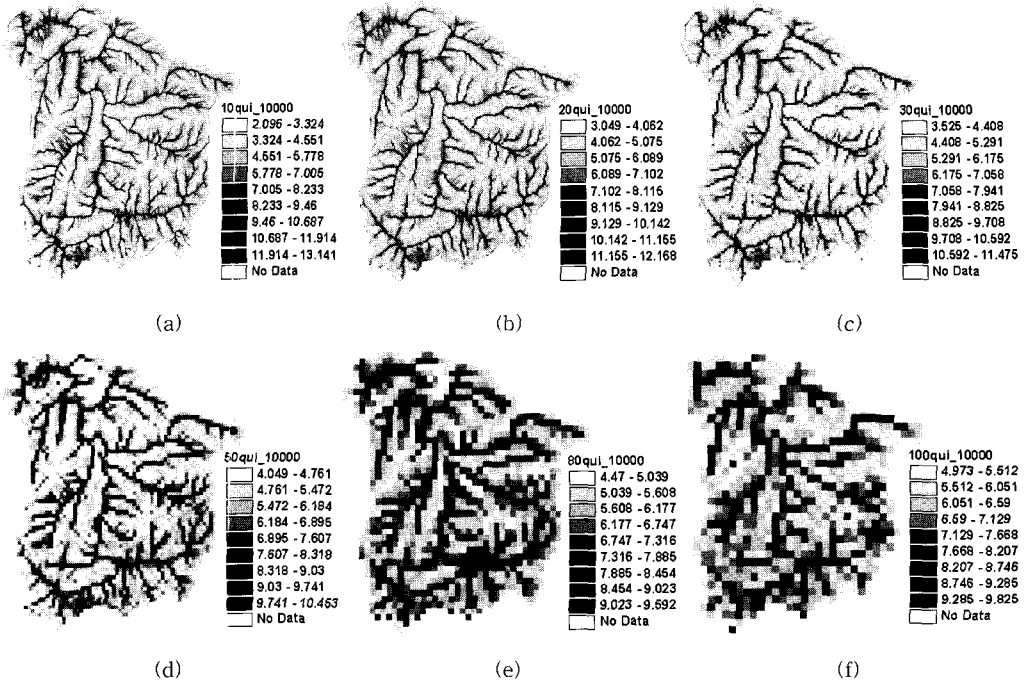


그림 4. 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수의 공간적인 분포(10,000시간)  
 (a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m

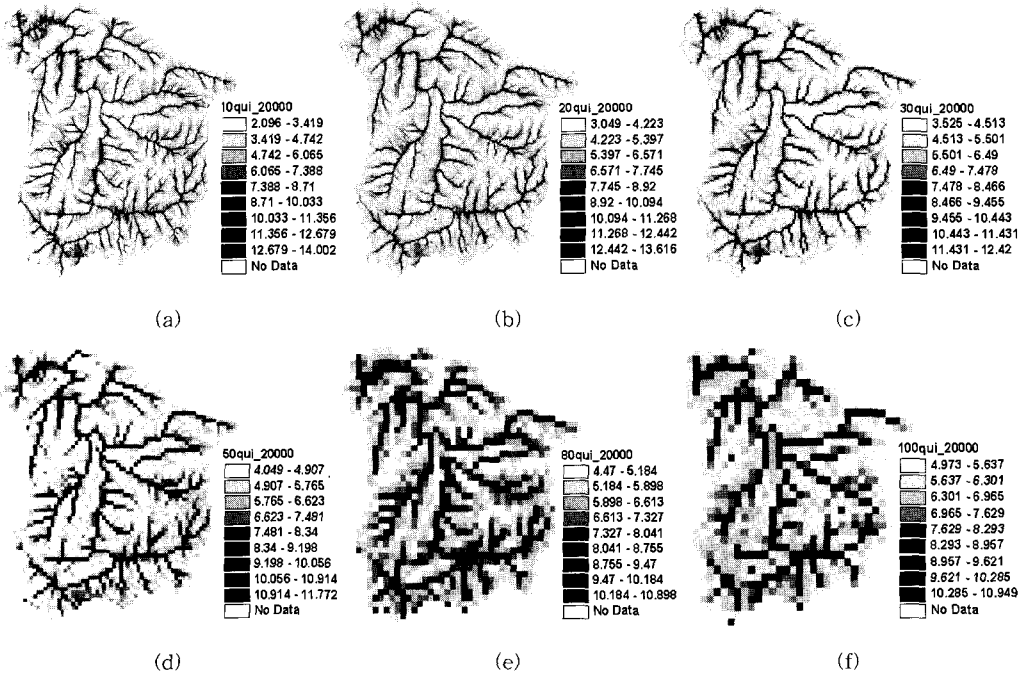


그림 5. 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수의 공간적인 분포(20,000시간)  
 (a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m

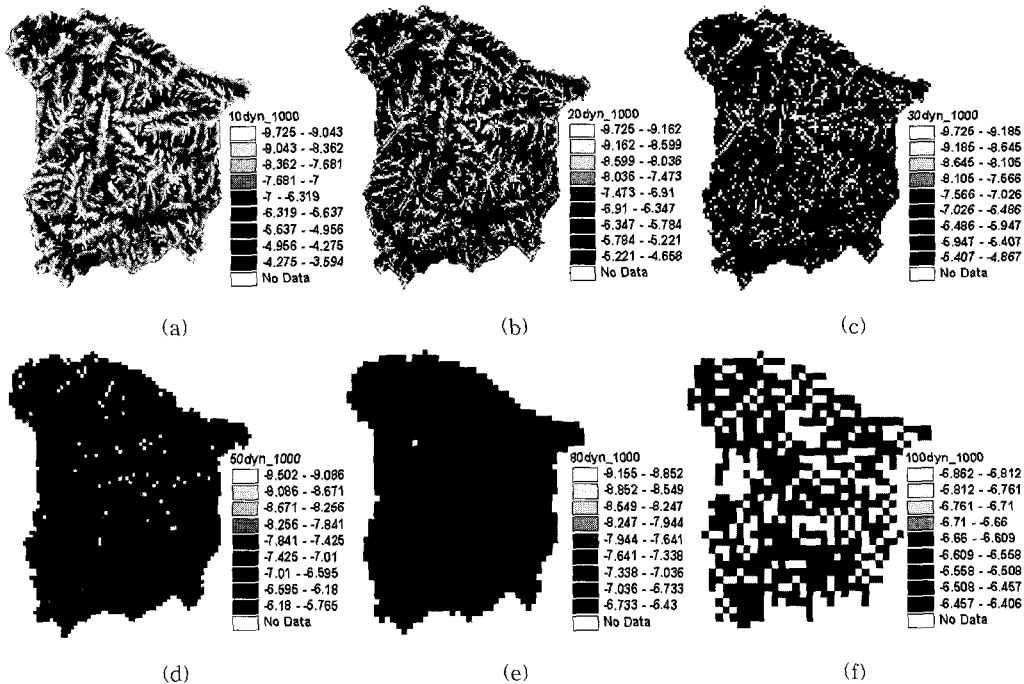


그림 6. 격자 크기에 따른 동역학적 습윤지수의 공간적인 분포(1,000시간)  
 (a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m

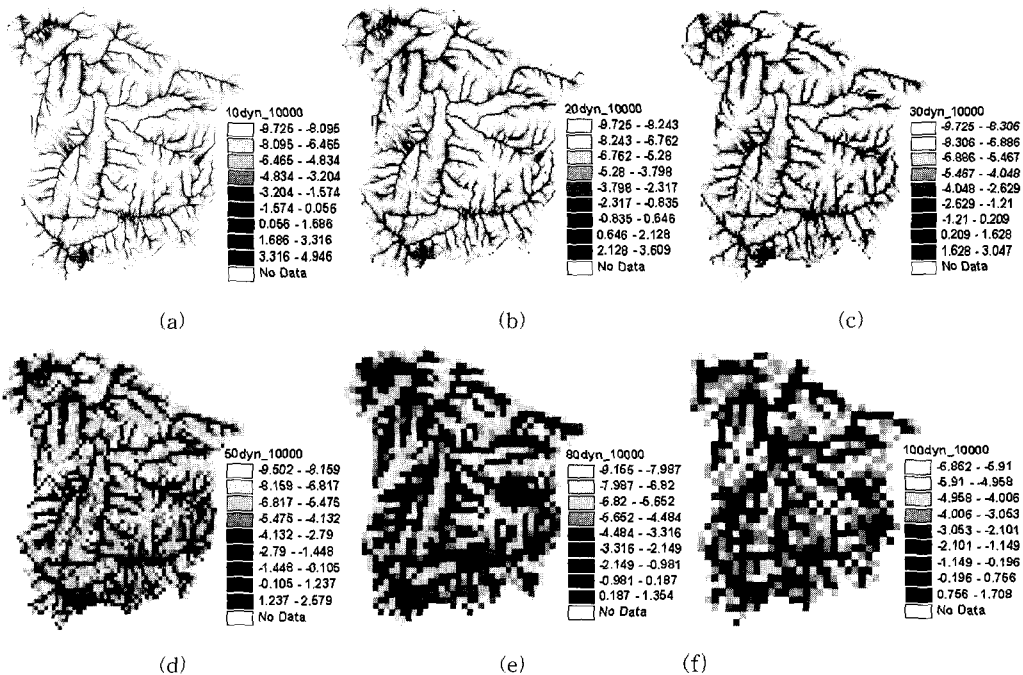


그림 7. 격자 크기에 따른 동역학적 습윤지수의 공간적인 분포(10,000시간)  
 (a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m

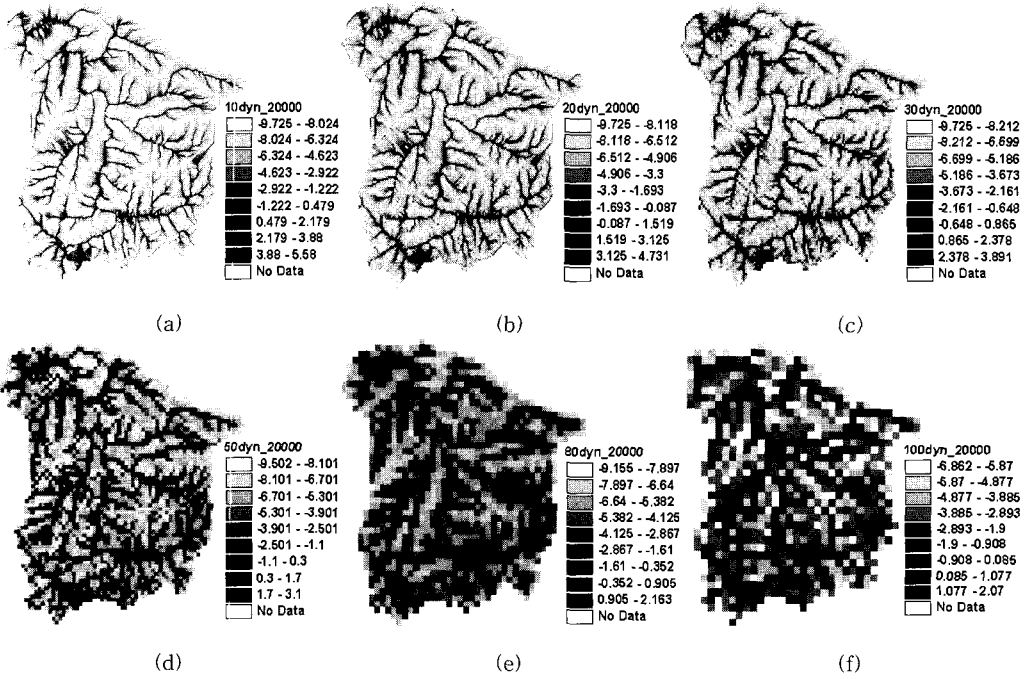


그림 8. 격자 크기에 따른 동역학적 습윤지수의 공간적인 분포(20,000시간)  
 (a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m

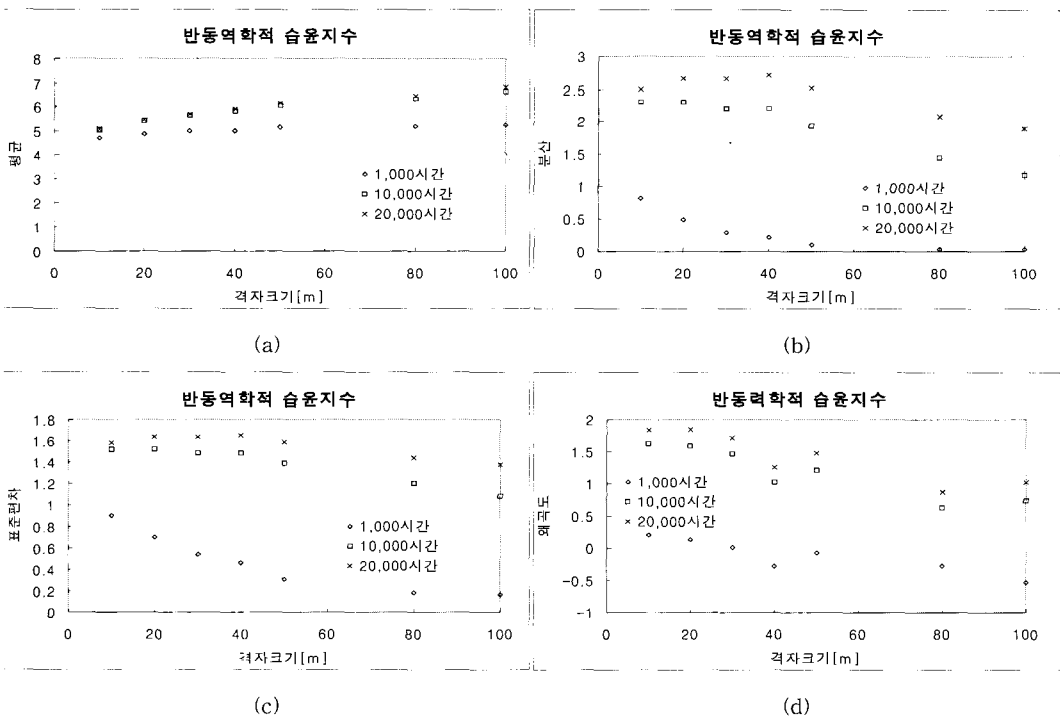
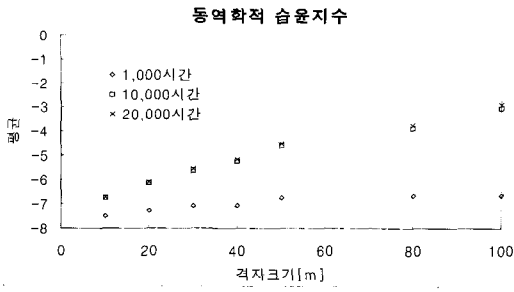
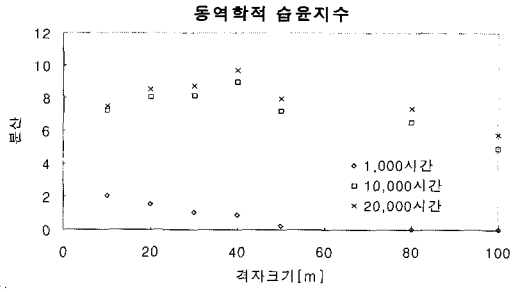


그림 9. 격자 크기에 따른 반동역학적 습윤지수  
 (a)평균, (b)분산, (c)표준편차, (d)왜곡도

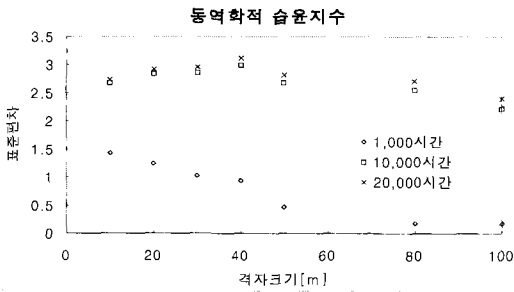




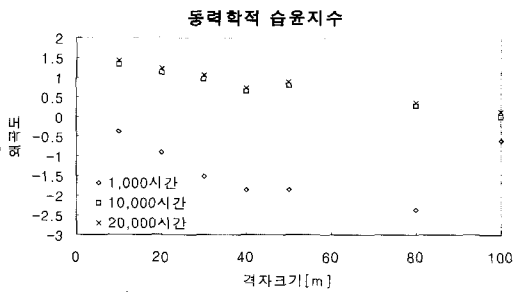
(a)



(b)

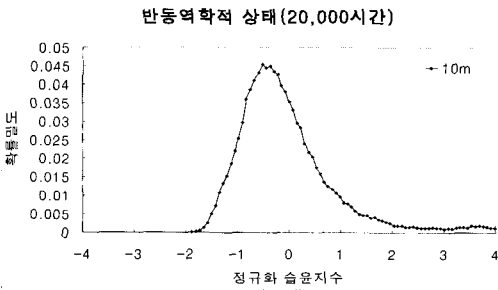


(c)

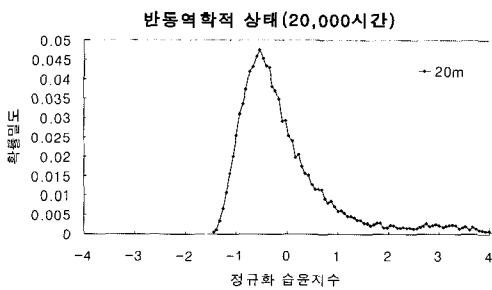


(d)

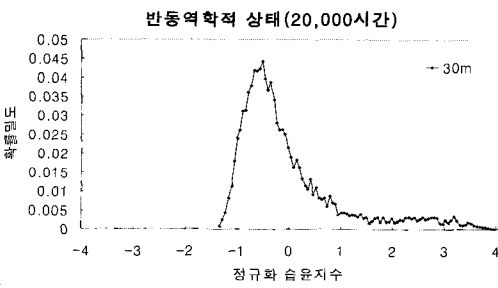
그림 10. 격자 크기에 따른 동역학적 습윤지수  
(a)평균, (b)분산, (c)표준편차, (d)왜곡도



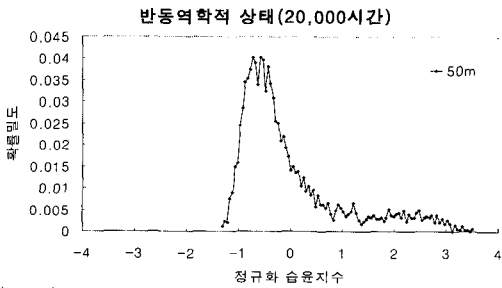
(a)



(b)



(c)



(d)

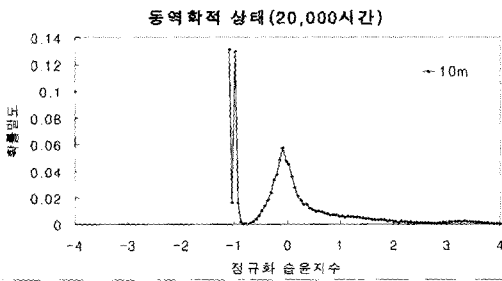


(e)

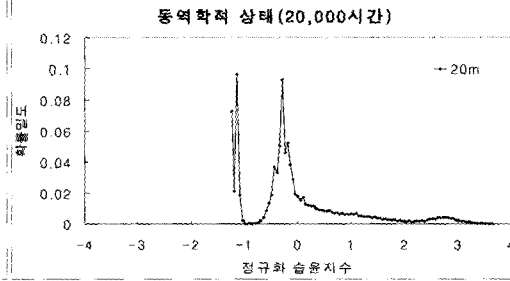


(f)

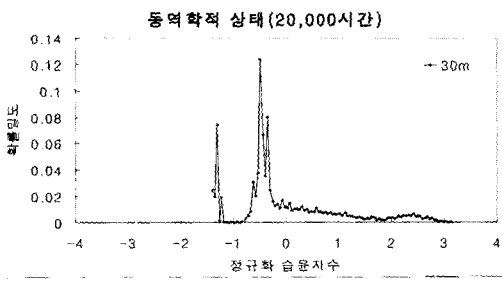
그림 11. 정규화 한 반동역학적 습윤지수의 확률밀도함수(20,000시간)  
 (a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m



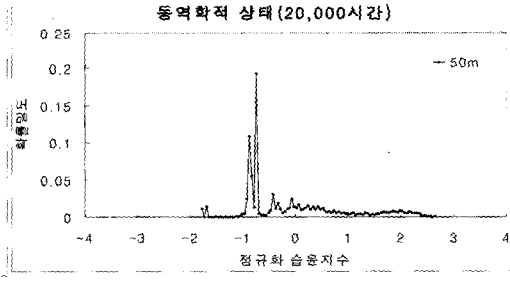
(a)



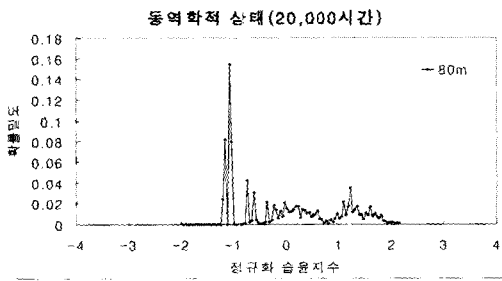
(b)



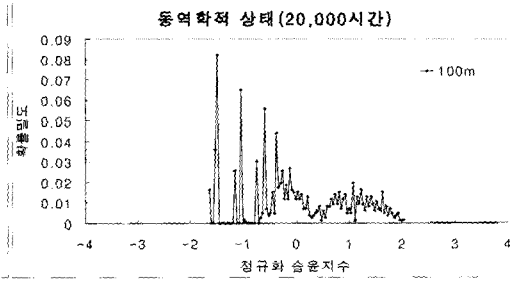
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 12. 정규화 한 동역학적 습윤지수의 확률밀도함수(20,000시간)  
 (a)10m, (b)20m, (c)30m, (d)50m, (e)80m, (f)100m

그림 10은 각 격자 크기에 따른 동역학적 습윤지수의 통계값을 보여준다. 반동역학적 습윤지수와 마찬가지로 격자 크기가 커짐에 따라 배수시간에 관계없이 평균이 증가하고 있다. 분산과 표준편차 그리고 왜곡도는 감소추세를 보여주고 있으며 배수 시간에 따라 값의 차이는 있으나 추세는 유사함을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 Wolock과 Price(1994)의 연구결과인 정상상태의 습윤지수의 결과와 유사한 경향을 보여주고 있으나 동역학적 습윤지수의 경우는 10,000 시간 이상의 배수시간의 경우에는 모든 통계치가 상당부분 일치하는 결과를 보여주고 있다.

습윤지수가 TOPMODEL 등의 유출 모형에 기여할 때는 절대적인 값이 아닌 상대적인 분포가 역할을 한다. 따라서 격자 크기 별 습윤지수의 비교시 정규화 확률밀도함수의 분포를 고찰하는 것이 필요하다. 그림 11은 20,000시간 배수시켰을 때 정규화 한 반동역학적 습윤지수의 확률밀도함수를 격자 크기별로 보여주고 있다. 격자 크기가 증가함에 따라 확률밀도함수의 연속성이 감소했으며, 80m의 격자 크기 이상에서는 계산된 확률밀도분포가 보다 작은 격자의 경우와 상당한 차이를 보이고 있다.

그림 12는 20,000시간 배수시켰을 때 정규화 한 동역학적 습윤지수의 확률밀도함수를 격자 크기별로 보여준다. 30m 이하의 격자 크기에서는 하단부와 상단부로 구분되는 두 개의 두드러진 확률밀도 분포가 관찰되었으나 50m 이상의 격자 경우는 이와 같은 현상이 사라지고 불규칙하고 불안정한 분포를 보이는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

기존의 습윤지수의 정상상태 가정을 완화한 반 동역학적 습윤지수와 실제우량을 회귀 적분한 동역학적 습윤지수가 격자크기와 배수시간의 변동성에 따라 산출되는 결과를 공간적, 통계적으로 연구하였다.

1. 반동역학적 습윤지수와 동역학적 습윤지수의 습윤 정도는 배수시간이 경과할수록 구조화 집중화 양상을 보여주고 있고, 격자크기별로는 100m 격자에서 10 m 격자로 감소할수록 임의성이 최소화되고 구조성이 두드러진 반응을 보여주고 있다.

2. 반동역학적 습윤지수와 동역학적 습윤지수의 수치 고도모형의 격자 크기별 통계적 분석 결과는(평균, 분산, 왜곡도) 배수시간 10,000 시간 이상에서 유사한 거동을 보여주고 있으며, 배수시간 1,000 시간의 변화양

상과는 상당한 차이를 보여주고 있다. 이는 배수시간 10,000 시간이상에서는 정상상태에 근접한 수렴된 결과를 보이고 배수시간 1,000 시간 등의 경우는 천이상태임을 의미한다.

3. 반동역학적 습윤지수의 경우 격자크기 80m 이상의 확률분포는 상당한 불안정성을 보여주고 있으며 동역학적 습윤지수의 경우는 격자 크기 50m를 경계로 상이한 분포양상이 나타났다. 이는 반동역학적 습윤지수의 경우 50 m 보다 작은 격자크기가 동역학적 습윤지수의 경우는 30 m 보다 작은 격자크기의 사용이 일관성과 안정성이 보장된 계산결과를 도출한다는 것을 의미한다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김상현, 김경현(1999). "공간적 포화면적의 공간적 연결을 고려한 TOPMODEL의 개선과 적용" **한국수자원학회논문집**, 32권, 5호, pp. 515-524.
- 김상현, 이지영(1999). "개선된 지형지수 산정 알고리즘의 적용에 관한 연구" **한국수자원학회논문집**, 32권 4호 pp. 489-499.
- 이지영, 김상현(2000). "지형적 특성을 고려한 지형지수 산정 알고리즘에 관한 연구" **한국수자원학회 논문집**, 33권, 1호 pp. 279-288.
- 한지영, 김상현(2003a). "토양수분 예측을 위한 수치 지형 인자와 격자크기에 대한 연구" **한국수자원학회논문집** 36권 2호 pp. 251-261.
- 한지영, 김상현(2000b). "반동역학적 습윤지수와 동역학적 습윤지수의 개발과 적용" **한국수자원학회논문집** 게재 확정.
- Band L. and Mackay(1998). "Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography" **Water Resources Research**, Vol. 34, No. 4, pp. 897-901.
- Barling R. D., Moore, I. D., and Grayson, R. B.(1994). "A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content" **Water Resources Research**, Vol 30, No. 4. pp.

1029-1044.

- Beven K. J., and Freer J.(2001). "A dynamic TOPMODEL" *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 1993-2011.
- Beven K. J., and Kirkby, M. J.(1979). "A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology" *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol 24, pp. 43-69.
- Grayson, R. B., Moore, I.D., and McMahon, T. A. (1992). "Physically based hydrologic modeling. 1. A terrain-based for investigative purposes." *Water Resour. Res.*, Vol. 10, pp.2639-2658.
- O'Callaghan J. F., and Mark, D. M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Comput. Vision Graphes Image Process.*, Vol. 28, pp. 323-344.
- O'Loughlin, E. M.(1986). "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis" *Water Resources Research*, Vol 22, No. 5. pp. 794-804.
- Watson, F., Grayson R., Vertessy R. and McMahon T. A.(1998). "Large-scale distribution modelling and the utility of detailed ground data." *Hydrol. Process.*, Vol. 12. pp. 873-888.
- Wigmosta, M. S., and Lettenmaier, D. R.(1999). "A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow" *Water Resources Research*, Vol 35, No. 1. pp. 255-264.
- Wolock Hand Price (1994). "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 77, pp. 3041-3052.
- Zhang, W. and Berndtsson(1991). "Analysis of soil water dynamics in time and space by use of pattern recognition" *Water Resources Research*, Vol 27, No. 7. pp. 1623-1636.

(논문번호:03-10/접수:2003.02.10/심사완료:2003.10.21)