

유사 동력학적 습윤지수와 동력학적 습윤지수의 개발과 적용

The Development and Application of the Quasi-dynamic Wetness Index and the Dynamic Wetness Index

한 지 영* / 김 상 현* / 김 남 원** / 김 현 준***

Han, Ji Young / Kim, Sang Hyun / Kim, Nam Won / Kim, Hyun Jun

Abstract

Formulation of quasi-dynamic wetness index was derived to predict the spatial and temporal distribution of the soil moisture. The algorithm of dynamic wetness index was developed through introducing the convolution integral with the rainfall input. The spatial and temporal behaviors of the wetness index of the Sulmachun Watershed was calculated using the digital elevation model(DEM) and the rainfall data for two years. The spatial distribution of the dynamic wetness index shows most dispersive feature of flow generation among the three assumptions of steady, quasi-dynamic and dynamic. The statistical distribution of the quasi-dynamic wetness index and the dynamic wetness index approximate to the steady state wetness index as the time step is increased. The dynamic wetness index shows mixed distribution of the normalized probability density function.

Keyword : quasi dynamic wetness index, dynamic wetness index, soil moisture prediction

요 지

토양수분 분포의 시공간적인 예측을 위하여 유사 동력학 상태의 습윤지수 계산과정을 정리하였고, 우량 자료를 회귀적분한 동력학적 습윤지수의 계산 알고리즘을 개발하였다. 설마천 유역의 수치고도 모형과 2년간의 우량자료를 활용하여 동력학적 상태의 습윤지수의 시·공간적인 거동을 분석하였다. 공간적인 거동은 동력학적인 습윤지수가 유사 동력학적 상태나 정적인 습윤지수와 비교하여 흐름분산 특성이 강조된 분포특성을 보여주었다. 통계적인 특성으로는 시간이 경과함에 따라 유사동력학적 습윤지수나 동력학적 습윤지수 모두 정상상태 습윤지수에 근접하나, 동력학적 습윤지수의 경우 두 개의 상이한 분포특성이 나타났다.

핵심용어 : 유사 동력학적 습윤지수, 동력학적 습윤지수, 토양수분예측

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

** 정회원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수, 교신저자
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Busan, 609-735, Korea
(E mail:kimsangh@pusan.ac.kr)

*** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원
(E-mail:hjkim@kict.re.kr)

**** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원
(E-mail: nwkim@kict.re.kr)

1. 서 론

Zhang과 Berndtssm(1991)는 토양수분과 토양수분의 공간적 시간적 특징들은 증발, 침투, 지하수 재충전, 토양 침식, 식생 분포 등을 지배하는 중요한 요소임을 밝혔다. 특히 초기토양수분의 정도에 따라 유출에 미치는 영향을 Troch(1993)가 연구하였으며 유효수량의 크기 결정에 영향을 주는 선행함수조건(AMC)의 선정 시에도 강우사상 이전의 토양수분 상태를 고려해주어야 함을 윤용남(2000)에 의해 연구 되었다. 즉, 강우 사상 이전의 토양의 수분 함량이 높으면 강우로부터 토양이 받을 수 있는 물의 양은 상대적으로 작고 유출량이 많아지므로 유효수량이 증가된다.

토양수분 함량에 영향을 미치는 인자로서는 투수계수, 비피압 대수대, 공극률, 우선흐름경로 등의 토양특성과 수리 경사의 측정치로써 국소 경사, 잠재 최대 흐름량의 측정인 상부사면 기어면적, 흐름의 수렴과 발산 속도 측정치로써 등고선구배와 수리 경사의 변화율인 윤곽구배, 경사에 따른 태양복사량의 영향과 증발산의 고려를 위한 흐름 방향과 지형적인 음영 등의 지형과 지표 식생(surface cover)과 물 사용 특성 변동 등의 식생 그리고 순 강수량, 순 복사량, 바람, 온도 등의 기상 조건이 있다(Barling 등, 1994).

지형은 대부분의 수문모의에 있어서 기본적인 입력값으로 쓰이고 있는 만큼 유출과 직접적인 영향을 가지고 있다. 특히 지형 고려 인자로써 Beven 과 Kirkby (1979), O'Loughlin(1986)은 습윤지수를 TOPMODEL을 기본으로 하는 여러종류의 수문 모의에 응용하였고, Burt 와 Butcher(1985)는 토양수분 모의 과정에서도 사용되어 왔다. 이 지수는 기본적으로 정상상태를 가정하고 있으나 Wigmosta와 Lettenmair(1999)의 연구에 의하면 정적인 형태의 습윤정도 접근이 동력학적 사면유출을 기술하는데 한계를 보여주고 있다고 알려져 있다.

본 연구에서는 정상상태의 가정을 완화하기 위한 유사동력학적 습윤지수의 Barling 등(1994)의 연구결과를 도입하고 이를 발전시킨 완전 동력학적 습윤지수의 계산알고리즘을 제안하였다. 설마천 유역을 대상으로 정상상태, 유사동력학적 습윤지수 및 동력학적 습윤지수의 계산 알고리즘을 적용하고 이들의 거동 특성을 연구하였다.

2. 습윤지수

2.1 정적 습윤지수(steady-state wetness index)

Beven과 Kirkby(1979)에 의해 제안된 습윤지수는 $\ln(a/\tan \beta)$ 로써 지형의 포화정도를 설명한다고 알려져 있으며 자연의 지형 특성을 반영하는 인자로서 유출 등의 수문 현상을 모의하는데 사용되어 왔다. 습윤지수는 포화성향성 혹은 수문학적 상사성을 수치지형모형에서 구현하는 수문학적 대리지수로서 TOPMODEL, THALES, TOPOG 등의 많은 분포형 수문 모형에서 활용되고 있다. a 는 상부사면 기어면적이고 $\tan \beta$ 는 경사도를 나타낸다. 상부사면 기어면적은 각 격자가 받을 수 있는 잠재 흐름량을 나타내며, 8개의 이웃격자 중에서 경사가 가장 급한 격자라면 흐름을 분배하는 단방향 알고리즘, 경사가 있는 모든 방향으로 흐름을 분배하는 다방향 알고리즘, 격자 기반의 모델에서 흐름을 점원적 발생 특성과 흐름 경로의 1차원적인 특성으로 표현하는 것을 고려하여 흐름이 점원이 아닌 면에서 발생하고 그 발생된 흐름은 하경사 방향으로 2차원 흐름선을 형성한다고 가정된 DEMON 알고리즘 등의 흐름 분배 알고리즘 방법으로 계산할 수 있다(한지영과 김상현, 2003)

2.2 유사동력학적 습윤지수

(quasi-dynamic wetness index)

습윤지수는 국부 경사도에 대한 상부사면 기어면적의 비로써 이것의 계산을 위해서는 각 격자에 해당하는 유출량을 계산할 필요가 있다. 이때 정상상태 가정에 도달하기 위해서는 유역 출구에서 가장 멀리 떨어져 있는 지역의 유출이 유역 출구에까지 기여하여야만 하지만 실제로 지표하 흐름 속도가 매우 작기 때문에 정상상태에 도달하기가 어렵다. 따라서 시간에 따른 기어면적이 변화하는 것을 고려해주는 것이 합당하다.

일차원적인 흐름을 고려하는 Darcy의 법칙은 다음과 같다.

$$q = -K_s \frac{dh}{ds} \quad (1)$$

여기서 q 는 유동밀도 [$L T^{-1}$]이고, K_s 는 포화 투수계수 [$L T^{-1}$]이고, h 는 흐름방향의 자유수면 높이 [L]이다. 지표하 흐름을 기술하는 Darcy의 법칙은 공극을 가지는 토양의 특성이 균일하고 동질성을 가지며 대수

층 내에 모관수대가 존재하고 있고 흐름이 정상상태라는 가정을 전제로 한다.

만약 지하수면 경사가 지표면 경사와 같다면 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = K_s \tan \beta \quad (2)$$

여기서 $\tan \beta$ 는 불투수층의 경사이고 그것은 토양 표면의 경사와 같다고 가정한다.

공극을 고려한 지표하 흐름 속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v = \frac{q}{\eta} = \frac{K_s}{\eta} \tan \beta \quad (3)$$

여기서 η 는 토양 공극률이다.

Iida(1984)가 소개한 도달시간-집수면적 곡선 개념을 이용하여 임의의 상부지점 P에서 하부지점 Q까지 흐름선을 따라 물이 흐르는데 요구되는 시간은 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$t_{PQ} = \int_P^Q \frac{ds}{v} = \int_P^Q \frac{\eta}{K_s \tan \beta} ds \quad (4)$$

여기서 s 는 P와 Q 사이의 흐름선을 따른 거리이다.

이 방법으로 계산하는 것은 주로 도시 지역과 같은 유입 시 즉시 유출에 기여하는 불투성 지역에서 강우사상으로 인한 유역 출구점에서 유량의 시간적 변화를 계산할 수 있으며 저류효과를 고려하지 않고 단지 전이(轉移)만을 고려한다.

만약 재충전율이 r_0 로 일정하다면 단위폭 당 유출량 $q(t)$ 과 포화된 지표하 흐름의 깊이 $h(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(t) = r_0 a(t) \quad (5)$$

$$h(t) = \frac{q(t)}{K_s \tan \beta} \quad (6)$$

여기서 $a(t)$ 는 상부사면 기여면적[L]이다.

식 (5)를 식(6)에 대입하면 다음과 같다.

$$h(t) = \frac{r_0}{K_s \tan \beta} a(t) \quad (7)$$

일반적으로 이 방법을 적용할 때 각 시간 단계에 따라 한 지점에 기여하는 유출은 도달시간이 동일한 점들을 연결하는 등시간선을 그린 다음 각 도달 시간에 해당하는 누가면적 산정하게 됨으로 산출된다. 그림 1은 도달시간-집수면적을 설명한다.

각 시간 단계에서 단위 등고선 폭 b_i 격자길이(DEM), 에 대한 상부사면 기여면적($a(t) = A_e$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a(t) = A_e = \sum_{i=1}^n A_i / b \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

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

임의의 한 격자의 상부 기여면적 계산 시에는 주어진 시간에 상부 격자들이 그 격자에 얼마나 많은 유출량을 기여할 수 있는지를 계산하여야 하며 주어진 시간에 대해 흐름선을 따른 면적을 계산해 주어야 한다. 임의의 시간 t 에 대해 기여할 수 있는 면적은 다음과 같이 줄 수 있다.

$$A_i = \int_0^{s_i} b(s) ds \quad t_{i-1} < t < t_i \quad s_i = \frac{\eta(t - t_{i-1})}{K_s \tan \beta}$$

$$A_i = A_{ii} \quad t > t_i \quad s_i = s_{imax}$$

$$A_i = 0 \quad t < t_{i-1}$$

(9)

여기서 A_i 는 i 번째 격자의 면적이고, A_{ii} 는 정상상태에 도달했을 때의 기여면적이고, $b(s)$ 는 흐름길이에 대한 함수이고, s_i 는 시간단계 $t - t_{i-1}$ 에서 i 번째 격자에 대한 흐름선이고 t 는 배수시키는 시간이고 t_i 는 i 번째 격자가 정상상태에 도달하는 시간이고, t_{i-1} 는 i 번째 격자에 기여하는데 필요한 시간을 의미한다.

2.3 동역력학적 습윤지수(dynamic wetness index)

유사 동역력학적 습윤지수가 일정한 재 충전율을 사용한 반면 실제 유량을 사용하여, 유출량이 시간에 따라 변화하는 것을 고려하면 단위폭 당 유출량 $q(t)$ 과 포화된 지표하 흐름 $h(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

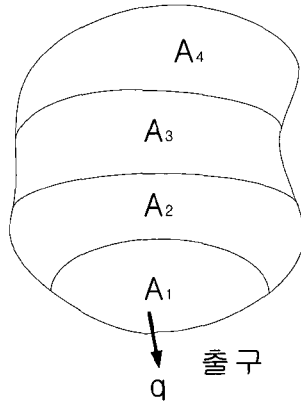


그림 1. 등시간선

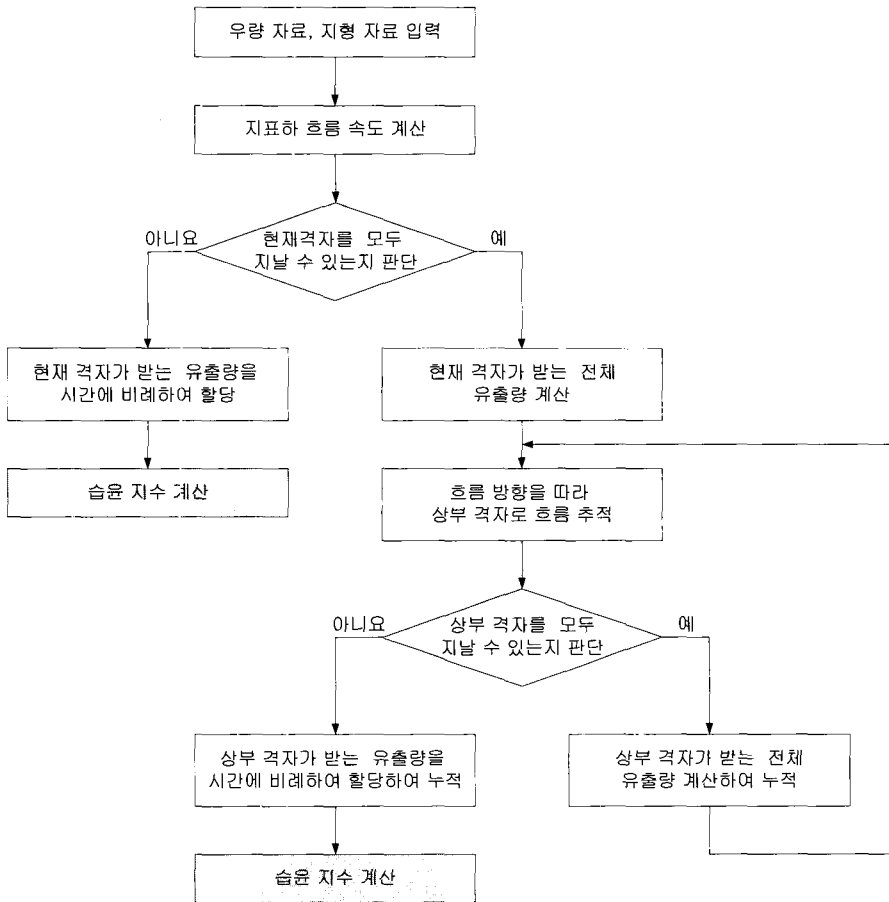


그림 2. 동력학적 습윤지수 계산과정

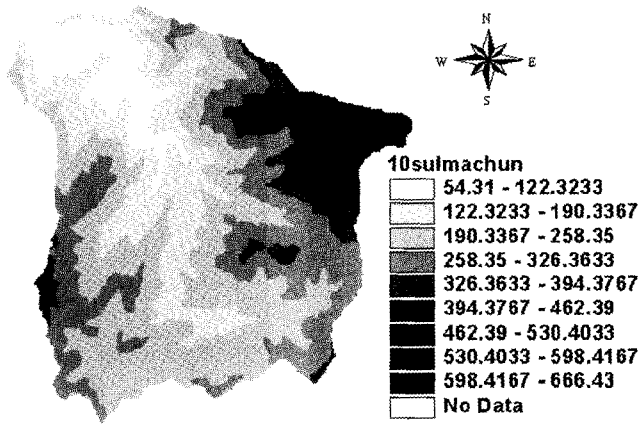


그림 3. 설마천 유역 DEM[m]

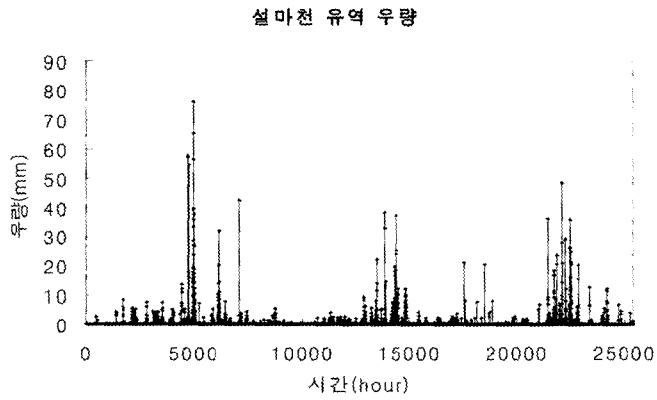


그림 4. 설마천 유역 우량

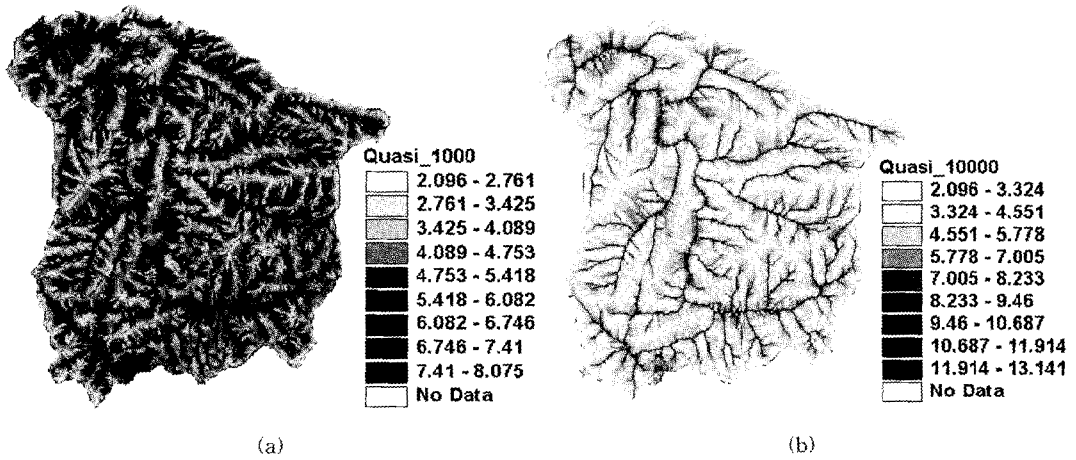


그림 5. 유사동력학적 습윤지수의 공간분포 (a) 1,000시간 (b) 10,000시간

$$q(t) = \int_0^t \frac{da(t)}{dt} r(t-\tau) dt \quad (10)$$

$$h(t) = \frac{q(t)}{K_s \tan \beta} \quad (11)$$

식 (10)을 식(11)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \frac{1}{K_s \tan \beta} \int_0^t \frac{da(t)}{dt} r(t-\tau) dt \quad (12)$$

여기서 $r(t)$ 는 시간 단계 t 에서 재충전율이고, τ 는 적분 변수이다.

상부사면 기여면적을 계산하는 것은 2.3절의 식 (11)과 식(12)로 구할 수 있다.

그림 2는 동력학적 습윤지수 계산 과정이며 강우가 지표하에서 흐르는 시간을 고려하여 상부사면에서 받을

수 있는 우량을 누적하여 습윤지수를 계산한다.

3. 대상유역

연구 대상 유역으로 설마천 유역을 선정하였다. 설마천은 임진강의 제 1지류이며 임진강 하구에서 46 km 상류에 위치하고 있다. 전체 유역면적 18.5 km², 유로 연장 11.3 km이며 이중 설마천 유역의 중류부에 위치한 영국군 전적비를 출구로 하는 지역을 대상유역으로 한다. 설마천 유역은 유역면적 8.5 km², 유로연장 5.8 km, 유로경사 2%로 전형적인 산지 지역으로 하천의 발달이 양호하며 자연 생태환경이 보전되어 있다. 또한 한국건설 기술연구원에서 시험유역으로 운영하고 있어 수문 분석을 위한 수문관측 기기 및 계측기가 운용 중이며 이렇게 관측된 자료는 이 연구를 수행하는데 필요한 자료의 일부분을 제공한다. 그림 3은 설마천 유역의 수치고도모형(Digital Elevation Models, DEM)이다.

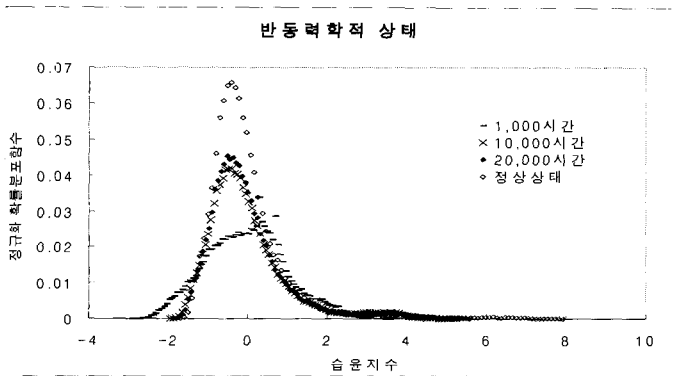


그림 6. 유사동력학적 습윤지수의 정규화 확률분포함수

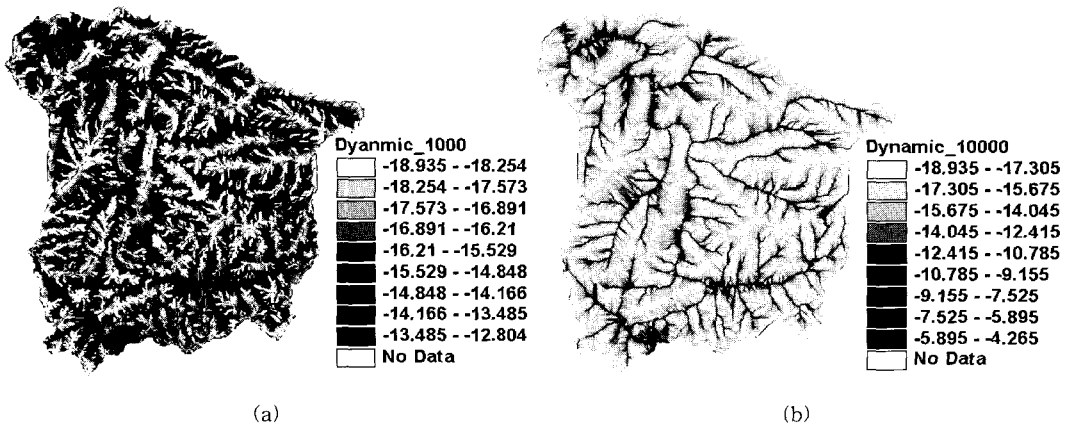


그림 7. 동력학적 습윤지수의 공간분포 (a) 1,000시간 (b) 10,000시간

우량은 설마천 유역의 1999년 1월 6일 12시부터 2001년 11월 29일 15시까지 총 25396시간 동안 시간 단위 유역평균 우량 자료를 이용하였다. 한국건설기술연구원에서 제공하는 우량 자료를 이용하였고 결측 자료는 동두천 기상청 자료를 이용하였다. 그림 4는 시간에 따른 설마천 우량을 보여주며 시간 1이 1999년 1월 6일 12시를 의미한다.

4. 결과 및 토론

본 연구에서 제시된 수식들을 활용하여 정상상태, 유사동력학적 상태, 그리고 동력학적 상태에 대한 습윤지수를 계산하였다. 습윤지수 계산 시 단위 격자 크기에 대한 상부사면 기여면적을 누적시켰다.

그림 5는 수식 (9)를 적용한 유사동력학적 습윤지수를 각각 1,000시간(그림 5(a))과 10,000시간(그림 5(b)) 후의 계산결과를 도시한 것이다. 그림 5는 시간이 지남에 따라 습윤도의 집중성이 증가함을 보여주고 있다.

유사동력학적 상태의 경우 모의 시간이 1,000시간일 경우 평균은 4.7102, 분산은 0.8115, 왜곡도는 0.1999이고 10,000시간일 경우 평균은 5.0544, 분산은 2.3064, 왜곡도는 1.6213이며 20,000시간인 경우 평균은 5.0718, 분산은 2.5022, 왜곡도는 1.8376의 통계치를 나타내고 있다.

그림 6은 유사동력학적 습윤지수의 정규화 확률분포를 보여주고 있다. 시간이 지남에 따라 그 분포형상이 정상상태에 가까워짐을 볼 수 있으나, 2년이 지난 시간인 20,000시간 후에도 정상상태에 도달하지 못함을 나타내고 있다.

그림 7은 수식 (12)와 그림 2의 계산과정을 이용한 동력학적 습윤지수의 계산결과를 나타낸 것이다. 수식 (12)를 적용하기 위해서는 대수층을 통해 지하수가 이동할 수 있는 정도를 나타내는 대수층의 공극률이나 구멍입자의 크기, 분포, 배치상태, 모양 및 층내 물질의 지질학적 변천과정 등을 고려하여 식 (13)을 사용하여 투수계수 K 계산한다(Vuković and Soro, 1992).

$$K = \frac{g}{\nu} C \psi(n) d_e^2 \quad (13)$$

여기서, g 는 중력가속도, ν 는 동점성 계수, C 는 계수, $\psi(n)$ 는 공극과 관련된 함수이고 d_e 는 유효입자경이다. 이 연구에서 투수계수 계산 시 Hazen이 제안한 값을 사용하

였다. 그 값으로는 $C=6 \cdot 10^{-4}$, $\psi(n)=1+10(n-0.26)$ 이고 n 은 공극률이며, $d_e=d_{10}$ 로 두었으며 d_{10} 은 10% 일 때 입자 직경을 의미한다. 투수계수는 흐름의 단위길이에 대하여 단위수두강하에서 단위면적을 통하여 단위 유량이 수송될 때 K 는 1(단위시간에 대한 단위길이)의 값을 갖는다고 한다. 따라서 투수계수는 속도 $[L T^{-1}]$ 의 차원을 갖는다. 식 13을 사용하여 설마천 유역의 투수계수는 대략 2.38[m/day]로 계산되었다.

그리고, 동력학적 습윤지수는 단위 격자 크기에 대한 상부사면 누가면적과 그림 4의 우량자료를 활용하여 그 시간대에 기여하는 우량값을 회귀적분함으로써 계산하였다(그림 7). 공간적인 분포에서는 유사동력학적 습윤지수와 상대적인 분포는 유사하나 흐름의 집중성이 상대적으로 미약한 것으로 나타났다. 또한 습윤지수의 절대적인 분포 범위는 정상상태의 습윤지수나 유사동력학적 습윤지수와 상당한 차이를 보이고 있으며 이는 정상상태 혹은 유사동력학적 상태의 습윤지수가 면적 스케일의 단위우량의 지속적인 유입을 가정하고 있는 것에 반하여 면적스케일의 실제우량을 사용에 기인하고 있다.

동력학적 상태의 모의에서 1,000시간이 흐른 후에는 평균이 -16.7246, 분산이 2.0412, 왜곡도가 -0.3740을 보여주며, 10,000시간이 흐른 후에는 평균이 -15.9521, 분산이 7.2109, 왜곡도가 1.3223을 나타내며, 20,000시간이 흐른 후에는 평균이 -15.9355, 분산이 7.5019, 왜곡도가 1.4170을 보여주고 있다.

그림 8은 동력학적 습윤지수의 정규화 확률분포를 보여주고 있다. 여기에서도 유사동력학적 습윤지수와 마찬가지로 2년 이상의 시간이 흐른 후에도 정상상태에 도달하지 못함을 보이며 그 분포가 2개로 양분되는 현상을 보이고 있다. 이는 실제 우량을 사용하는 동력학적 습윤지수의 수문학적인 거동이 기존의 습윤지수와 완전히 상이한 특성을 보이고 있음을 의미한다. 정적인 가정이나 유사 동력학적인 가정을 가지는 습윤지수는 유역으로의 재충전율이 일정하다는 가정에서 계산이 수행되지만 동력학적 습윤지수는 시간적으로 불균일성이 상당한 강우자료와 현장시료의 분석을 통해 계산된 포화투수계수의 영향이 수치지형모형(DEM)에서 공간적 흐름 분포를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 즉, 배수의 잠재성이 상대적으로 큰 사면 상단부의 경우 일정 재충전율을 가정한 습윤지수가 최소 유입유량을 유지하는 반면, 강우 사상 이후의 배수가 충분히 진행된 상부사면의 동력학적 습윤지수는 상당한 유출이후 상대적으로 낮은

동력학적 상태

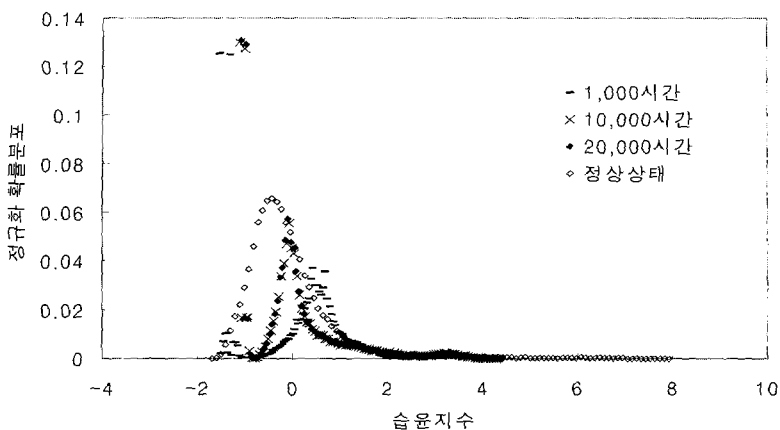


그림 8. 동력학적 습윤지수의 정규화 확률분포함수

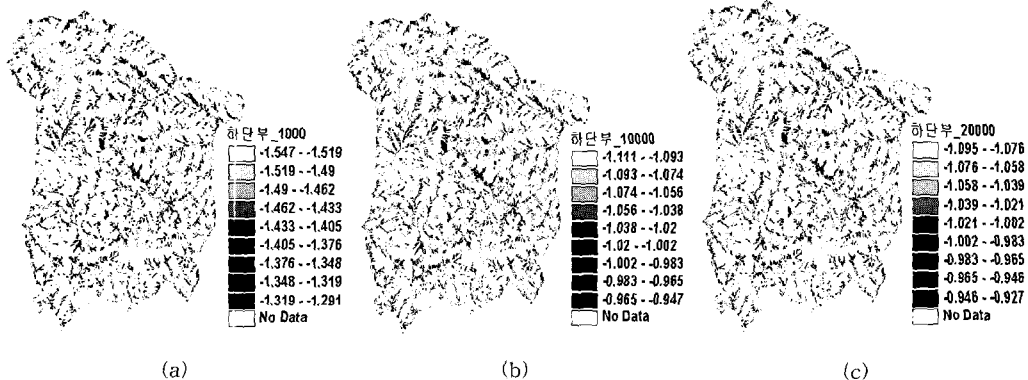


그림 9. 동력학적 습윤지수의 하단부 정규화 확률분포 지역의 공간적 분포

(a) 1,000시간 (b) 10,000시간 (c) 20,000시간

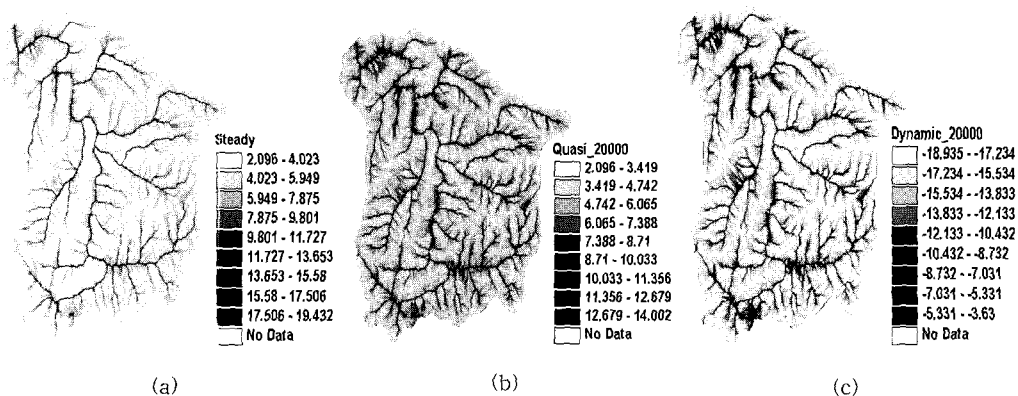


그림 10. 습윤지수 비교

(a) 정상상태 (b) 유사동력학적 상태(20,000시간) (c) 동력학적 상태(20,000시간)

습윤상태를 나타낼 것으로 판단된다.

그림 9는 동력학적 습윤지수의 정규화 확률분포 중 하단부의 부분을 공간적으로 나타낸 것인데 수문학적으로 하천유출의 기여도가 미소한 특성을 보이는 지역이다.

그림 10은 정상상태, 유사동력학적 상태(20,000시간) 그리고 동력학적 상태(20,000시간)의 습윤지수의 공간적 분포를 도시한 것이다. 동력학적 상태의 습윤지수가 흐름 분산의 특성이 가장 두드러진 것으로 판단되었다.

5. 결 론

토양수분과 지형과의 관계를 분석하는 습윤지수의 계산과정에 개입되는 정상상태, 유사동력학적 상태, 동력학적 상태에 대한 비교 연구를 실시한 지역의 수치지형 자료와 우량자료를 활용하여 수행하였다. 동력학적 습윤지수를 계산하는 알고리즘이 제시되었다. 유사동력학적 상태의 습윤지수는 시간이 경과함에 따라 정상상태의 습윤지수의 공간적, 통계적 분포에 근접하는 것으로 나타났으나, 20,000시간이 지난 후에도 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 동력학적 상태의 습윤지수의 경우, 다른 두 습윤지수와 공간적으로는 비교적 유사한 분포를 나타내고 있으나 세 가정의 습윤지수 공간분포 중 가장 확산적인 성향을 보여 주었으며, 통계학적으로는 상이한 분포를 보여주고 있다. 동력학적 습윤지수의 확률밀도함수의 하단부 분포상황은 강우량의 불균일성과 투수계수가 수치지형모형의 추적 과정에서 결합된 결과로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

윤용남(1998) 工業水文學 淸文閣, pp.142-155.
한지영, 김상현(2003) “토양수분 예측을 위한 수치지형 인자와 격자크기에 대한 연구” 한국수자원학회지 게재예정.
Barling, R. D., I. D. Moore, and R. B. Grayson (1994) “A quasi-dynamic wetness index for charac-

terizing 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 Kirkby J. N. (1979) “A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology” *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol 24, pp. 43-69.

Burt T. P. and Butcher D. P. (1985) “Topographic controls of soil moisture distributions” *Journal of Soil Science*, Vol. 36, pp. 469-486.

Iida T. (1984) “A hydrological method of estimation of topographic effect on saturated throughflow” *Trans. Jap. Geomorphol. Union*. Vol. 5, No.1, pp. 1-12.

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.

Troch, P. A. and Brutsaert(1993) “Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions” *Water Resources Research*, Vol 29, No. 2. pp. 427-434.

Vuković M. and Soro A.(1992) “Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition” *Water Resources Publications* pp. 25-83.

Wigmosta M. S. and Lettenmaier D. P. (1999) “A comparison of simplified methods for routing topographically driven subsurface flow” *Water Resources Research*, Vol 35, No. 1. pp. 255-264.

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:03-06/접수:2003.01.28/심사완료:2003.10.21)