

설마천 유역의 토양수분과 유출간의 전이함수 분석

Transfer Function Analysis Between Soil Moisture and Runoff at a Hillslope in the Sulmachun

선한나*, 주승효** ,김상현***

Han Na Sun, Suenghyo Joo, Sanghyun Kim

요 지

본 연구에서는 경기도 설마천 지역에 위치한 독립사면에서 시간에 따라 연속 측정된 토양수분을 이용하여 시계열 분석을 수행하였다. 토양수분의 측정 방법은 장기간 토양수분의 확보에 신뢰성을 인정받은 TDR을 이용하였다. 관측망의 설계를 통하여 선정된 측정지점에 탐침을 매설하고 공간적인 분포를 가진 시계열 형태의 데이터를 수집하였다. 유출은 해당 사이트 인근에 위치한 사방댐과 전격비교의 수위계에서 실측한 값을 사용하였다. 전이함수 모형을 사면에서의 토양수분 전이과정에 대응되도록 물리적으로 전개하고 실측한 토양수분 시계열 데이터로 분석한 결과와 비교하였다. 전이함수 모형은 토양수분 시계열 데이터를 입력변수로 하고 유출 데이터를 반응 변수로 하여 전개하여 토양수분 변화량과 유출간의 전이함수 모형을 도출하였다. 시계열 모형의 전개는 크게 자료전처리, 모형구조의 규명, 모수추정, 모형진단 등의 과정을 통해서 적절한 모형을 도출하였다. 산지 사면에서의 토양수분을 전이함수에 의하여 전개한 모형은 지형적 분포 양상에 따라 특색을 나타내었다. 또한 2003년 가을과 2004년 봄의 전이함수 모형 추정을 통하여 계절별 특성이 나타났고, 모형양상에 원인을 검토해 보았다. 본 연구는 전이함수를 이용한 토양수분의 시계열 분석이 사면에서의 토양수분 변동특성을 지형적, 계절적 특성과 연계하여 이해하고 특성화 하는 과정의 적절한 도구가 될 수 있음을 보여주고 있다.

핵심용어 : 전이함수(Transfer function), 토양 수분, 전이함수, 물리적 전개, ARMA

1. 서 론

토양수분은 침투와 유출기작에 있어서 핵심적인 역할을 한다. 특히 물 흐름의 원두부인 산지의 토양수분에 관한 연구는 지표수와 지하수 순환과정의 시간적 공간적 거동을 이해하는데 기초가 되며 필수적인 단계이다. 그러나 그 중요성에 비해 토양 수분의 시공간적 해석에 대한 연구가 국내에서는 잘 이루어 있지 않고 있으며, 특히 국내의 뚜렷한 계절적 특성에 따른 산지사면의 토양수분 거동 예측 또한 난해하다.(Beven, 1979) 그러므로 효율적인 수자원의 관리와 계절적 특성의 수분 거동 파악을 위해 토양수분의 불확실성과 변동성을 인지할 수 있는 모델링 기술이 요구된다. 이에 따라 경기도 파주시 설마리의 설마천 유역내에 감악산 범륜사 우측 산지 사면 유역에서 TDR(Time Domain Reflectometry)를 설치하여 토양수분을 측정 시스템을 구축하고 시스템을 통하여 얻어진 토양수분을 시계열 모형을 통하여 분석하였다. 시계열 분석 방법의 하나인 전이함수 모형은 서로 상관관계를 가지는 변수의 관계를 결정함으로써 추계학적 모형을 도출하고, 입력변수와 출력변수의 관계를 설명할 수 있다. 본 연구에서는 토양수분 시계열 데이터를 입력변수로 유출

* 정회원·부산대학교 수자원환경실험실·E-mail:gkssk474@pusan.ac.kr

** 정회원·부산대학교 수자원환경실험실·E-mail:minx4you@pusan.ac.kr

*** 정회원·부산대학교 환경공학과 부교수·E-mail:kimsangh@pusan.ac.kr

데이터를 출력변수로 한 전이함수를 전개하였다.

2. 이론 및 전개 과정

2.1 대상 유역 지점 및 이론

연구의 대상유역으로 설마천 유역내에 위치한 감악산 범륜사 우측 소규모 산지 사면을 선정하였다. 연구유역은 면적 8.50 km^2 , 유로연장 5.80 km, 유로경사 2.3 %로 전형적인 급경사 산지 사행하천이다 (이혜선, 2006). 대상 유역은 독립사면으로 유출 발단인 원두부에 위치하고 있다.

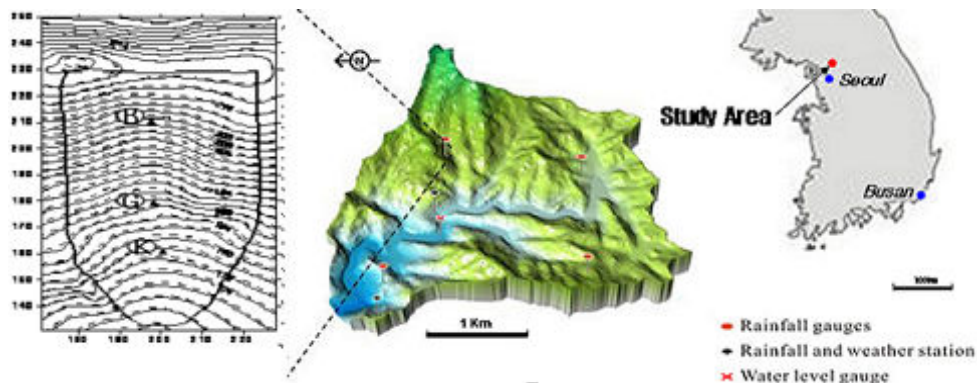


그림 1 . 연구 유역 설마천의 지형그림 과 TDR 탐침 매설 지점

표 1. 토양수분 측정 선정 지점의 습윤지수

point	X(m)	Y(m)	Z(m)	surface	
				SFD	MFD
B	197.53	210.19	206.94	4.86	3.64
G	198.12	178.92	186.68	3.45	6.02
K	200.48	160.69	177.44	6.38	6.50

그림 1 의 TDR 탐침은 토양층 10cm 에 매설 되어 2 시간의 간격으로 토양수분을 장기 측정한다. 매설된 지점 중 유역의 상, 중, 하부면의 대표 지점 B, G, K 을 선정하여 지점별 토양수분과 유출의 상관관계를 전개 하였다. 2003년 11월과 2004년 5월의 세 지점의 토양수분의 변화량과 유출을 보면 다음과 같다.

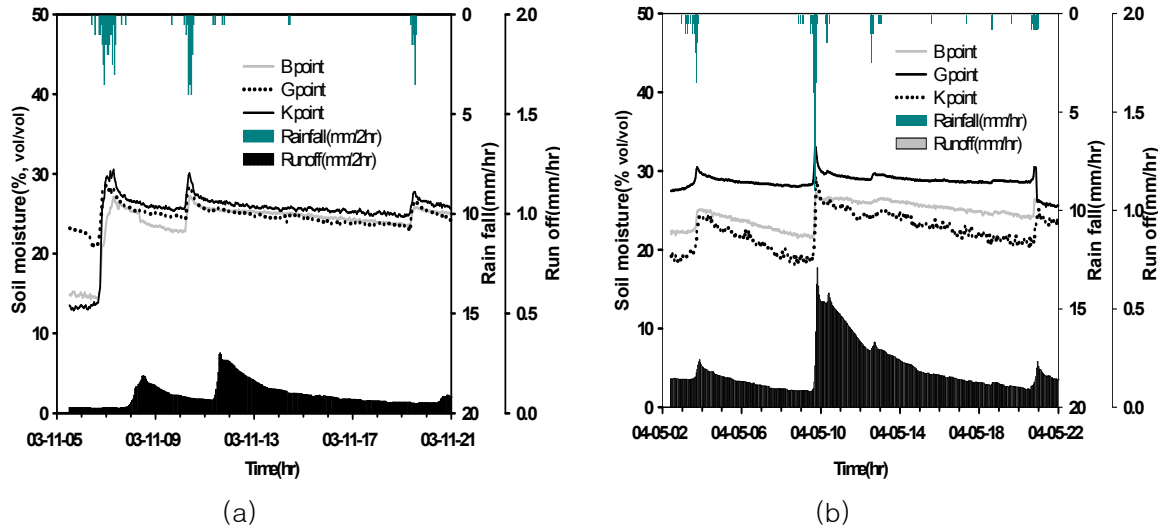


그림 2. 선정된 B, G, K 지점의 2003년11월과 2004년05월의 토양수분과 유출 일반적인 선형 전이 함수를 나타내면 식 (1) (2)와 같다.(Box and Jenkins, 1976)

$$(1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r) y(t) = (w_0 - w_1 B - w_2 B^2 - \dots - w_s B^s) x(t) \quad (1)$$

$$\delta(B) y(t) = w(B) x(t) \quad (2)$$

일반적인 선형함수 식을 토양수분과 유출의 상관관계로 나타내어 토양수분 S_t 를 입력변수, 유출 R_t 를 출력변수로 나타내면,

$$R_t = (w_0 - w_1 B - w_2 B^2 - \dots - w_{h-1} B^{h-1}) S_t / (1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r) \quad (3)$$

B 는 back shift(후향연산자)이며 w_i 와 δ_i , ϕ_i , θ_i 는 매개변수이다. 다항식 $w(B)/\delta(B)$ 는 시간 지체에 따른 전이함수 가중치를 나타낸다. 여기에 입력변수에 포함되지 않는 잡음항을 넣어 주어야 한다. a_t 는 백색잡음, 다항식 $\phi(B)$ 는 자기회귀항, $\theta(B)$ 는 이동평균항이다. 결과적으로 선형 전이 함수를 나타내면 식 (4)과 같다.

$$R_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} S_t + \frac{\Psi(B)}{\Phi(B)} a_t \quad (4)$$

2.2 시계열 전이함수 모형 적용 과정

토양수분 시계열 데이터를 입력변수로 하고 유출 데이터를 반응 변수로 하여 전개하였고, 단일 입출력 변수를 통해 전개한 전이 함수 시계열 모형의 적용 과정은 크게 자료전처리, 모형식별, 모수추정, 모형진단 등의 과정을 통해서 적절한 모형을 도출하였다.

2.2.1 자료의 전처리

본 연구에서는 Box-Cox 전환식 (Box and Cox, 1964)을 이용하여 자료를 정규화 하였고, 비정상성의 특성들은 차분을 통해서 개선되었다. 본 연구에서는 출력변수인 유출은 1차 차분된 형태로

사용되었다.(Lemke, 1991)

2.2.2 모형의 식별

입력 변수인 강우의 자기상관함수(ACF)와 편자기상관함수(PACF)를 통하여 회귀이동평균(ARMA)모형을 설정하여 잡음항(N_t)을 설정하였다. 전이 함수 모형전개를 위해 다항식을 추정하여 $w(B)/\delta(B)$ 의 차수를 추정하고, 추정된 모형의 결점을 찾아낸 후, 모든 모형의 가정이 적당한지를 점검한다(Lui, 2006). Box and Jenkins (1976)는 파라미터 수가 작은 모수 절약 모형의 필요성을 강조했다. 매개변수들의 유효성을 나타내는 t-절대값은 2보다 큰 값을 가지면 5% 수준에서 통계적으로 0이 아니므로 유효한 값을 나타낸다.

2.2.3 모수추정

토양수분 시계열 데이터를 입력변수로 하고 유출데이터를 출력변수로 한 전이함수는 Table 2와 3과 같이 전개되었다.

point	Transfer Function Model	R ²
B	$Y_t = \frac{(-0.032B^{25} - 0.061B^{26} - 0.025B^{27})}{1 - 0.682B} X_t + \frac{1}{1 - 1.679B - 0.687B^2} a_t$	0.997
G	$Y_t = \frac{(-0.03B^{22} - 0.048B^{23} - 0.059B^{24} - 0.069B^{25} - 0.043B^{26})}{1 - 0.714B} X_t + \frac{1}{1 - 1.645B - 0.65B^2} a_t$	0.996
K	$Y_t = \frac{(-0.068B^{26})}{1 - 1.00B} X_t + \frac{1}{1 - 1.71B + 0.72} a_t$	0.996

표2. 지점 B, G, K 의 전이함수 모델 (2003년 11월)

point	Transfer Function Model	R ²
B	$Y_t = \frac{(0.32 + 0.29B + 0.08B^2 - 0.076B^3 - 0.16B^4)}{1 - 0.992B} X_t + \frac{1}{1 - 1.42B + 0.43B^2} a_t$	0.997
G	$Y_t = \frac{(0.13B + 0.134B^2 + 0.098B^3 + 0.047B^4)}{1 - 0.99B} X_t + \frac{1}{1 - 1.47B + 0.478B^2} a_t$	0.997
K	$Y_t = \frac{(0.14 + 0.201B + 0.163B^2 + 0.065B^3)}{1 - 0.99B} X_t + \frac{1}{1 - 0.1479B - 0.48B^2} a_t$	0.996

표3. 지점 B, G, K 의 전이함수 모델 (2004년 05월)

표2와 표3을 보면 모형의 차수가 크게 차이가 있음을 볼 수 있다. 2003년 11월의 전이함수 모형의 차수는 $B^{22} - B^{27}$ 사이의 매우 높은 차수를 가진다. 이는 가을에 토양수분에 대한 유출의 반응이 매우 느리게 나타남을 보인다. 2004년 05월의 전이함수 모형의 차수는 $B^1 - B^4$ 사이의 차수로 강우시점 이후 토양수분에 대한 유출의 반응이 빠르게 나타남을 보여 준다. 또한 상, 중, 하부면의 고도의 차이를 보이는 3개의 지점에서의 전개된 모형이 유사한 차수의 다항식이 나타난다. 이는 고도의 차이는 지표면에서 10cm 깊이의 토양수분 값 변화량에 미비한 영향을 미친다는 것을 나타내며, 강우에 의한 토양수분의 충전이 상부사면으로부터의 충전효과에 비해 크다는 것을 나타낸다.

2.2.4 모형 진단

전개된 전이함수 모형이 타당한지 검증하기 위해 모형진단을 한다. 모형검진단계에서 기본적으로

로 사용되는 도구는 잔차의 자기상관함수이다. 추정된 모형이 적절하다면, 백색잡음들은 서로 독립이어야 한다.

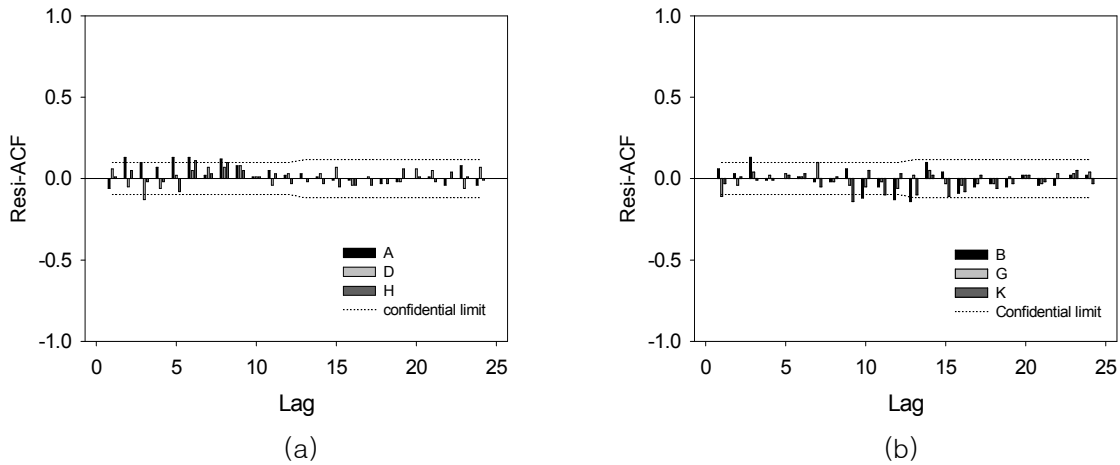


그림 3. 지점 B, G, K 잔차의 자기상관 함수 (a) 2003년 11월 과 (b) 2004년 05월
 이상적인 잔차의 자기상관계수는 “0”이 되어야 하지만, 현실적으로 불가능하다. 따라서 신뢰구간보다 적은 값을 가지면 백색잡음이라 판단하고 잔차의 독립성이 확인된다 할 수 있다. 그림. 3에서 보여주는 것과 같이 거의 모든 지점에서 잔차가 독립적임을 확인할 수 있다.

3. 결론

지표면 10cm 깊이의 토양수분의 시계열 데이터를 입력변수로, 유출데이터를 출력변수로 전개한 전이함수 모형은 지점의 고도에 따라 큰 차이점을 나타내지 않는다. 이는 지표면에서의 토양수분은 상부 사면으로부터 수분의 충전효과로 유출이 일어나는 것 보다 강우사상으로 인한 유출이 대부분을 이룬다는 것을 보여준다. 토양수분에 대한 유출의 반응은 계절적으로 뚜렷한 차이를 보여 주었다. 봄에는 토양수분에 대한 유출의 반응이 빠르며 가을에는 반응이 느리게 나타남을 알 수 있다. 이는 토양층의 식생의 영향이 토양수분에 대한 유출의 반응에 영향을 미친다는 점을 시사하며 전이함수가 산지사면의 시계열 토양수분 분석에 적절한 도구가 될 수 있음을 보여주고 있다.

감 사 의 글

본 연구는 교육인적자원부의 BK21프로그램의 지원으로 수행되었습니다. 이에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

Beven KJ., Kirkby., (1979): A physically-based variable contributing area Model of basin hydrology...,Hydrol. Sci. Bull., 24, 43-69

- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., (1976): Time series analysis Forecasting and control, revised ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Box, G. E. P., and D.R. Cox, (1964): An analysis of transformations, J. R. Stat. Soc., Ser. B, 26, 211-243.
- Lemke Karen A.(1991): Transfer Function Models of Suspended Sediment Concentration Water Resources Research 27(3). 293-305.
- Lui Lon-Mu(2006): Time Series Analysis and Forecasting Second Edition. Scientific computing associates.
- 이혜선 (2006) 토양수분 전이과정의 물리적 전개와 시계열 분석을 통한 추계학적 모형구조의 도출. 부산대학교 대학원