사면에서 지형분석을 통한 토양수분 시공간 회귀분석

송태복¹ · 김상현^{1*} · 이연길² · 정성원²

¹부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부, ²유량조사사업단
(2013년 8월 19일 접수; 2013년 9월 15일 수정; 2013년 9월 17일 수락)

Spatio-temporal Regression Analysis between Soil Moisture Measurements and Terrain Attributes at Hillslope Scale

Tae-Bok Song¹, Sang-Hyun Kim^{1*}, Yunghil Lee² and Sungwon Jung²

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan

²Hydrologic Survey Center, Ilsan, Kyongido

(Received August 19, 2013; Revised September 15, 2013; Accepted September 17, 2013)

ABSTRACT

Spatio-temporal distribution of soil moisture was studied to improve understanding of hydrological processes at hillslope scale. Using field measurements for three designated periods during the spring, summer and autumn seasons in 2010 obtained from Beomryunsa hillslope located at the Sulmachun watershed, correlation analysis was performed between soil moisture measurements and 18 different terrain attributes (e.g., curvatures and topographic index). The results of correlation analysis demonstrated distinct seasonal variation features of soil moisture in different depths with different terrain attributes and rainfall amount. The relationship between predicted flow lines and distribution of the soil moisture provided appropriate model structures and terrain indices.

Key words: Soil moisture, Hillslope hydrology, Correlation analysis, Topographic analysis, Spatio-temporal distribution

I. 서 론

토양수분의 시공간적 분포특성들은 증발산, 침투, 지하수 함량, 토양 침식을 지배하는 인자이고 식물의 생장 및 가용수자원 산정 등에 있어서 중요한 수문요소이다. 따라서, 토양수분의 정량적인 특성은 해당 지형의 식생이나 침식 정도를 결정하고, 토양의 이용과 장기적인 관리에도 영향을 준다. 특히 사면에서 나타나는 토양수분의 분포와 거동은 유역에서의 물 순환을 이해하기 위한 핵심 요소이다(Zhang and Berndtssm, 1991; Beven, 2002).

유역의 직접적인 토양수분량을 측정하는 Time Domain Reflectometry (TDR)를 이용한 토양수분의

측정은 Topp(1980)에 의해 처음 소개되었다. 이후 Carter(1993)는 실제 현장에서 TDR을 이용한 측정을 통해 point scale에서 적합한 토양수분 값을 얻어낼 수 있었고, 국내에서도 불포화된 사면에서 토양수분량의 측정 및 오염물 이동에 대한 연구가 이루어진 바가 있다(Park *et al.*, 1999).

최근 컴퓨터와 지리정보시스템(GIS)기술의 발달에 따라 지형의 공간정보가 데이터화 되고, 이것을 유역의 수문학적 분석에 적용할 수 있게 되었다. 이에 따라 GIS에서 산출되는 정보를 통해 만든 수치고도모형(DEM)을 이용하는 수문학적 공간 포화 분석 수문모형들이 개선 및 발전되어 왔다. Beven and Kirkby(1979)에 의해 지형에 의한 토양수분의 분포와 포화정

* Corresponding Author : Sang-Hyun Kim
(kimsangh@pusan.ac.kr)

도를 나타내는 지형지수($\ln(\frac{\alpha}{\tan\beta})$)가 도입되었다. 여기서 α 는 상부사면의 기여면적(contribution area)를 의미하고, $\tan\beta$ 는 국부경사를 의미한다. 만약 대상사면의 두 지점의 지형지수가 같으면 수문지형학적으로 같은 포화결핍도를 가지고 유사한 포화 거동을 보인다고 가정한다(Beven and Kirkby, 1979). 상부사면 기여면적의 계산을 위한 흐름을 산정하는 방법으로 단 방향 흐름 알고리즘인 D8알고리즘(O'Callaghan and Mark, 1984), 다 방향 알고리즘인 MD8 알고리즘(Quinn *et al.*, 1991)이 있다. 하지만 기존의 알고리즘은 계산 방향이 8방향에 한정되어 있기 때문에 이를 개선하여 MD ∞ 알고리즘(Seibert and McGlynn, 2007) 등이 개발 되었다. 또한 토양수분 추정인자로써 흐름분배 알고리즘의 적용성에 대한 연구(Lee *et al.*, 2001), 자연하천형상을 이용한 흐름분배알고리즘의 개발(Kim *et al.*, 2003) 등의 연구가 진행되었고, 격자를 기반으로 하는 흐름경로 산정 알고리즘들의 비교분석(Erskine, 2006)과 산지사면에서 토양수분 시계열 자료와 TOPMODEL가설의 연관성 평가(Kim, 2012) 등 연구가 진행되었다.

이 연구에서는 사면에서 토양수분의 분포를 실측하기 위해 2010년 경기도 파주시 설마리에 위치하고 있는 설마천 상류부 범륜사 우측사면에 토양수분 측정시스템을 설치하였다. TDR을 이용한 다중 동축 TRASE system을 현장에 설치하여 연간 토양수분 관측자료를 확보한 후 계절적인 특징을 대표하는 월별 자료를 선별하였다. 이러한 자료를 바탕으로 산지사면에서 나타나는 토양수분량의 시계열과 흐름알고리즘 분석을 통

해 토양수분의 흐름 예측을 수행하였다. 연구의 주요 목적은 토양수분에 영향을 미치는 주요인자 중 지형의 영향을 평가하기 위해 토양수분과 지형의 영향을 계절적인 변동요소의 상관관계를 파악하여 토양수분의 거동과 분포를 가장 잘 묘사하는 요소를 평가하고 선별하는 것이다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지역

연구대상지역은 임진강 수계인 설마천 유역 상류부로 경기도 파주시 적성면 설마리 범륜사 우측에 위치하고 있다. Fig. 1에서 전체연구대상 지역과 토양수분 측정현장을 보여주고 있다. 설마천 유역은 1995년부터 산지 소유역의 특성변화와 수문, 기상 등 기초자료에 대한 지속적인 관측과 자료축적을 위해 한국건설기술 연구원에서 중상류 유역을 시험유역으로 운영하고 있다. 설마리에 위치하는 영국군 전적비교를 출구로 하는 시험 유역은 37°56'15.20"N 126°57'5.15"E에 위치하고 있으며, 유역면적 8.50km², 유로연장 5.80km, 유로경사 2.3%로 전형적인 급경사 산지 사행하천이며(Korea Institute of Construction Technology, 2007), 대략적인 연평균 강우량 1,800mm, 평균기온 15°C(최근 5년)의 기후조건을 가지고 있다. 토양수분 관측시스템을 운영하고 있는 산지사면의 면적은 약 4km²이며, 평균경사는 40.5%의 급경사지이다. 사면의 전반적인 토성은 양토(loam)과 사질양토(sandy loam)로 이루어져 있다. 전체적으로 함수율은 낮고(35%-40%) 배

Fig. 1. The study area and digital terrain model.

수는 잘되는 편으로, 토양의 응집력이 낮아 매년 유실되는 토양이 많은 편에 속한다. 그러나 연구지역에 존재하는 상당한 대 공극들은 함수율과 응집력의 변동요인이 되고 있다.

2.2. 토양수분 모니터링

연구 대상지역인 설마천 범륜사 사면의 정밀한 DEM (1m×1m) 구축을 위해 Theodolite (DT-208P)을 이용해 직접 측량 하였다. 측량을 통하여 얻어진 각 좌표 정보를 좌표변환 알고리즘에 적용하여 데카르트 좌표로 변환하고 이를 통해 연구 대상사면인 범륜사 북측사면에 대한 1m 간격의 정밀 DEM을 구축하였다. 설마천 사면의 토양수분 장기 모니터링을 위한 시스템을 구축하기 위해 측량을 통해 얻어진 1m 간격 정밀 DEM을 이용하여, 흐름분배 알고리즘에 적용하여 습윤지수가 높은 흐름경로를 파악, 지점간 거리 및 토양의 깊이를 고려하여 측정지점을 선정하였다(Table 1; Fig. 2).

토양수분을 측정하는 방법은 다양하게 있지만, 본 연구에서는 안정적인 토양수분 데이터를 얻기 위해 가장 광범위하게 사용되는 TDR을 사용하여 사면의 토

Fig. 2. Monitoring points of soil moisture.

Table 1. Coordinates of soil moisture monitoring points in the study area

Point	x	y	z	Soil depth(cm)
A1	-22.09	24.06	260.43	10, 30
A2	-21.09	23.07	259.92	10, 30, 60
A3	-19.10	19.09	257.50	10, 30, 60
A4	-16.12	12.12	252.00	10, 30, 60
A5	-12.14	-0.82	241.36	10, 30
A6	-6.18	-12.76	231.49	10, 20
A6'	-7.17	-7.78	234.28	10, 30, 40
A7	2.77	-23.70	223.71	10, 30
B1	14.70	35.01	257.84	10, 30, 60
B2	14.70	32.02	256.45	10, 30
B3	13.71	28.04	254.21	10, 30, 60
B4	13.71	16.10	245.20	10, 30
B5	14.70	11.13	241.55	10, 30, 50
B6	14.70	2.17	235.42	10, 30, 60
B7	14.70	-19.72	222.39	10, 30, 60
B8	15.70	33.02	256.91	10, 30, 60
C1	6.75	-21.71	222.75	10, 30, 60
C2	4.76	-28.68	220.89	10, 30, 60
C5	6.75	-25.69	221.96	10, 30, 60
C6	6.75	-12.76	229.82	10, 30, 60

*Point A6 was added on 22th May, not included in the analysis for April

양수분을 측정하였다. 본 연구에 사용된 TDR은 토양의 함수율에 따라 달라지는 전기 펄스신호의 반향시간이 매질의 유전율에 따라 달라지는 원리를 이용한 것으로 각 함수량에 따른 유전상수를 계산하여 체적 토양수분(%)을 나타낸다. 본 연구에서는 Soil Moisture사의 Mini-Trase TDR을 이용하여 토양수분을 측정하였으며 2%이내의 오차율을 가진다. TDR은 기본적으로 1개의 탐침만을 연결하여 사용할 수 있기 때문에 다중연결장치(Multiplexer)를 이용하여 해당 지점으로 부터 토양수분량 데이터를 측정하였다. 본 연구에 사용된 토양수분 자료는 2010년 4월, 7월, 10월에 각각 1개월씩 2시간 간격으로 측정하였다.

2.3. 지형분석법

2.3.1. 지형인자

지형인자는 크게 경사(Slope)와 지표곡률(Curvature)로 나누어진다. 경사향도 태양복사량에 상당한 영향을 받으나 대상사면의 경사향은 동일함으로 분석대상에서 제외 하였다. 경사는 하경사 방향에서 고도의 변화율을 측정하는 경우에 사용되는 개념으로 중력에 의해 유도되는 물이나 다른 물체의 흐름을 뜻한다. 수문학이나 지질학에서 사용되는 지형인자로 지표면흐름과 지표하흐름의 속도, 그에 따른 토양수분량, 강우침식, 토양분포에 중요한 역할을 한다. 곡률은 지표와 평면

Table 2. Type of curvatures

Curvature	Corresponding explanation
K_p , profile curvature	- Indicator for flow acceleration - Represent flow velocity variation and deposition characteristics
K_c , contour curvature	- Indicator for flow convergence - Represent degree of flow convergence
K_t , Tangential curvature	- Indicator for topographic convergence and divergence
K_m , mean curvature	- Mean of curvatures
K , total curvature	- Indicator for surface curvature - Gradient of surface curvature not for flow line

의 교선이 만드는 곡률으로써 곡률반경의 역수이다. 곡률은 경사가 급한 지역을 큰 값으로 표시하고, 완만한 지형을 작은 값으로 표시해주며 등고선 방향으로 측정된 곡률은 볼록하거나 오목한 지표기복으로 표현해 줌으로써 흐름의 수렴과 발산지역을 표시해준다. 흐름방향으로 측정한 곡률은 흐름진행속도의 빠름과 느림에 따른 침식과 퇴적지역에 대한 지표를 제시해준다. Table 2는 곡률의 다양한 인자들을 설명하고 있고, 이러한 곡률은 대상지역의 수치고도모형(DEM)을 이용하여 계산되었다.

2.3.2. 수치지형분석

수치고도모형(DEM)에서 수치 지형도와 같은 정보는 고도 자료를 이용하여 비교적 쉽게 구축할 수 있지만 토양층의 깊이와 특성에 관계되는 정보의 획득은 쉽지 않다. 이런 이유로 유역의 지형에 따라 상관관계가 큰 자료들을 기초로 하여 토양의 특성과 지형을 표현하는 여러 인자들을 연결하는 노력을 해왔다(Kalma and Sivapalan, 1995). 토양수분의 공간적 분포를 알기 위해서 직접 측정하는 방법은 많은 시간과 비용이 소요되어 제약을 받는다. 유역에서 물의 흐름은 중력의 영향을 받기 때문에 유역의 지형이 흐름을 표현하는데 적절한 것으로 여겨지고 있다(Wolock and Price, 1994). 본 연구에서는 대표적인 다방향 흐름 알고리즘인 MD8, MD 알고리즘을 이용하여 지형지수 분석을 수행하였다(Quinn *et al.*, 1991; Seibert and McGlynn, 2007).

III. 결 과

설마천 사면의 정밀한 지형지수 산정을 위해 Theodolite를 이용해 1m 해상도로 측정한 DEM을 크리깅을 통해 0.5m 해상도의 설마천 DEM을 만든 후 다방향 흐름 알고리즘인 MD8과 MD ∞ 알고리즘으로 상부사면 기여면적(contributing areas)과 지형지수(topographic index) 산정하여 아래와 같이 결과를 Fig. 3으로 나타낼 수 있다.

Fig. 3(a)는 MD8 알고리즘을 이용해 설마천 사면에서 나타나는 상부사면 기여면적을 나타낸 결과로 흐름의 수렴과 분산을 표현하고, 실제 대상 사면의 지형에 따른 특징을 잘 나타내고 있다. 토양수분의 공간적 분포를 알기 위해서 직접 측정하는 방법은 많은 시간과 비용이 소요되어 제약을 많이 받는다. Fig. 3(b)는 MD8 알고리즘에서 나타난 지형지수으로써 토양수분의 포화정도와 분포, 즉 정적인 수분포화도를 나타내는 결과이며 수렴하는 지역에서 높은 포화도를 보이고 있다. Fig. 3(c)는 MD ∞ 알고리즘에서 나타난 상부사면 기여면적으로 Fig. 3(a)와 비교해 수렴을 더 명확히 표현하는 개선점을 보인다. 하지만 흐름선이 중간에 끊어지는 등 비현실적인 모습을 보인다. 이는 사면의 중간 부분에서 지형이 평탄해 지다가 요철이 나타나는 지형의 특징으로 인해 나타난 결과로 보인다. Fig. 3(d)는 MD ∞ 알고리즘에서 나타난 지형지수이며 Fig. 3(b)보다 상대적으로 집수구역 등이 명확하게 묘사되는 특징을 가진다.

설마천 사면을 중심으로 봄, 여름, 가을을 대표 할 수 있는 토양수분 데이터와 지형요소간의 연관성 분석을 수행하였다. 연관성 분석은 통계학적 방법과 확률론에서 두 변수 간에 선형적 관계를 분석하는 방법으로, 보편적으로 사용되는 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 사용하였다.

Fig. 4는 4월 중의 토양수분 시계열 자료와 지형과의 상관성을 분석한 자료로 두 자료간의 선형관계 시계열을 도식하였다. 토양수분 자료의 측정은 19개 지점, 50개 채널에서 이루어졌으며, 4월에는 4월 12일에서 13일 사이, 4월 21일 4월 26일에서 27일 사이에 3차례 5mm이상의 강우가 나타났다. Fig. 4(a)는 설마천 사면 10cm 깊이의 토양수분과 경사도의 상관성을 나타낸 것으로 0.5이상의 상관계수를 보여주고 있다. 강우에 민감하게 반응하여 즉각적으로 0.1-0.15 정도의 상관계수 증가가 나타난다. Fig. 4(b)는 10cm 깊이의 토양수분과 MD ∞ 알고리즘의 상부사면 기여면

Fig. 3. Spatial distributions of topographic indices.

적 사이의 상관성을 나타낸 것으로 강우에 민감한 반응을 보이거나 전체적으로 상관계수가 작다. Fig. 4(c)는 30cm 깊이에서 토양수분과 MD ∞ 지형지수간의 상관성으로 10 cm와는 달리 알고리즘의 결과가 높은 연관성을 가지며, 4월 초반에는 0.4정도로 상대적으로 낮은 상관계수를 보이지만, 점진적인 토양수분량 증가로 인해 상관계수가 꾸준히 상승을 한다. 반대로 Fig. 4(d)의 총 구배와의 상관성에서는 토양수분과의 연관성을 거의 보이지 않지만, 강우의 영향을 받아 상관계수가 점진적으로 증가하는 현상을 보인다. Fig. 4(e)는 60cm 깊이의 토양수분과 MD8 알고리즘 지형지수와의 상관성으로 월 초에는 겨울철 건조한 환경의 연장

으로 상관성이 거의 없다가 지속적인 강우로 인해 상관계수가 증가하였다. 60cm 깊이의 토양수분과 총 구배의 상관성을 나타낸 Fig. 4(f)는 한 달 내내 거의 상관성이 나타나도 있지만 월말에 20mm이상의 강우가 있어 그 영향으로 상관관계가 급격하게 증가하는 현상을 보였다. 이러한 전체적인 경향은 아직 안정되지 않은 지형에서 토양수분의 분포 및 거동을 예측하기 위한 인자로써 경사도나 곡률의 반응특성이 중요함을 나타낸다. 또한 봄철 적은양의 강우에서 나타나는 교란에 대해서도 적용 가능성을 보여준다.

Fig. 5는 여름과 장마철의 토양수분 분포를 잘 나타낼 수 있는 7월과 지형사이의 상관관계를 나타내고

Fig. 4. Time series of correlation coefficient between the spatial distribution of soil moisture collected during April 2010 and diverse topographic characteristics.

있다. 장마철의 잦은 강우로 인해 토양수분량이 급격하게 변동하기 때문에 상관계수의 변화가 큰 편이다. 하지만 30cm이상의 토심에서는 유역전체를 습윤한 조건으로 가정하는 알고리즘들의 특징으로 인해 강우를 전후하여 MD8, MD ∞ 알고리즘과의 상대적으로 높은 상관관계를 나타냈다. 7월 2일부터 3일, 7월 16일부터 18일, 7월 20일, 21일, 23일 사이에 10mm이상의 강우가 나타나 지형과의 상관관계에 영향을 주었다.

30cm 깊이의 토양수분과 MD ∞ 알고리즘 지형지수와 상관성을 나타낸 Fig. 5(a)에서는 강우에 의해 교란이 발생하기는 하지만 7월 16일 강우를 전후해 높은 상관계수를 보여 뚜렷한 선형관계를 나타내고 있다. 이는 Fig. 5(c)의 60cm 깊이와 MD ∞ 알고리즘 상부 사면 기여면적과 비슷한 결과로서 장마철 토양수분의 분포와 거동 예측에 유의성이 있음을 보여준다. 하지만 Fig. 5(b)의 30cm 토양수분과 경사도, Fig. 5(d)

Fig. 5. Time series of correlation coefficient between the spatial distribution of soil moisture collected during July 2010 and diverse topographic characteristics.

의 60cm 토양수분과 총 구배간의 비교적 낮은 상관관계를 보였다.

Fig. 6은 10월의 토양수분 시계열 자료와 지형사이의 상관관계를 보여주는 그림으로 토양구조 및 배수가 안정된 영향으로 전체적으로 높은 상관관계를 보여준다. Fig. 6(a)는 10cm 깊이의 토양수분과 MD8 알고리즘의 지형지수와와의 상관성으로 강우로 인해 약간의 상관계수의 상승이 있었으나 지속적으로 토양수분의 공급이 되지 않는 못해, 10월 내내 0.1정도의 점진적인 상관계수의 상승이 나타났다. 반대로 총 구배와의 상관성을 나타내는 Fig. 6(b)는 0 안팎의 낮은 상관계수를 보여, 선형관계가 없음을 보여 주고 있다. Fig. 6(c)는 30cm 깊이의 토양수분과 MD ∞ 알고리즘의 지형지수의 상관관계를 나타낸 것으로 상관성이 점차 증가해 0.7정도의 높은 상관계수를 나타내고 있다. 이는 사면에서 안정된 토양구조를 통해 상부사면에서 토양수분이 지속적으로 유입됨을 나타내고 있다. 하지만 Fig. 6(d)와 같이 지부적인 인자를 보여주는 경사도에서는 0.35-0.4정도의 비교적 낮은 상관계수를 나타내

고 있다. 또한 60cm 깊이의 토양수분과 MD8 알고리즘 지형지수의 상관관계를 나타낸 Fig. 6(e)도 꾸준히 상관성이 증가하는 모습을 보이지만, 지표하 경사도와와의 상관관계는 오히려 꾸준히 낮아지는 양상을 보이고 있다. 이러한 경향은 안정된 사면에서 흐름 알고리즘의 적용가능성을 보여주고 있어, 가을철 지속적인 강우가 발생하지 않더라도 사면에서 나타나는 토양수분의 분포와 거동을 추측할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

이 연구에서는 수문모형에 영향을 주는 지형인자의 특성과 수치지형분석 방법에 대해 살펴보고, 설마천 사면의 적용하여 실측한 토양수분량 값과 비교 및 연관성 분석을 통해 실제 사면에 적용 가능성과 모사에 적절한 지형인자에 대해서 평가 하였다. 분석결과 MD8 알고리즘과 같은 다방향 흐름 알고리즘이 사면의 발달과 분배를 잘 모사하는 것에 비해 MD ∞ 알고리즘은 수렴의 모사까지도 가능한 장점을 나타냈다.

Fig. 6. Time series of correlation coefficient between the spatial distribution of soil moisture collected during October 2010 and diverse topographic characteristics.

하지만 MD8 알고리즘은 비정상적인 정도의 많은 분산을 나타내는 만큼 토양수분의 분포 파악에는 유의하나 흐름선의 섬세한 묘사에는 어려우며, MD ∞ 알고리즘은 상부사면 기여면적 파악 및 흐름량 산정은 잘 되는 편이나 요철이 있는 경우 흐름선 차단 등의 비현실적 묘사가 나타남을 보여준다.

수치지형분석을 이용하여 상부 사면 기여면적과 지형지수를 모의한 결과 토양수분 분포예측은 30cm 이

상의 깊이에서, 계절적으로 가을에 가장 높은 연관성의 결과를 얻을 수 있었다. 전체적인 토양수분의 흐름을 산정하는 흐름알고리즘의 특징을 잘 보여주고 있으며, 강우사상이 있는 후에도 상부에서 하부로 지속적인 토양수분의 거동이 발생하였고, 일정 정도의 토양수분의 유지가 되었음을 예측할 수 있다. 특히 계절별로 강우사상과 토양구조, 식생 등에 의해 토양수분의 거동이 달라진다는 점을 보여주고 있다. 지형

요소를 이용한 수문모형 분석은 전반적으로는 결과가 저조한 편이나 봄(4월)의 10cm와 가을의 30, 60cm에서 토양수분과 비교적 높은 연관성을 보여준다. 이는 경사도와 곡률과 같은 지형인자들은 국부지적인 인자로서 전체적인 토양수분의 거동을 파악하기 보다는 특정 지점의 토양수분량을 인지하는 특성임을 나타낸다. 강우에 의해 순간적으로 증가 폭이 큰 경향을 나타내는 점에서 토양수분의 공간적 분포는 지형요소의 영향을 받기는 하지만, 시간이 경과함에 따라 지점별로 평형상태를 유지하려는 특성이 있음을 보여준다.

본 연구에서는 산지사면에서의 토양수분의 시공간적 변화양상을 특성화하였으며, 토양수분 분포 및 거동의 예측을 위한 모델과 지형요소에 대한 적용가능성을 검토하였다. 사면 유출의 기작을 더욱 명확하게 규명하기 위해서는 토양수분량과 인자간의 인과관계를 나타낼 수 있는 추가적인 자료의 분석이 필요하다.

적 요

이 논문에서는 산지사면에서 나타나는 수문과정의 이해를 증진하기 위해서 관측된 토양수분의 분포와 거동을 수치지형분석을 통한 지형요소와의 상관관계를 연구하였다. 계절에 따른 강우 및 토양구조의 차이가 영향을 주는 사면 깊이 별 토양수분의 변동을 상관성 분석을 통해 도출하였다. 경기도 파주시 설마천 유역에 위치하고 있는 사면에서 봄, 여름, 가을 등 각 3계절을 대상으로 4월, 7월, 10월 기간의 토양수분 시계열 관측 자료를 사용하여, 지표면과 기반암의 표고모형을 사용하여 다방향 흐름 알고리즘과 경사도, 곡률 등 18개 요소와의 상관관계를 분석하였다. 도출된 지형과 토양수분의 상관관계는 계절별로 강우의 양상과 토양 깊이에 따라 상이한 양상을 보여 주고 있다. 이러한 상관관계를 통해 사면에서 토양수분의 분포 및 흐름선을 예측하여 공간적인 분석을 도모하고, 토양수분의 거동을 가장 적합하게 묘사하는 모형과 지형요소를 평가하고 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 유량조사사업단의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- Beven, K. J., and M. J. Kirkby, 1979: A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* **24**(1), 43-69. doi:10.1080/02626667909491834
- Beven, K., 2002: Towards a coherent philosophy for environmental modelling. *Proceedings of the Royal Society of London A* **458**(2026), 2465-2484. doi: 10.1098/rspa.2002.0986
- Carter, M. R., 1993: *Soil water content. Soil sampling & methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers. 541-557.
- Erskine, R. H., T. R. Green, J. A. Ramirez, and L. H. MacDonald, 2006: Comparison of grid-based algorithms for computing upslope contributing area. *Water Resources Research* **42**(9), WR004648. doi: 10.1029/2005WR004648
- Kalma, J. D., and M. Sivapalan, 1995: *Scale issues in Hydrological modelling*. Wiley & Sons 1-8.
- Kim, S. H., J. Y. Han, G. Y. Lee, and N. W. Kim, 2003: The analysis of drainage time and resolution of the quasi-dynamic and dynamic wetness index. *Journal of Korea Water Resources Association* **36**(6), 949-960.
- Kim, S., 2012: Characterization of annual soil moisture response pattern on a hillslope in Bongsunsa Watershed, South Korea. *Journal of Hydrology* **448-449**, 100-111
- Korea Institute of Construction Technology, 2007: *Operation and research on the hydrological characteristics of the experimental catchment*. Korea Institute of Construction Technology.
- Lee, H. S., K. H. Kim, J. Y. Han, and S. H. Kim, 2001: Prediction of soil distribution using digital terrain indices. *Journal of Korea Water Resources Association* **34**(4), 391-401.
- O'Callaghan, J. F., and D. M. Mark. 1984: The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **28**(3), 323-344.
- Park, J. H., I. W. Seo, and J. H. Sonu, 1999: Study on characteristics of transient solute transport in the Vadose Zone by using TDR: (1) relationship between water content and relative electrical conductivity. *Journal of Korea Water Resources Association* **32**(6), 741-749.
- Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon, 1991: The prediction of hillslope flow paths for distributed modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes* **5**(1), 59-80. doi: 10.1002/hyp.3360050106
- Seibert, J., and B. L. McGlynn, 2007: A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research* **43**(4), WR04501. doi: 10.1029/2006WR005128
- Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan, 1980: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*

- 16**(3), 574-582. doi: 10.1029/WR016i003p00574
- Wolock, D. M., and C. V. Price, 1994: Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography based watershed model. *Water Resources Research* **30**(11), 3041-3052. doi: 10.1029/94WR01971
- Zhang, T., and R. Berndtsson, 1991: Analysis of soil water dynamics in time and space by use of pattern recognition. *Water Resources Research* **27**(7), 1623-1636. doi: 10.1029/91WR00436