

ORIGINAL ARTICLE

분포형 FLO-2D 수문모형에서 초기토양함수가 유출결과에 미치는 영향

이길하*

대구대학교 토목공학과

Impacts of Initial Soil Moisture on Hydrologic Outflow in a Distributed FLO-2D Model

Lee, Khil-Ha*

Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Abstract

Soil water enters the atmosphere via evapotranspiration, where it transforms into atmospheric water vapor and plays important role in the surface-atmosphere energy exchange. Soil conditions have a direct influence on the effective rainfall, and initial soil moisture conditions are important for quantitatively evaluating the effective rainfall in a watershed. To examine the sensitivity of the initial saturation to hydrologic outflow, a two-dimensional distributed FLO-2D hydrologic model was applied to a small watershed. The initial saturation was set to 0.3, 0.5, and 0.7 and the obtained results were compared. The Green-ampt model was chosen to calculate the penetration loss. Depending on the initial soil moisture, the peak flow rate varied by up to 60%, and the total water volume in the watershed by approximately 40%.

Key words : Soil moisture, FLO-2D, Rainfall

1. 서론

일반적으로 높은 토양수분은 지표면 토양과 대기 온도를 낮추고 대기 중에 높은 습도로 이어져 낮은 적운층(cumulus cloud)과 높은 대류성 위치에너지를 형성한다(Zhou and Geerts, 2013). 토양수분은 잠열(latent heat flux)과 현열(sensible heat flux)을 통한 상호작용으로 지표면-대기의 물과 에너지 순환을 조절하는 역할을 한다. 지표면에서 대기로 유입된 토양 수분은 구름의 형성

에 기여하고 주변 환경의 온도와 강우변화에 영향을 미친다(Sun and Bosilovich, 1996; Holt et al., 2006).

따라서 토양 수분은 물순환 과정을 통한 수문 예측의 결과에 중요하기 때문에 수치수문모형에서 토양 수분의 초기화는 핵심적인 역할을 한다. 이와 같은 맥락으로 토양 수분과 연결되는 표면 온도와 대기 수증기의 변화를 통한 수치모형의 예측 능력을 향상시키기 위하여 기상모형과 수문모형에서는 다양한 연구가 행하여 졌다(Chen and Dudhia, 2001; LeMone et al., 2007; Hong et al.,

Received 12 March, 2021; Revised 7 April, 2021;

Accepted 24 April, 2021

*Corresponding author: Khil-Ha Lee, Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea
Phone : +82-53-850-6522
E-mail : khil_ha@yahoo.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2009; Seneviratne et al., 2010; Santanello et al., 2011; Trier et al., 2011; Yang et al., 2011; Husain et al., 2014; Zhang et al., 2020).

미국 콜로라도 볼더시(Boulder, Colorado)에 있는 국립 대기 연구센터 (National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서는 수치모형의 정확도를 향상시킬 목적으로 고해상도 데이터 동화 시스템(4-dimensional data assimilation, 4DDA)을 적용하여 토양습수 초기화 개선사업인 HRLDAS (high-resolution data assimilation system)를 실행하였다(Hong et al., 2009; Dy and Fung, 2016). 이들은 모형 적용 시 토양습수의 초기화 방법에 따라 지표면에서 건조되는 과정에서 토양 수분이 대기 중의 에너지 분할과정에 눈에 띄는 변화를 일으킬 수 있음을 강조하였으며, 토양습수의 부적절한 초기화는 표면 근처 온도 및 습도 예측 오류를 유발함으로써 지표면 환경에 영향을 미친다는 사실을 강조하였다.

초기 토양습수 조건은 유역에서의 제한적이고 정량적인 유효우량을 결정하는데 있어 수치모형의 초기에 매우 결정적 역할을 함으로써 초과 유량을 예측하는데 직접적인 관여를 한다. 따라서 토양습수 초기화 결정은 공학, 농학, 기상, 환경 분야의 수자원 분석과 홍수 분석을 위한 수치모형을 운용할 시 주의를 기울여야 하는 중요한 요소이다. 현재 국내에서는 수문모형을 통한 유량 예측에서 토양습수 초기화는 큰 주목을 받지 못하고 있는 실정이다. 실무에서 토양습수 초기화는 사용자의 주관적 또는 경험적 판단에 의하여 좌우된다. 특히 홍수분석에서 강우손실모형이 SCS-CN보다 상대적으로 물리적 근거를 많이 가진 Green-ampt, Philip 같은 모형이 사용될 경우 토양습수 초기화의 파급 효과는 결과에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 이 연구에서는 홍수 분석을 실시하면서 강우 손실 모형으로 Green-ampt모형을 사용할 경우 초기 토양습수가 결과에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 이는 현장에서 실무에 종사하는 많은 공학도들에게는 초기 토양습수의 중요함을 강조함으로써 홍수 분석의 정확도를 높일 수 있는 근거를 제공하고, 정부기관 또는 연구기관에서는 현장에서 실무자들이 필요로 하는 초기 토양습수 자료를 사전에 구축하는 사업에 관심을 기울이는 시발점이 될 것을 기대한다.

2. 연구 지역과 수치모형

2.1. 연구 지역



Fig. 1. Cheong-mi watershed and channel network 1.

Fig. 1과 같이 청미천 유역(Cheong-mi watershed)은 유역 면적이 약 590 km²이다. 청미천 유역의 중심은 동경 127.52°E, 위도 37.67°N으로 서울에서 남쪽으로 약 70 km 떨어진 곳에 위치한다. 청미천 유역의 해발고도는 약 50 ~ 650 m의 범위에 걸쳐 분포하며, 연평균 기온과 습도는 각각 약 11.5 °C, 66.7%이다. 연평균 강수량은 1184 mm로 전국 평균 인 1310 mm보다 미미하게 낮다(MOLIT, 2009). 강우 입력 자료는 청미천 유역에서 관측한 6개의 우량계 자료를 바탕으로 하여 유역 하천의 유속과 수위를 모의하도록 설정하였다. 점(point) 강우 값에 분포형 면적(area) 개념을 도입하기 위해 티센모형(Thiessen polygon)을 사용하여 다각형 면적 강우를 구하였다. 강우량은 각 다각형 내에서 일정한 것으로 간주되지만 유역 전체에 걸쳐 공간 분포를 제공하기 위해 각 다각형은 고유의 값을 배정한다. 모의 결과를 비교하기 위하여 사용된 유량은 청미천 하류 지점인 장호원 지점에서 수집된 자료를 활용하였다.

본 연구에는 기상청에서 수집한 5 일간의 강우자료를 사용하였다. 수치고도지도에서 등고선과 하천 채널은 수치화하고 2차원 배열 형태로 표현하여 선형 보간하였다. Landsat ETM + 반사율 데이터를 기반으로 토지 피복도를

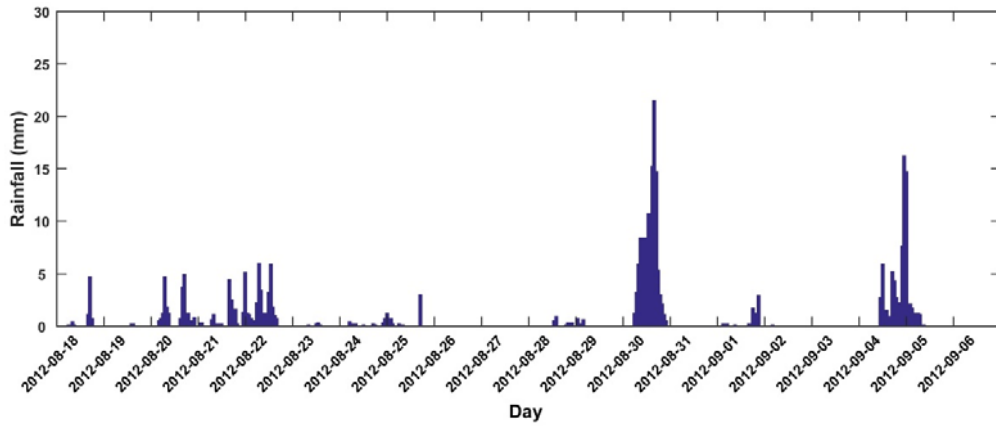


Fig. 2. A Time series of rainfall event in Cheong-mi watershed.

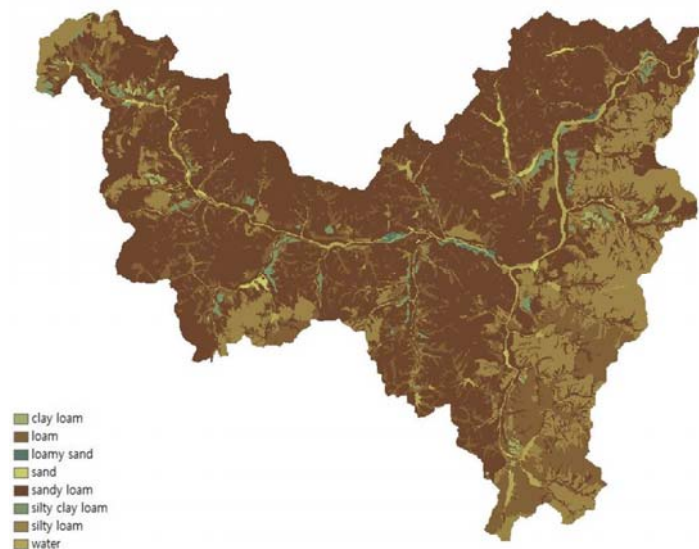


Fig. 3. Distribution of soil texture in Cheong-mi watershed.

구성한 후 기존 문헌에서 제시한 식생 매개 변수의 조도 계수를 토지 피복 유형에 할당하였다(Engman, 1986; Vieux et al., 2004). 청미천 유역은 약 33.2%의 면적이 상록수와 활엽수가 혼합된 산림으로 구성되어 있으며, 나머지는 논 23.8%, 경작지 14.7%로 구성되어 있다.

토양도(soil texture)는 지표면의 침투 특성을 나타내기 위해 사용되는데 한국 농촌진흥청에서 추출한 자료를 활용하였다. Fig. 3에서 청미천 유역은 배수가 잘되는

사질토 59.4%, 진토 17.8%, 점토 17.2%, 기타 5.6%이다. 기존 문헌의 제시에 따라 매개변수화 하여 침투 특성을 표현하였다(MOLIT, 2012; FLO-2D Software Inc., 2017).

2.2. 수문모형

기상자료를 입력자료로 배정하고 지표면 특성 자료를 보조자료로 배정한 후 유역과 하천에서 체적을 보존하면서 홍수 유출을 추적하는 2차원 FLO-2D (FLO-2D

Software, Inc., 2017)모형을 사용하여 수치모의 하였다. FLO-2D는 유역과 하천 흐름에서는 일련의 격자를 통해서 홍수량을 이동하는 단순한 체적 보존 홍수 추적 모형이다. 운동량방정식을 기반으로 하는 FLO-2D의 침투과정은 Green-ampt, SCS-CN, Horton 방정식 등이 있어 선택적으로 사용할 수 있다(FLO-2D Software, Inc., 2017). 흐름에 대한 지배 방정식은 다음과 같다(FLO-2D Software, Inc., 2017).

$$\partial h/\partial t + \partial h V/\partial x = R - I \quad (1)$$

$$S_f = S_o - \partial h/\partial x - V \partial V/g \partial x - \partial V/g \partial t \quad (2)$$

여기서 h 는 수위, V 는 깊이 평균 속도, R 은 강우, I 는 침투율이다. 좌측항의 S_f 는 매닝방정식에 근거한 마찰 경사, 우측항은 바닥 경사 S_o 를 각각 나타내며, 각 항은 대류(convective) 가속도와 국지(local) 가속도를 포함하고 있다.

3. 연구 방법

2차원 분포형 수문모형의 경우 강우가 토양에 침투하는 수직 방향의 흐름은 격자 내에서 매개변수를 통하여 양과 속도를 조절한다. 초기 포화는 강우가 지표면에 도달하고 지하로 침투되는 과정에서 모의가 시작하기 이전의 강우 발생에 대한 이력을 반영하므로 강우 손실을 제외한 유효강우를 산정함에 있어 중요한 역할을 한다.

2차원 분포형 수문모형인 FLO-2D에서 강우손실 추정 방법으로 침투 손실을 직접 계산하는 Green-Ampt모형을 선택하였다. 초기 포화도의 민감성을 살펴보기 위하여 각기 다른 3가지 초기 포화도 즉, 0.3, 0.5, 0.7을 차례로 설정하여 적용하였다. 앞서 언급한 정밀도양도를 바탕으로 FLO-2D 매뉴얼에서 추천한 대로 각 격자 별로 투수계수(hydraulic conductivity), 흡인수두(suction pressure)를 배정하였다(Hopmans and Simunek, 1999). 침투량은 격자 별로 배정된 매개변수를 바탕으로 각 격자 별로 계산하는 모자이크법(Mosaic method)을 사용하였다(Hwang et al., 2020).

세 가지의 다른 초기 포화도 시나리오가 적용되는 동안 강우와 지표면 특성을 표현하는 매개변수는 고정하여 초기 포화도 이외의 영향은 배제하였다. 시간 변화에 따

른 유량의 추이, 유역 전체 총부피, 침투유량 도달시간 등의 기본적인 수문 요소를 모의 결과로 하여 관측값과 상대 비교함으로써 각 시나리오의 정확성을 판단하였다.

4. 결과 및 고찰

수치모의 결과의 정확성과 신뢰성을 확인하는 가장 이상적인 방법은 현장 관측값과 비교하는 것이다. 그러나 현실적으로 모의에 필요한 기상자료, 지표면 토양 함수 관측자료를 얻기가 힘들뿐 아니라 연구 대상지역과 기간이 일치하는 자료 세트를 얻기는 더 어렵다. 그러나 이 연구는 결과의 정확성을 확인하기 보다는 토양함수가 유출결과에 미치는 민감도의 폭이 크다는 것을 확인함으로써 실무에 종사하는 공학도들이 주의를 기울이고 초기 토양함수 자료를 제공할 수 있는 시스템을 구축하는 것이 중요하다는 인식을 심어주는 것이므로 상대적인 비교 우위를 판별하는 것만으로 충분할 것이다.

청미천 유역을 대상으로 2012년 8월 28일부터 2012년 9월 1일 동안 5일간의 우기에 세 개의 다른 초기 토양 함수에 대한 유출결과를 상대 비교하기 위하여 FLO-2D를 모의하였다. 초기 토양함수는 모의 기간 이전에 발생한 강우 사상에 의하여 지배된다. 그림2에서 보듯이 수치 모의를 시작하는 시점에서 약 6일 전까지 연속된 강우가 발생하였다. 이후 강우강도는 작아도 계속해서 강우가 발생하여 모의 시작 시점에서 약 2일 전까지 대상지역에 강우가 발생하였음을 알 수 있다. 대상 유역은 사질토가 가장 많은 부분을 차지하는 것을 감안하더라도 모의 초기의 토양함수 포화도가 낮지 않음을 논리적으로 추정할 수 있다.

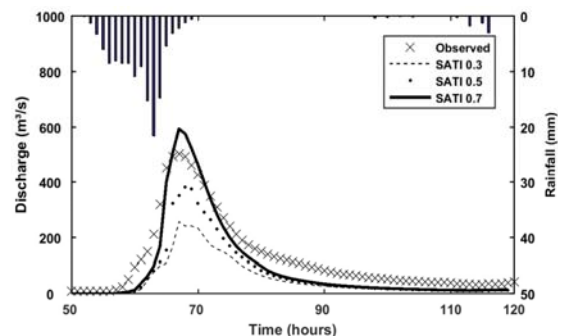


Fig. 4. Simulated versus observed for the three scenarios.

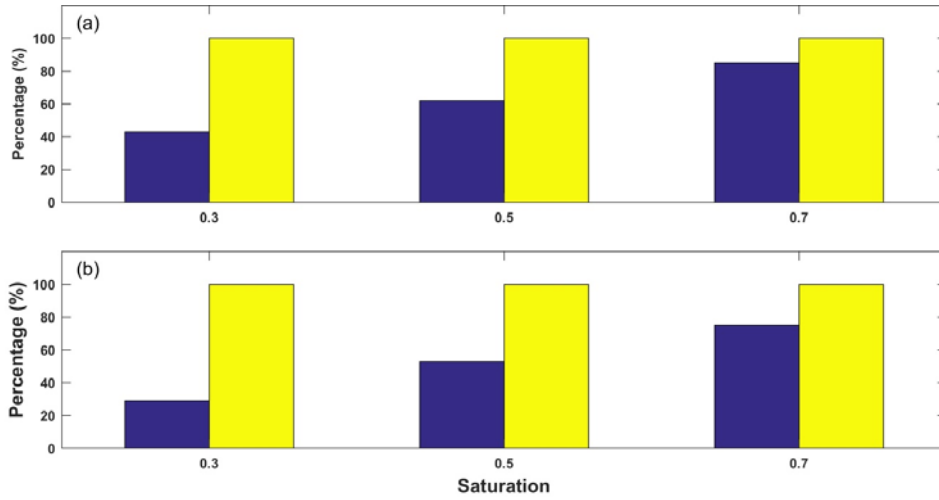


Fig. 5. Relative comparison of total water volume. (a) mosaic approach, (b) predominant approach.

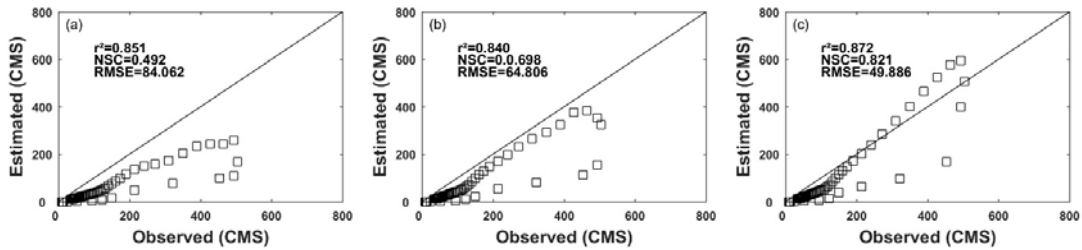


Fig. 6. A Scatterplot of simulated versus observed.

Fig. 4는 모의 결과를 보여준다. 전반적으로 관측값과 비교한 모의 결과는 시간에 따른 유량 변화의 추이를 잘 재생하는 것으로 보인다. 예상한 대로 시나리오에 따라 설정된 초기 토양 함수는 가시적으로도 확연한 차이를 보인다. 강우가 시작하고 약 2~3시간에 유출이 발생하기 시작하다가 약 15시간이 지나면 침투유량에 다다른다. 포화도가 0.7인 경우에 포화도가 0.3인 경우보다 침투 손실이 작아 유량이 가파르게 증가하면서 침투유량에 이른다. 각각의 경우에 침투 손실량에서 확연한 차이를 보이고 침투유량이 크게는 약 60%의 차이를 보인다. 세 개의 서로 다른 시나리오에 따라 침투유량에 도달하는 시간은 크게 차이를 보이지 않는다. 유출이 발생하는 상승부 초기부분과 하강기 말기부분에서는 모의값이 관측값을 과소평가하는 경향을 보인다.

Fig. 5는 세 개의 다른 시나리오에 따라 도출된 유량 곡선을 바탕으로 수치적분을 수행하여 유역의 총수량(총 부피)으로 계산하여 관측값과 비교한 것이다. Fig 5(a)는 분포형 모형의 각 격자별로 토양도를 배정하여 계산하는 mosaic방법이며, Fig 5(b)는 지배적인 대표토양도를 단일값으로 배정하는 predominant 방법이다 (Hwang et al, 2020). 초기 토양함수가 0.3인 경우 침투로 인한 손실이 과다하게 발생함으로써 총수량의 오차가 50%에 이른다. 초기토양함수가 0.7인 경우 총수량이 관측값에 상대적으로 근접함을 보여주나 여전히 과소평가한다는 것을 알 수 있다. Predominant에서는 대상 유역의 대표 토양도가 침투력이 강한 A형 토양군이므로 mosaic보다 전반적으로 유출량이 적게 나타났다.

Fig. 6는 세 가지 시나리오에 대한 모의결과를 산포도로

나타낸 것이다. 초기 토양함수가 0.7인 경우 결정계수가 0.872, NSC가 0.821, RMSE가 약 $50 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 초기 토양함수가 0.3, 0.5인 경우보다 상대적인 비교우위를 보인다. 하강부에서의 사소한 불일치를 제외하면 0.7인 경우 모의 결과가 관측값에 가장 가깝다는 것을 알 수 있다. 앞서 언급하였듯이 모의 시작점에서 약 10일 전에 청미천 유역에 강우가 발생한 이후 미량으로 연속해서 강우 사상이 발생하였다는 감안하면 상당히 논리적인 결과임을 알 수 있다.

토양함수는 증발산 과정을 통하여 대기 중으로 유입된다. 다시 대기 중의 수증기로 변하여 대기와 지표면의 에너지 교환에 있어 중요한 역할을 한다. 토양함수가 대기 중으로 증발산하는 과정에서 지표면의 열과 복사 에너지를 대기로 이동시키는 역할을 하고 이는 에너지 균형에서 잠열(latent heat flux)의 비중을 크게 만든다. 대기 중의 수증기 함유량이 크면 지표면으로부터 발생하는 장파(longwave radiation)를 더 많이 흡수하고 수증기로부터 지표면으로 향하는 장파를 증가하는 효과를 가져와 결국은 온실효과를 가중시킨다. 토양함수가 온실효과에 영향을 크게 미친다는 것을 의미한다. 따라서 토양함수는 수문모의에서 보이지는 않지만 대기와 지표면의 에너지 균형에 직접적으로 영향을 미쳐 물순환 과정에 깊숙하게 관여하므로 수문모의에서 정확하고 신뢰성 있는 자료 설정을 하는 것이 바람직하다

5. 결론

2차원 분포형 FLO-2D 수문모형을 이용하여 초기포화도의 설정이 유출결과에 미치는 민감성을 살펴보기 위하여 초기 포화도를 0.3, 0.5, 0.7로 차례로 설정하여 모의하였다. 침투 손실을 계산하기 위하여 Green-ampt모형을 선택하였다. 초기 토양함수의 설정에 따라 침투 유량이 크게는 약 60%의 차이를 보이며, 유역의 총수량은 약 50%의 차이를 보인다. 이는 초기토양함수의 설정이 유출모의 결과에 결정적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 암시한다.

그러나 수문모형의 운용 시 현장에서는 토양함수의 중요함에 대한 인식이 부족하고 실무자의 주관적 판단 또는 추측에 의존하는 경우가 많다. 신뢰성과 물리적 근거에 기초한 초기 토양함수 자료를 찾기도 어렵다. 현장

실무자들이 시기와 장소를 가리지 않고 토양함수 관측 자료를 활용할 수 있다면 이상적일 것이다. 그러나 비용과 시간을 감당할 수 없으므로 대안이 필요하다. 국지형 기후모형(regional-scale atmospheric model) 수치모의 자료를 통하여 실시간으로 얻은 토양함수 자료를 시간과 격자 크기에 맞게 2차로 처리하여 현장 실무자들이 즉시 활용할 수 있도록 구조화와 체계화하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2020학년도 대구대학교 학술연구비지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- Chen, F., Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land-surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity, *Wea. Rev.*, 129, 569-585.
- Dy, C. Y., Fung, J. C. H., 2016, Updated global soil map for the weather research and forecasting model and soil moisture initialization for the Noah land surface model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 8777-8800.
- Engman, E. T., 1986, Roughness coefficient for routing surface runoff, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 112, 39-53.
- FLO-2D Software Inc., 2017, FLO-2D reference manual, 16, FLO-2D Software Inc., 1-5.
- Holt, T. R., Niyogi, D., Chen, F., Manning, K., LeMone, M. A., Qureshi, A., 2006, Effect of land-atmosphere interactions on the IHOP 24-25 May 2002 convection case, *Weather. Rev.*, 134, 113-133.
- Hong, S. B., Lakshmi, V., Small, E. E., Chen, F., Tewari, M., Manning, K. W., 2009, Effects of vegetation and soil moisture on the simulated land surface processes from the coupled WRF/Noah model, *J. Geophys. Res.*, 114, D18118.
- Hopmans, J. W., Simunek, J., 1999, Review of inverse estimation of soil hydraulic properties, in: van Genuchten, M. Th., Leij, F. J., Wu, L.(eds.), *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media: Part 1*, University of California, Riverside, California, 643-659.
- Husain, S. Z., Bélair, S., Leroyer, S., 2014, Influence of soil moisture on urban microclimate and surface-layer

- meteorology in Oklahoma City, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 53, 83-98.
- Hwang, J., Lee, H., Lee, K., 2020, Effects of Nonhomogeneous Soil Characteristics on the Hydrologic Response: A Case Study, *Water*, 12, 2416.
- LeMone, M. A., Chen, F., Alfieri, J. G., Tewari, M., Geerts, B., Miao, Q., Grossman, R. L., Coulter, R. L., 2007, Influence of land cover and soil moisture on the horizontal distribution of sensible and latent heat fluxes in southeast Kansas during IHOP_2002 and CASES-97, *J. Hydrometeorol.*, 8, 68-87.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2009, Field survey report 2008: Hangang discharge, Seoul, S. Korea.
- Santanello, J. A., Peters-Lidard, C. D., Kumar, S. V., 2011, Diagnosing the sensitivity of local land - atmosphere coupling via the soil moisture-boundary layer interaction, *J. Hydrometeorol.*, 12, 766-786.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E., Lehner, I., Orlowsky, B., Teuling, A. J., 2020, Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review, *Earth-Sci. Rev.*, 99, 125-161.
- Sun, W. Y., Bosilovich, M. G., 1996, Planetary boundary layer and surface layer sensitivity to land surface parameters, *Bound.-Layer Meteorol.*, 77, 353-378.
- Trier, S. B., LeMone, M. A., Chen, F., Manning, K. W., 2011, Effects of surface heat and moisture exchange on ARW-WRF warm-season precipitation forecasts over the central United States, *Wea. Forecasting*, 26, 3-25.
- Vieux, B. E., Cui, Z. T., Caur, A., 2004, Evaluation of a physio-based distributed hydrologic model for flood forecasting, *Journal of Hydrology*, 298, 155-177.
- Yang, Y., Uddstrom, M., Revell, M., Andrews, P., Oliver, H., Turner, R., Carey-Smith, T., 2011, Numerical simulations of effects of soil moisture and modification by mountains over New Zealand in summer, *Mon. Weather Rev.*, 139, 494-510.
- Zhang, H., Liu, J., Li, H., Meng, X., Ablikim, A., 2020, The Impacts of Soil Moistur Initialization on the Forecasts of Weather Research and Forecasting Model: A Case Study in Xinjiang, China, *Water*, 12, 1892.
- Zhou, X., Geerts, B., 2013, The influence of soil moisture on the planetary boundary layer and on cumulus convection over an isolated mountain. Part I: Observations, *Mon. Weather Rev.*, 141, 1061-1078.

• Professor. Khil-Ha Lee
Department of Civil Engineering, Daegu University
khil_ha@yahoo.com