

내성천 유역의 강우-유출-토양침식-유사이송 모의를 위한 분포형 모형의 민감도 분석 및 매개변수 평가

Sensitivity Analysis and Parameter Evaluation of a Distributed Model for Rainfall- Runoff-Soil Erosion-Sediment Transport Modeling in the Naesung Stream Watershed

정 원 준* / 지 윤**

Jeong, Won Jun / Ji, Un

Abstract

The distributed watershed model of rainfall-runoff-soil erosion-sediment transport was constructed for the Naesung Stream Watershed with high potentiality and risk of sediments produced by soil erosion. The sensitivity analyses of roughness coefficient and hydraulic conductivity which affected the modeling results of runoff and sediment concentration were performed in this study. As a result, the change of the roughness coefficient for the forest area from 0.4 to 0.45 did not affect the change in runoff and stream discharge and the average value and range of sediment concentration were also insignificantly increased with few difference. As a result of the sensitivity analysis of the hydraulic conductivity, the total amount of runoff and maximum runoff were gradually increased as the hydraulic conductivity was reduced. In the case of sediment concentration modeling, the average and the range of sediment concentration for all stations were increased as the hydraulic conductivity was decreased. For the Hyangseok Station, in case of the hydraulic conductivity reduced by 50%, the simulation result of sediment concentration was most similar to the estimated value by the sediment rating curve.

keywords : hydraulic conductivity, roughness coefficient, sediment transport, sensitivity analysis, soil erosion, watershed model

요 지

유사발생 잠재성 및 토양침식으로 인한 유사발생 위험성이 높은 것으로 평가된 내성천유역을 대상으로 강우-유출-토양침식-유사이송으로 이어지는 유역단위의 분포형 모형을 구축하였으며 유출과 유사농도 모의 결과에 주요한 영향을 미치는 조도계수 및 투수계수의 민감도 분석을 실시하였다. 모의 결과, 내성천유역의 토지 피복이 숲인 지역의 조도계수를 0.4에서 0.45로 변경하여 지표수 유출 유속을 감소시켰으로써 향석 지점에서의 유출곡선에 미치는 영향을 분석하였으나 유출수문곡선의 변화에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 평균 유사농도 값과 유사농도의 범위에 있어서도 모의 결과가 근소하게 증가하나 유의한 변화는 없는 것으로 나타났다. 투수계수에 대한 민감도 분석 결과, 투수계수 값을 저감 시킬수록 총 유출량 및 침투 유출량은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 유사농도 모의의 경우에도 투수계수를 저감시킬수록 모든 지점에서 평균 유사농도 및 유량에 따른 유사농도 범위가 증가하였으며, 향석 지점의 경우 투수계수를 50% 저감하였을 때 유사 농도 모의 값이 유량-유사량 관계식에 의해 계산된 값과 가장 근사한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 투수계수, 조도계수, 유사이송, 민감도 분석, 토양침식, 유역모형

*명지대학교 토목환경공학과 수공학연구실 석사 (e-mail: jminh0502@naver.com)

Master Degree, Hydro-lab, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Myongji Univ., Yongin-si 449-728, Korea

**교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 하천해안연구실 수석연구원 (e-mail: juncivil@gmail.com, Tel: 82-31-910-0229)

Corresponding Author, Senior Researcher, River and Coastal Research Division, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si 411-712, Korea

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 자연재해의 규모 증가와 도시화 및 산업화의 진행으로 토지이용이 변화하면서 유역 내 돌발홍수, 토양침식, 유사이송으로 인한 문제가 발생하고 있다. 본 연구의 대상 유역인 내성천유역은 기존 연구에서 실시한 현장조사와 유사발생 잠재성 평가(Ji et al., 2012)에서 토양침식으로 인한 유사발생 위험성이 매우 높다고 평가된 유역이다. 이러한 중대규모 유역의 경우 강우 발생 시 유역반응 예측과 이에 따른 관리 방안 마련을 위해서는 강우-유출-토양침식-유사이송으로 이어지는 유역 단위의 시·공간적 분석이 반드시 필요하다.

유역 내 강우-유출-토양침식-유사이송의 시·공간적 분석을 수행하기 위해 유역통합형 수치모형을 활용할 수 있으며 특히 기후변화 등에 의한 단기호우사상 발생시 유출-토양침식-유사이송으로 이어지는 유역 반응을 분석하기 위해서는 분포형 모형을 활용하는 것이 효과적이다. 분포형 유역 모형의 경우 세분화된 정방형 격자로 유역을 분할하고, 단기호우사상에 대한 유역의 시·공간적 변화양상을 동역학적 지배방정식을 적용하여 물리적으로 상세히 분석할 수 있다. 특히 토양침식에 의해 발생한 유사 가 지표와 하도로 이송되는 현상을 상세 격자별로 모의함으로써 유역 내 유사발생의 주요 출원지 및 지표교 변화를 분석하는데 효과적이다. 최근 국내외에서 컴퓨터의 성능 향상과 지형자료의 제공 및 활용이 가능해지면서 분포형 모형을 이용한 다양한 연구가 수행되고 있다.

He et al. (2007)은 물리적 기반의 모형을 개발하고 실험실 규모의 실험을 총 2회 수행하여 개발한 모형의 적정성을 확인한 바 있다. Zeinivand and Smedt (2009)는 GIS (Geographic Information System)를 기반으로 한 물리적 기반의 분포형 모형을 개발하고 하천유량과 유사농도를 일 단위 측정 자료와 비교하였으며, 그 결과 전반적으로 신뢰성 높은 결과를 도출하였다. Jang et al. (2008)은 유역에서 발생하는 토양침식과 유사이송이 최적관리기법 (Best Management Practices, BMPs) 선정에 중요한 영향을 미치기 때문에 유역 내 토양침식과 유사 발생량을 평가할 수 있는 모형의 개발이 필요하다고 제시하고 이에 기존 수문모형인 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)에 유사 모의 기능을 추가하여 모형을 개선한 바 있다. Koo and Cho (2007)은 현재 국내에서 유역 분석을 위해 사용하고 있는 모형이 대부분 준분포형 모형이기 때문에 유사 운반 과정의 시·공간적 변동을 해석하는데 그 한계가 있다고 서술하

고 따라서 유역을 정방형 격자로 구분하고 하천과의 연결성을 구현할 수 있는 분포형 유역모형의 개발이 필요하다고 제시한 바 있다. 또한 분포형 모형을 이용해 유역의 유사 운반과정에 대한 시·공간적 분포를 파악하는 것은 효과적인 유사 최적관리기법(BMPs)을 수립하는데 있어 유용한 수단이 될 수 있다는 사실을 언급했다.

유역모형 수치모의 기법연구에 대한 연구동향으로 Borah et al. (2001)은 물리적 기반의 모형을 이용하여 유역 분할에 따른 유량과 유사량의 변화량을 분석하였으며, 해당 유역을 더 작게 분할하여 수치모의를 수행하더라도 실측 자료와 더 근접한 결과를 얻지는 못한다고 제시한 바 있다. 그러나 모형의 정확한 검보정과 세부적인 유역 최적관리기법(BMPs)의 도출을 위해서는 상세한 유역분할이 필요할 수 있다고 하였다. Colleen et al. (2006)은 산지에서 유사발생의 주요 출원지를 제시할 수 있는 수치모의 분석을 위해 분포형 모형인 DHSVM (Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model) 모형을 이용해 산지에 도로건설의 유무, 화재발생의 유무에 따른 유사량과 산사태 발생을 평가한 바 있다. Joris et al. (2008)은 집중형 모형에 비해 분포형 모형이 기후변화, 토지이용의 변화에 따라 발생하는 토양침식을 모의하기 위해 적절한 모형이며, 모의 결과들은 유사발생 주요 출원지를 판단하는데 중요한 자료가 될 수 있다고 하였다.

분포형 모형을 이용한 유역 환경의 변화를 분석하기 위해서는 반드시 선택한 분포형 모형의 주요 매개변수의 민감도 분석과 대상 유역에 대한 모형의 검보정 과정을 수행해야 한다. 이러한 모형의 민감도 분석 및 검보정 과정을 생략하고 초기 매개변수를 그대로 사용할 경우 수치모의 결과의 정확도 및 신뢰도가 떨어지는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 분포형 모형을 구성하는 매개변수들 중 모의결과에 주요한 영향을 미치는 매개변수를 파악하고 민감도 분석을 통해 최적화된 모형을 구축하는 것이 유역의 유출-토양침식-유사이송의 정량적인 평가를 수행하는데 있어 반드시 선행되어야 할 사항이다. 즉, 분포형 모형을 구성하는 과정에서 일정한 격자 크기로 GIS 지형자료들이 구축되는 과정에서 초기값이 내포하고 있는 불확실성을 줄이기 위한 필요조건으로 매개변수 민감도 분석과 함께 최적화 과정인 모형 보정 과정이 요구되는 것이다 (Kim et al., 2009). 이를 통해 신뢰도 높은 수치모의 결과를 도출할 수 있을 것이며 유역의 최적관리기법(BMPs) 도출하기 위한 중요한 정보를 생산 가능하게 할 수 있다. 이러한 분포형 유역 모형의 민감도 분석과 모형 보정을 국내 유역에 대해 수행한 연구로는 Kim et al. (2009)이

중랑천 유역에 대해 Vflo™ 모형의 매개변수별 민감도 분석을 수행하였으며 투수계수(수리전도도)와 조도계수가 유출수문곡선의 침투 유량값 및 침투 발생시간에 미치는 영향을 분석한 바 있다. 또한 같은 대상유역에 대해 이보다는 앞서 2008년에 Park et al. (2008)이 동일한 모형을 이용하여 실무에서의 효율적 적용을 위한 조도계수, 투수계수, 초기함수비 등의 매개변수에 의한 계산치의 민감도 분석을 수행한 바 있으며 토지이용 및 지형특성을 고려한 적정 크기의 격자에 대한 연구를 수행한 바 있다.

이에 본 연구의 목표는 유사발생 위험성이 높은 내성천 유역을 대상으로 분포형 모형인 TREX 모형을 이용하여 이를 구성하는 다양한 매개변수들 중 수치모의 결과에 주요한 영향을 미치는 매개변수들을 평가하고 이에 대한 민감도 분석을 실시하고자 한다. 또한 민감도 분석을 통해 보정 및 검증된 주요 매개변수들을 다양한 크기의 단기호우사상에 적용하여 모의를 수행하고 주요 지점별 유출 및 유사이송의 정량적인 평가를 수행하고자 한다. 이를 통해 도출된 결과들은 분포형 모형 활용의 최종 목표인 유출량 및 유사 농도의 시공간적 변화, 유사 공급원 분석, 극한호우 사상 발생 후 최종 지표고 변화 분석 등에 활용할 수 있으며 모형에서 도출되는 결과 값의 예측 정확도 제고에도 기여할 수 있을 것이다.

2. 대상 유역 및 수치모의 조건

2.1 대상 유역의 개요

내성천유역은 한반도 중동부 동경 128° 10'36"에서 128° 51'13", 북위 36° 32'46"에서 37° 02'25" 사이에 위치하며, 경상북도 영주시, 예천군의 전체지역과 문경시, 봉화군의 일부지역, 그리고 안동시의 극히 일부지역을 포함하고 있는 낙동강유역의 제 1지류 유역으로 유역면적은 낙동강유역의 7.8%인 1,814.7 km², 유로연장은 108.2 km이다(Jeong, 2014). 한반도의 중동부에 위치한 내성천유역의 전반적인 강우특성은 6월에서 9월에 걸쳐 한반도를 통과하는 저기압 및 6월 말에서 8월 초에 걸쳐 한반도에 상륙하는 열대성 저기압에 의한 집중호우가 발생한다는 것이다. 연평균 강수량은 1,107.7 mm으로 전국평균인 1,245.0 mm보다 약 137 mm 적은 것으로 나타났으며, 낙동강유역의 연평균 강수량 1,178.2 mm보다 약 70 mm 적은 것으로 나타났다. 내성천유역의 하천특성은 대부분의 유역분지가 화강암 풍화층으로 이루어져 있어 화강암으로부터 붕괴되어 발생하는 유사의 공급이 많아 하천의 상류에서 하류에 이르기까지 대부분 모래하천으로 구성되어 있는 특

징을 갖고 있다. 이러한 영향으로 내성천유역은 기존 연구들에서 실시한 현장조사와 유사발생 잠재성 평가에서도 낙동강유역을 구성하고 있는 여러 중규모 유역 중 토양침식으로 인한 유사발생 위험성 및 잠재성이 가장 높으며 꾸준한 유역의 관리가 필요한 유역으로 평가된 바 있다(KOWACO, 2011). 현재 내성천유역에는 낙동강 중하류지역 및 내성천유역의 홍수피해경감과 경북 북부권(안동시, 예천군)의 안정적인 용수 공급과 낙동강 및 내성천 갈수기시 하천유지용수 공급을 위해 내성천 하류에서 상류 약 55.6 km에 위치한 지점(Fig. 1의 송리원 지점)에 영주댐을 건설하고 있다. 영주댐의 총 저수용량은 181.1백만 m³, 홍수조절용량은 75.0백만 m³인 다목적 댐으로 2009년 공사를 착수하여 2014년 준공을 앞두고 있다. 유역내 댐과 같은 구조물의 건설은 유역 전반에 걸쳐 수리수문학적, 유사이송 및 지형학적으로 큰 변화를 야기 할 수 있으며 지표, 하도, 하안 등의 침식과 퇴적, 사주 발생, 식생 변화 등으로 인한 유역 및 하도 관리 문제를 야기 시킬 수 있다. 따라서 내성천유역의 영주댐 건설 전·후 변화가 예상되는 구간에 대한 정보를 구축하기 위해서는 유역 통합형 분포형 모형을 이용한 여러 호우사상에 대한 수치적인 예측이 반드시 필요하다.

2.2 수치모형의 선정

유역단위의 유출-토양침식-유사이송 수치모의를 위해 현재 국내외에서 널리 사용되는 모형으로는 대표적으로 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran), SWAT (Soil and Water Assessment Tool), AGNPS (Agricultural Non-Point-Source Pollution Model), ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation), DWSM (Dynamic Watershed Simulation Model), KINEROS (KINematic Runoff and EROsion Model), MIKE SHE (Systeme Hydrologique Européen), TREX (Two-dimensional, Runoff, Erosion, and Export) 모형 등이 있다. 본 연구에서는 연구 목적에 맞게 단기호우사상에 대한 모의를 위해서 준분포형 모형 보다는 분포형 모형을 선택할 필요가 있다. 또한 분포형 모형인 AGNPS 모형은 단기호우사상에 대해 동일한 모의 시간간격(time step)만을 사용해야 하기 때문에 다양한 모의 시간간격(time step)을 적용할 필요가 있는 단기호우사상에 대해서는 모형을 안정적으로 구동하는데 있어 활용성이 떨어질 수 있다. 따라서 ANSWERS, DWSM, KINEROS, MIKE SHE, TREX 모형 등이 단기호우사상의 수치모의에 적합한 분포형 모형이라고 평가할 수 있다. Borah and Bera

(2003)는 TREX 모형의 전신모형인 CASC2D (CASCade of planes in 2-Dimensions) 모형이 수문 및 유사 모형구성에 있어 안정적인 모형이라 소개한 바 있으며 본 연구에서는 ANSWERS, DWSM, KINEROS, MIKE SHE 모형 보다는 모형의 소스코드가 공개되어 필요 시 모형의 수정이 가능한 TREX 모형을 최종 활용 모형으로 선정하였다.

TREX 모형은 미국 Colorado State University에서 개발한 CASC2D 모형 기반의 분포형 유역모형으로 복잡한 유역에서 단기간에 걸친 호우사상을 모의할 수 있으며, 다양한 종류의 입력자료 및 조건에 따른 유역에서의 유출, 토양침식, 유사이송에 대한 시·공간적 변화를 모의할 수 있다. TREX 모형은 극한호우에 대한 유역의 반응 분석에 매우 용이한 모형으로 토양손실이 극심한 지점, 유사 침식과 퇴적이 극심한 지점을 판단하는데 있어 매우 유용하다. 또한 TREX 모형은 필요시 화학적 물질의 이송에 대한 수치모의를 수행할 수 있다.

본 연구에서 활용한 TREX 모형의 처리과정은 수문학적 처리과정과 유사이송 처리과정으로 구분할 수 있다. 수문학적 처리과정은 강수와 차단, 적설과 용설, 침투와 투과손실, 저류, 지표 및 하도 흐름으로 구분할 수 있으며, 유사이송 처리과정은 이류-확산, 침식, 퇴적, 하상변화로 구분할 수 있다. 모형의 이론에 대한 사항은 TREX User's Manual (Velleux et al., 2006)을 참고할 수 있다.

2.3 수치모의 입력 자료 및 조건

TREX 모형의 입력자료 구축을 위해 내성천유역에 대한 수치고도모형(Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도, 토양도, 하천, 강우 자료를 수집하였다(Jeong, 2014). TREX 모형에 필요한 지형자료(수치고도모형, 토지이용도, 토양도 등)는 30×30m 격자의 해상도를 갖는 자료를 수집하여 150×150m 격자크기로 변환하여 사용하였다. 이는 보다 효율적이고 현실적인 모형 구동 시간을 구현하고 동시에 단기 유출과 유사이송 모의의 정확성을 충분히 확보할 수 있는 범위 내에서 변환한 것으로 Rojas et al. (2008)에 의하면 해상도가 더 높은 30m 혹은 90m 격자와 비교했을 때 150m 격자를 사용하는 것은 유출 및 유사이송 모의 결과에 미치는 영향이 크지 않다는 연구사례를 참고하여 반영한 것이다. 그 외 토지이용 항목별 특성, 토양 분류별 특성, 토양 및 유사 입자 특성, 하천특성, 강우에 대한 자료는 각각의 등급과 종류에 따라 구축하였다.

내성천유역의 토지이용도는 토지이용 항목에 따라 산림, 논, 주거지 등 20여 가지로 분류된 낙동강 정밀토지이

용도를 이용하여 추출하고 단순화된 8개의 분류 체계로 통합시켜 구축하였다. 각각의 토지 이용에서 차단 저류 깊이와 요지 저류 깊이는 각종 문헌(Linsley et al., 1982; Woolhiser et al., 1990; Bras, 1990)에서 제시하고 있는 토지이용 특성들을 기초로 설정하였다. 논의 토지이용 특성의 경우 논 주변의 관개수로의 영향을 고려하기 위해 6cm의 요지 저류 깊이를 적용하였다(Jia et al., 2005). 지표수와 하도흐름의 저항을 나타내는 Manning 조도계수의 경우 초기 값은 USACE (1998)와 Chow (1959)에 의해 제시된 토지이용 특성에 기초하여 결정한 후 추후 모형 보정 변수로 활용하였다. 토양피복인자(C), 침식제어대책인자(P)의 값들은 Wischmeier and Smith (1978)와 Julien (1998)에 의해 제시된 값들을 사용하였다.

대상유역의 토양특성을 정의하기 위해 사용된 토양도는 1:50,000 개략 토양도로서 8개의 토양종류별로 분류하여 구축하였다. 토양 분류별 특성과 관련하여 유효 수리전도도(투수계수), 모세관 압력수두, 토양침식인자(K) 등이 모형의 입력 자료로 활용되었다. 유효 수리전도도와 모세관 압력수두의 경우에는 Rawls et al. (1993)이 제시한 토양특성을 기초로 결정된 것이며 최종 유효 수리전도도의 경우 본 연구의 모형 보정에 주요한 변수이다. 토양 침식인자(K)는 Wischmeier and Smith (1978)과 Julien (1998)에 의해 제시된 값들을 사용하였다. 토양 유효 공극의 경우 최대 수분함량과 현장 수분함량 관측 값을 기초로 결정하였다.

토양과 유사의 입자특성은 굵은 자갈 이상, 굵은 자갈에서 가는 자갈, 가는 자갈에서 굵은 모래, 가는 모래 이하로 총 4가지 입자크기를 분류하여 모의를 수행하였다. 토양과 유사의 입자 침강속도는 유효입경에 해당하는 물의 온도가 10℃일 경우로 가정하여 Julien (1998)에 의해 표로 제시된 값을 활용하였으며 한계전단응력은 각각의 유효입경에 해당하는 값(Julien, 1998)들을 활용하였다. 지표면에서의 한계유속은 각각의 토양특성에 따라 정의되었으며 Moore and Burch (1986)의 관계식에 기초한 값을 활용하였고, 하천의 유사와 관련된 한계유속은 유사 이동하는 동안 비점작성 유사라는 가정을 기초로 각각의 입자특성에 Yang (1996)에 의해 제시된 관계식에 기초한 값을 활용하였다.

하천의 특성은 TauDEM 4.0 (Tarboton, 1997)을 이용해 하도를 구축한 뒤 설정하였다. 하도는 2,135개의 node로 구성된 53개의 link로 구성하였으며 총 하천의 길이는 34.8km이다. 하천의 물리적 크기 즉 하폭, 강턱 높이, 사면경사 등은 내성천의 HEC-RAS 지형자료(MLTMA,

2013)를 이용하여 결정하였다.

본 연구에서는 내성천유역 내 9개의 관측소(월포, 시항, 동로1, 동로2, 영주, 풍기, 희방, 부석, 봉화), 내성천유역 외 13개의 관측소(동화원, 이안, 사벌, 지보, 안동, 의춘, 명호, 재산, 도천, 석현, 하동, 단양, 덕산), 총 22개의 관측소(Fig. 1)를 대상으로 단기간에 큰 호우가 발생한 2011년(6월 23~28일)의 강우자료를 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)을 통해 수집하였다. TREX 모형은 최소 분 단위의 강우자료를 입력할 수 있지만 현실적인 모형 구동시간을 고려하여 시 단위 강우자료를 사용하였다. 내성천유역의 TREX 모형 보정 및 검증을 위해 실측된 유출량 및 유사량 자료를 활용하였다. 실측된 유출량 자료는 낙동강홍수통제소(www.nakdongriver.go.kr)의 2011년 호우사상에 대한 내성천유역의 주요 지점별(향석, 미호, 월호, 예천) 유량 자료를 활용하였으며, 실측된 유사량 자료는 향석과 송리원 지점을 대상으로 개발된 유량-유사량 관계식 자료를 활용하였다(Fig. 1). 향석 지점의 유량-유사량 관계식(KOWACO, 2012)은 2010년에 실측된 자료이며, 송리원 지점의 유량-유사량 관계식(KOWACO, 2012)은 1992년에 실측된 자료이다.

내성천유역에 대한 TREX 모형의 모의 시간간격은 호우사상별로 그리고 각 호우사상의 시간분포에 따라 다양하게 적용되었으며 0.5초에서 8초 사이의 다양한 시간간격 값들이 적용되었다(Jeong, 2014). 전체 유출 및 유사이송 모의시간은 호우사상이 발생한 96시간을 포함한 총 144시간을 모의하였다. 호우가 발생하지 않은 시간에 해당하는 추가적인 48시간은 수문곡선상 유출이 감소되는

하강곡선에서 기저유량 상태로 회복되는 기간을 충분히 모의할 수 있도록 추가시간을 설정한 것이다.

3. 분포형 유역 모형의 매개변수 민감도 분석

기존에 내성천유역을 대상으로 수행된 연구(KOWACO, 2012; Ji et al., 2014)에서는 2008년 및 2009년 호우사상에 대해 TREX 모형을 검토정한 바 있다. 본 논문에서는 2008년 및 2009년 호우사상보다 상대적으로 큰 강우와 유출량을 갖는 조건인 2011년 호우사상(향석 지점 기준, 2008년 침투 유출량 1,619 m³/s, 2009년 침투 유출량 520 m³/s, 2011년 침투 유출량 2,301 m³/s)을 적용하여 TREX 모형의 매개변수 민감도 분석을 수행하였다. Ji et al. (2014)이 2008년 및 2009년 호우사상을 적용하여 유출과 유사농도에 대해 검토를 수행한 매개변수를 그대로 적용한 경우 2011년 호우사상에서는 실측치와 모의 결과의 오차가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 따라서 모의결과에 주요한 영향을 미치는 매개변수인 조도계수(Manning's n)와 투수계수(K_r)를 재조정하여 2011년 호우사상에 대한 매개변수 보정을 수행하였다.

3.1 조도계수 변화에 따른 민감도 분석

조도계수는 토지이용 또는 식생의 상태에 따라 그 값이 달라지며 유출이 발생하는 시간 및 유출수문곡선의 형태에 영향을 미치는 매개변수로 수치모의 결과에 주요한 영향을 미친다(Kim et al., 2008; Ji et al., 2014). 2011년 호우사상에 대한 조도계수 민감도 분석을 위해 내성천유역을

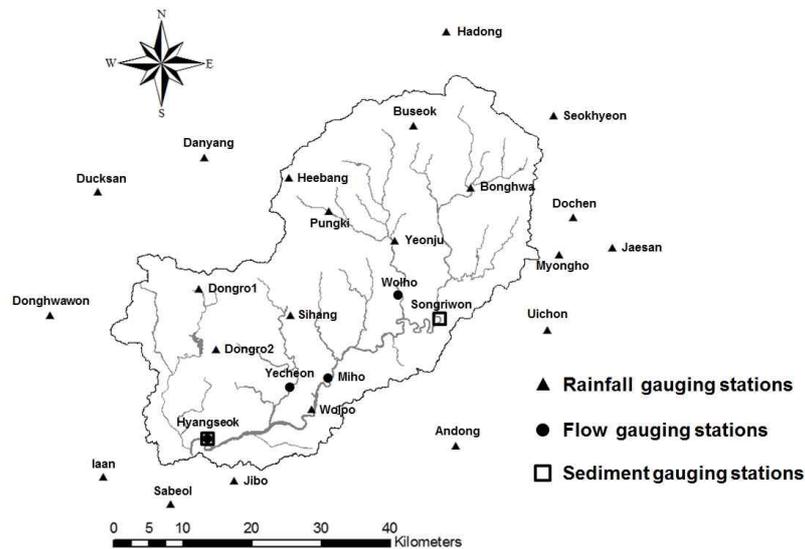


Fig. 1. Location of Rainfall, Flow, and Sediment Gauging Stations in the Naesung Stream Watershed (Jeong, 2014)

구성하는 토지이용항목 중 85% 이상의 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 숲의 조도계수 값을 조정하였다. 먼저 2008년 및 2009년 호우사상에 대한 모형 검토정에서 최종 채택된 숲의 조도계수 값 0.4를 그대로 적용한 조건과 숲에서의 조도계수를 0.45로 증대시켜 지표수 유출 유속을 감소 시킴으로써 향석 지점에서의 유출곡선에 미치는 영향을 분석하기 위한 조건 두 가지로 구분하여 모의를 수행하였다. 최종적으로 조도계수 변경에 따른 두 가지 모의결과를 실제 관측된 값과 비교하여 민감도 분석을 실시하였다.

TREX 모형의 조도계수 변화에 따른 유출 모의결과는

내성천유역의 최종 유출량 관측 지점인 향석 지점에 대해 Fig. 2와 같이 나타냈으며 Table 1은 향석 지점을 포함한 내성천유역의 주요 지점(미호, 월호, 예천)에서의 모의 결과와 관측 값을 비교한 표이다. 먼저 내성천의 분류에 위치한 향석, 미호 지점은 조도계수 변경에 따른 두 가지 모의결과에서 모두 관측된 값에 비해 과소 산정되는 경향이 나타났으며 내성천 지류에 위치한 월호, 예천 지점에서는 관측된 값에 비해 과대 산정되는 경향이 나타났다.

숲의 조도계수 변경에 따른 두 가지 모의결과를 상호 비교해보면 하천 분류에 위치한 향석, 미호 지점의 침투

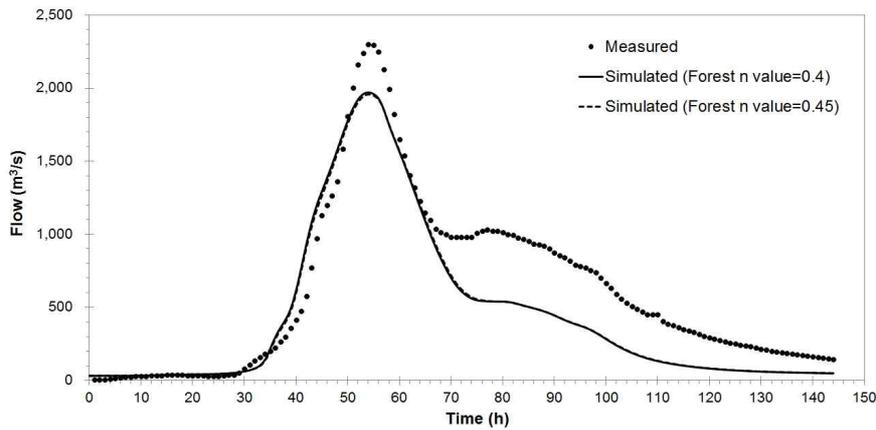


Fig. 2. Flow Discharge at the Hyangseok Station for Different Manning's n of Forest Area (2011)

Table 1. Flow Results for Different Manning's n of the Forest Area (2011)

Classification		Manning's n value=0.40 (Forest)			
		Hyangseok	Miho	Wolho	Yecheon
Total Flow Volume (m ³)	Measured	3.15E+08	2.17E+08	4.78E+07	2.89E+07
	Simulated	2.33E+08	1.76E+08	6.07E+07	3.21E+07
	RPD [†] (%)	-26.2	-18.9	27	11.1
Peak Flow (m ³ /s)	Measured	2,301	2,155	542	227
	Simulated	1,970	1,448	655	412
	RPD (%)	-14.4	-32.8	20.8	81.5
Time to Peak Flow (hours)	Measured	54	51	48	51
	Simulated	54	55.3	51.8	49.8
	RPD (%)	0	8.33	7.9	-2.4
Classification		Manning's n value=0.45 (Forest)			
		Hyangseok	Miho	Wolho	Yecheon
Total Flow Volume (m ³)	Measured	3.15E+08	2.17E+08	4.78E+07	2.89E+07
	Simulated	2.33E+08	1.76E+08	6.07E+07	3.21E+07
	RPD (%)	-26.2	-18.9	27	11.1
Peak Flow (m ³ /s)	Measured	2,301	2,155	542	227
	Simulated	1,957	1,439	655	412
	RPD (%)	-15	-33	20.8	81.5
Time to Peak Flow (hours)	Measured	54	51	48	51
	Simulated	54	55.3	51.8	49.8
	RPD (%)	0	8.33	7.9	-2.4

[†]RPD=Relative Percent Difference. RPD values were calculated as (Simulated - Measured) ÷ Measured

유출량에서만 근소한 차이(예를 들어, 조도계수 0.4일 때 향석 지점 침투 유출량 1,970 m³/s, 조도계수 0.45일 때 향석 지점 침투 유출량 1,957 m³/s)를 나타냈으며 그 외 총 유출량, 침투 유출량 발생 시간은 조도계수 변화에 상관없이 동일한 값을 나타냈다. 이는 Kim et al. (2009)이 중랑천 유역에 대해 VfloTM 모형을 적용하여 분석한 연구 결과에서 지표면 조도계수가 수문곡선 형태에 민감하게 반응한 점과는 차이가 있다. 따라서 전체 유출고에 영향을 주는 투수계수의 조정을 통해 2011년 홍수사상에 대한 모형 보정이 필요하다고 판단된다.

내성천유역 숲 지역의 조도계수 변화에 따른 TREX 모형의 유사 모의결과는 향석 지점에 대해 Fig. 3과 같이 나타냈으며 유사 관측 자료가 있는 향석 지점과 송리원 지점의 모의 결과와 관측 자료의 정량적 비교는 Table 2와 같다. 수치모의 결과, 향석 지점은 숲 영역의 조도계수 변화와 상관없이 TREX 모형에 의해 모의된 유사농도 범위가 향석 지점에 대해 관측 자료를 기초로 개발한 유량-유사량 관계식에 의해 계산된 유사농도 범위를 포함하고 있는 것으로 나타났으며 유출량이 점차 증가함에 따라 유량

-유사량 관계식을 이용한 계산 값과 모의한 값이 근사해지는 경향을 보였다. 반면에 송리원 지점의 경우 조도계수에 변경에 따른 두 가지 모의 결과에서 모두 계산된 값에 비해 전체적으로 매우 작게 산정되었다. 이러한 원인으로서는 2011년 호우사상에서 발생한 홍수량의 범위가 송리원 지점의 유량-유사량 관계식 개발에 사용된 관측 유량의 범위를 벗어나는 값들이기 때문에 관측된 유량 범위를 벗어나는 홍수량에 대해서는 개발된 관계식을 외삽하여 사용함으로써 홍수시의 유사 농도를 과대평가하고 있기 때문이다. 따라서 송리원 지점의 유사농도 모의 결과와 유량-유사량 관계식에 의한 계산된 결과와의 차이는 개발된 유량-유사량 관계식을 외삽하여 사용하는 방법 자체의 불확실성에 의해 발생한 오차라고 판단된다. 송리원 지점의 유량-유사량 관계식은 약 10 m³/s에서 150 m³/s의 유량에서 관측된 유사자료를 기반으로 개발된 관계식이며 2011년 호우사상의 경우 송리원 지점의 유출량이 이 범위를 초과한 것으로 판단되기 때문에 유사 농도에 대한 모형 검보정을 위한 대표 지점으로 송리원 지점을 활용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 한편 조도계수 변

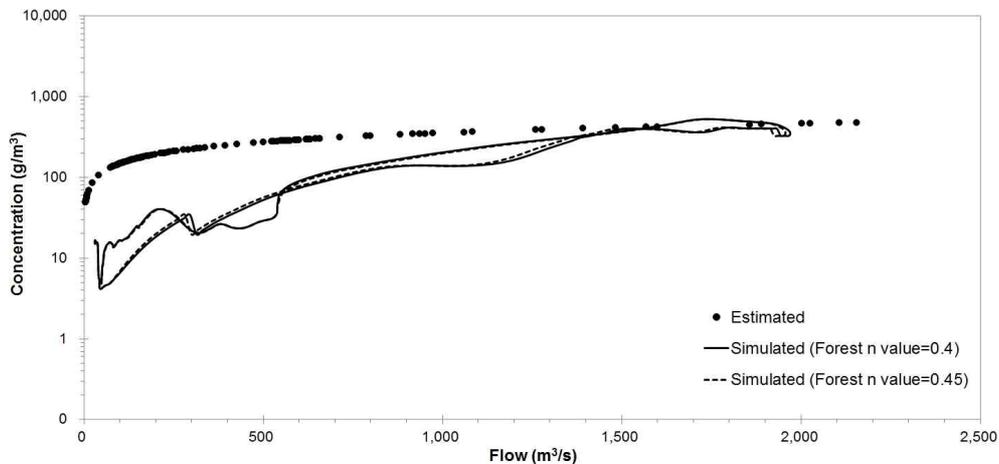


Fig. 3. Sediment Concentration Simulated and Estimated at the Hyangseok Station for Different Manning's n of Forest Area (2011)

Table 2. Sediment Concentration Results for Different Manning's n of the Forest Area (2011)

Stations	Condition	Estimated (g/m ³)		Simulated (g/m ³)	
		Average	Range	Average	Range
Hyangseok	Manning's n (Forest n value=0.4)	213	49 - 472	79	4 - 512
	Manning's n (Forest n value=0.45)			81	4 - 525
Songriwon	Manning's n (Forest n value=0.4)	2971	5.5 - 26,624	79	0.6 - 474
	Manning's n (Forest n value=0.45)			81	0.6 - 492

경에 따른 두 가지 모의결과를 상호 비교해보면 숲에 대한 조도계수를 기존 0.4에서 0.45로 수정하여 모의했을 때 평균 유사농도 값과 유사농도의 범위가 근소하게 증가하나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 즉, 유출 모의와 마찬가지로 조도계수에 따른 유사 농도의 변화는 그 민감도가 적은 것으로 판단된다.

3.2 투수계수 변화에 따른 민감도 분석

투수계수(K_h)는 유역을 구성하는 토양에 대한 강우의 침투량을 결정하고 전체 유출량 및 침투 유출량 발생에 영향을 미치는 매개변수로 수치모의 결과에 주요한 영향을 미친다(Kim et al., 2008). 앞서 설명한 조도계수 민감도 분석에서 언급하였듯이 향석 지점에서의 전체 유출량

과 침투 유출량이 과소 산정되는 것을 보완하기 위해서는 투수계수 값을 감소시켜 침투량을 감소시키고 유출량을 증대시킬 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 2011년 호우 사상에 대해 조도계수 민감도 분석시 적용한 투수계수 값을 내성천유역을 구성하는 모든 토양에 대해 값을 감소시켜 반복적인 검토를 수행하였으며 본 논문에서는 뚜렷한 변화를 검토할 수 있는 50% 및 80% 저감하였을 경우의 수치모의 결과만 제시하였다. 투수계수 변경에 따른 모든 모의결과를 실제 관측된 값과 비교하였다.

투수계수의 값에 따른 유출 모의결과는 내성천유역의 향석 지점에 대해 Fig. 4와 같이 나타냈으며 Table 3은 향석 지점을 포함한 내성천유역의 주요 지점(미호, 월호, 예천)에서의 유출량 모의결과와 관측 값을 정량적으로 비교

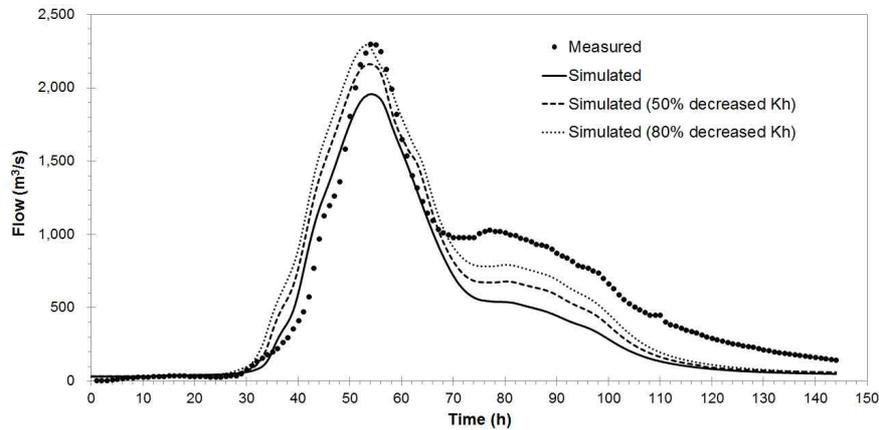


Fig. 4. Flow Discharge at the Hyangseok Station for Different Hydraulic Conductivities (2011)

Table 3. Flow Results for Different Hydraulic Conductivities (2011)

Classification	Hydraulic conductivity				Hydraulic conductivity 50% decreased				Hydraulic conductivity 80% decreased				
	Hyang-seok	Miho	Wolh-o	Yech-eon	Hyang-seok	Miho	Wolh-o	Yech-eon	Hyang-seok	Miho	Wolh-o	Yech-eon	
Total Flow Volume (m ³)	Measured	3.15E+08	2.17E+08	4.78E+07	2.89E+07	3.15E+08	2.17E+08	4.78E+07	2.89E+07	3.15E+08	2.17E+08	4.78E+07	2.89E+07
	Simulated	2.33E+08	1.76E+08	6.07E+07	3.21E+07	2.72E+08	2.04E+08	7.24E+07	3.93E+07	3.03E+08	2.28E+08	8.17E+07	4.51E+07
	RPD (%)	-26.2	-18.9	27	11.1	-13.8	-6	51	36	-3.8	5.1	70.9	56.1
Peak Flow (m ³ /s)	Measured	2,301	2,155	542	227	2,301	2,155	542	227	2,301	2,155	542	227
	Simulated	1,970	1,448	655	412	2,161	1,574	717	452	2,293	1,631	753	483
	RPD (%)	-14.4	-32.8	20.8	81.5	-6.1	-27	32	99	-0.4	-24.3	38.9	112.8
Time to Peak Flow (hrs)	Measured	54	51	48	51	54	51	48	51	54	51	48	51
	Simulated	54	55.3	51.8	49.8	53.8	54	51.8	49.5	53.3	52	51.8	42.5
	RPD (%)	0	8.33	7.9	-2.4	-0.4	5.9	7.9	-3	-1.4	1.9	7.9	-16.7

한 것이다. 유출 모의결과, 모든 지점에서 전체적인 유출 수문곡선의 양상은 크게 변화하지 않았으나 투수계수 값을 저감 시킬수록 총 유출량 및 침투 유출량은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 향석 지점의 경우 투수계수를 50% 및 80% 저감한 경우 총 유출량은 관측된 값과의 차이가 -26.2% ($8.20E+07\text{ m}^3$)에서 -13.8% ($4.30E+07\text{ m}^3$) 및 -3.8% ($1.20E+07$)로 감소하였다. 침투 유출량은 관측 값과의 차이가 투수계수 저감 전에 비해 투수계수(K_h) 50% 및 80% 저감 후, -14.4% ($331\text{ m}^3/\text{s}$)에서 -6.1% ($140\text{ m}^3/\text{s}$) 및 -0.4% ($8\text{ m}^3/\text{s}$)로 감소하였다. 미호 지점 역시 투수계수 저감 전에 비해 투수계수 50%, 80% 저감 후, 총 유출량은 관측된 값과의 차이가 -18.9% ($4.10E+07\text{ m}^3$)에서 -6% ($1.30E+07\text{ m}^3$), 5.1% ($1.10E+07\text{ m}^3$)로 점차 감소하였으며 침투 유출량은 관측 값과의 차이가 -32.8% ($707\text{ m}^3/\text{s}$)에서 -27% ($581\text{ m}^3/\text{s}$), -24% ($524\text{ m}^3/\text{s}$)로 감소하였다. 반면, 내성천 지류에 위치한 월호와 예천 지점의 경우에는 투수계수를 저감 시킬수록 관측 값과의 차이는 더 증가하였다. 월호 지점의 경우 투수계수 저감 전에 비해 투수계수를 50%, 80% 저감한 경우 총 유출량은 관측된 값과의 차이가 27.0%

($1.29E+07\text{ m}^3$)에서 51.0% ($2.46E+07\text{ m}^3$), 70.9% ($3.39E+07\text{ m}^3$)로 증가하였으며 침투 유출량은 관측 값과의 차이가 20.8% ($113\text{ m}^3/\text{s}$)에서 32% ($175\text{ m}^3/\text{s}$), 38.9% ($211\text{ m}^3/\text{s}$)로 증가하였다. 마찬가지로 예천 지점 역시 투수계수 저감 전에 비해 50%, 80% 저감 후, 관측된 값과의 차이가 11.0% ($3.20E+06\text{ m}^3$)에서 36.0% ($1.04E+07\text{ m}^3$), 56.1% ($1.62E+07\text{ m}^3$)로 증가하였으며 침투 유출량은 관측 값과의 차이가 81.5% ($185\text{ m}^3/\text{s}$)에서 99% ($225\text{ m}^3/\text{s}$), 112.8% ($256\text{ m}^3/\text{s}$)로 증가하였다.

투수계수 값의 감소는 강우 침투량을 감소시키고 총유출량과 침투 유출량을 증가시키기 때문에 관측 유출수문곡선에 비해 총유출량과 침투 유출량이 작게 나타난 향석과 미호 지점에서는 투수계수 값을 감소시킬수록 관측치와 근사해지는 경향이 나타났으나 월호와 예천 지점의 경우 관측 유출수문곡선에 비해 총유출량과 침투 유출량이 크게 나타난 상태에서 투수계수 값을 감소시켰기 때문에 관측치와의 차이가 더 크게 증가하였음을 알 수 있다.

TREX 모형의 투수계수 값에 따른 유사 모의결과는 향석 지점에 대해 Fig. 5와 같이 나타냈으며 Table 4는 향석

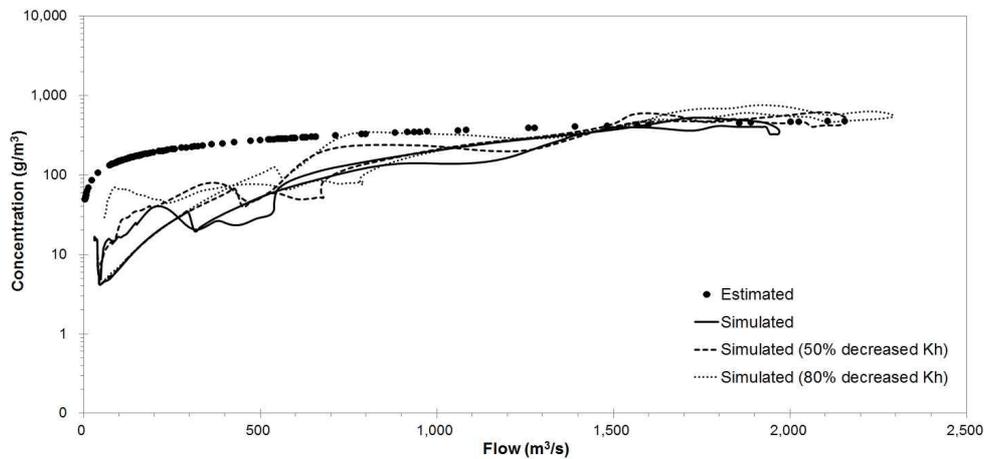


Fig. 5. Sediment Concentration Simulated and Estimated at the Hyangseok Station for Different Hydraulic Conductivities (2011)

Table 4. Sediment Concentration Results for Different Hydraulic Conductivities (2011)

Stations	Condition	Estimated (g/m^3)		Simulated (g/m^3)	
		Average	Range	Average	Range
Hyangseok	K_h	213	49 - 472	79	4 - 512
	50% decreased K_h			132	4 - 614
	80% decreased K_h			143	4 - 756
Songriwon	K_h	2971	5.5 - 26,624	79	0.6 - 474
	50% decreased K_h			129	0.7 - 603
	80% decreased K_h			148	0.8 - 711

지점과 송리원 지점의 모의결과와 관측 값을 정량적으로 비교한 것이다. 수치모의 결과, 투수계수를 저감시킬수록 모든 지점에서 평균 유사농도 및 유량에 따른 유사농도 범위가 증가하였으며, 향석 지점의 경우 투수계수를 50% 저감하였을 때 유사 농도 모의 값이 유량-유사량 관계식 (실측 유사 자료를 이용하여 개발)에 의해 계산된 값과 가장 근사한 것으로 나타났다. 송리원 지점의 경우 앞서 실시한 조도계수에 따른 민감도 분석 결과와 마찬가지로 유량-유사량 관계식의 유량 범위를 벗어나는 값들에 대해 관계식을 외삽하여 사용하는 방법의 불확실성에 기인하여 모의결과와 큰 차이가 발생하였으며, 현장 측정 자료의 부족으로 인해 TRESX 모형의 모의결과와 비교하기에는 그 대표성이 떨어지는 것으로 판단된다.

4. 호우사상 규모에 따른 최적 매개변수 평가

Ji et al. (2014) 연구에서 2008년 및 2009년 호우사상에 적용한 TRESX 모형의 주요 매개변수(조도계수 및 투수계수)를 동일하게 사용하여 2011년 호우사상에 대한 수치모의를 실시하였으나 관측된 유출량 및 유사 농도 결과와의 오차가 크게 나타나 2011년 호우사상에 적합한 주요 매개변수 값을 파악하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과는 앞선 3장에서 제시하였으며 본 장에서는 2008년, 2009년, 2011년 호우사상에 따른 최적의 매개변수를 최종 결정하고 평가하였으며 그 내용을 요약하였다.

먼저 앞서 언급한 바와 같이 조도계수 변경에 따른 유출량 및 유사 농도 모의결과는 투수계수와 비교하였을 때 모의 결과에 미치는 그 민감도가 적은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용한 2008년 및 2009년 호우사상, 2011년 호우사상의 강우와 유출량 규모 내에서는 동일한 조도계수 값(Table 5)을 적용하여 사용해도 모의결과에는 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 반면에 투수계수 변

경에 따른 2011년 호우사상의 유출 및 유사 모의결과는 매우 큰 변화의 폭을 나타내며 다양한 결과를 나타내었다. 기존 2008년 및 2009년에서 적용한 투수계수의 50%, 80%를 저감한 값을 적용하여 수치모의 한 결과가 2011년 호우사상의 관측된 값과 비교적 유사한 결과를 나타내었다. 이 두 가지 모의결과를 상세히 비교해 보면 유출 모의의 경우 본류에 위치한 향석, 미호 지점에서는 50% 저감 후 모의결과에 비해 80% 저감 후 모의결과가 관측된 값과 더 근소한 차이를 보였으나 지류에 위치한 월호, 예천 지점에서는 80% 저감 후 모의결과가 50% 저감 후 모의결과에 비해 유출량이 큰 폭으로 급증하는 결과를 나타내 관측된 값과 보다 큰 차이를 나타내었다(Table 3). 유사 모의결과의 경우 Fig. 5를 보면 투수계수를 50% 저감한 결과가 80%를 저감한 결과에 비해 유출이 점차 증가할수록 관측된 유사농도 값과 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 사실을 토대로 2011년 호우사상에 대한 최적의 투수계수 값은 2008년 및 2009년 호우사상에서 적용한 투수계수의 50%를 저감한 값(Table 6)을 적용하는 것이

Table 5. Assessment of Manning n Value by Rainfall Event Scale

Classification	Manning n value
	2008 event, 2009 event, 2011 event
Barren	0.20
Water	0.05
Developed	0.01
Wetland	0.10
Grassland	0.30
Forest	0.40
Paddy	0.50
Crop	0.30

Table 6. Calibrated Hydraulic Conductivities for Different Rainfall Events

Classification	Hydraulic Conductivity (m/s)	
	2008 and 2009 events	2011 event (50% decreased Kh)
Rocky	8.35E-07	4.18E-07
Loamy Fine Sand	1.66E-07	8.30E-08
Rocky Loam	4.18E-07	2.09E-07
Rocky Silty Loam	6.05E-08	3.03E-08
Sandy Loam	3.33E-09	1.67E-09
Silt Loam	1.89E-08	9.45E-09
Silty Clay Loam	5.55E-09	2.78E-09
Paddy Field	4.68E-09	2.34E-09

보다 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 호우사상별(2008년, 2009년, 2011년) 최적화된 매개변수를 적용하여 수치모의를 수행한 결과는 내성천유역의 주요 지점을 대상으로 Tables 7 and 8에 요약하였다. 호우사상별 TREX 모형의 유출 모의결과를 요약해 보면 먼저 최종 유출구 지점인 향석 지점에서의 모의된 유출수문곡선과 관측된 유출수문곡선의 경우 총 유출량은 두 값의 상대적인 % 차이(RPD, Relative Percent Difference)가 -13.8%에서 14.3%였으며, 첨두 유출량은 -6.1%에서 11.8%, 첨두 유출량 발생 시간은 -0.4%에서 1.8%로 나타나 총 유출량 보다는 첨두 유출량과 첨두 유출이 발생하는 시간에 대해 비교적 정확한 모의결과가 도출된 것으로 판단된다. 미호 지점의 경우에는 총 유출량은 RPD가 -6%에서 22.2%, 첨두 유출량은 -27%에서 14.8%, 첨두 유출량 발생 시간은 2.9%에서 23.1%로 나타나 첨두 유출량보다는 총 유출량과 첨두 유출이 발생하는 시간에

대해 비교적 정확한 모의결과가 도출된 것으로 나타났다. 월호 지점은 총 유출량의 RPD가 -4.9%에서 51%, 첨두 유출량은 -3.3%에서 32%, 첨두 유출량 발생 시간은 2.3%에서 16%로 나타나 첨두 유출이 발생하는 시간에 대해 비교적 정확한 모의결과가 도출된 것으로 나타났다. 반면 예천 지점의 경우 첨두 유출이 발생하는 시간에 대해 비교적 정확한 모의결과(-3%에서 1.3%)가 도출되었으나 총 유출량 및 첨두 유출량은 관측 값에 비해 매우 크게 산정되었다. 첨두 유출량과 첨두 유출 값을 수치모의 상에서 감소시킬 수 있는 방법은 투수계수를 저감하여 적용하는 방법이 있으나 예천 지점의 오차를 완화하기 위해서는 투수계수 값의 조정 외에 상류에 위치한 예천양수발전소의 저류 효과를 고려해야할 필요가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 예천양수발전소의 정확한 제원 및 저류량에 대한 정보가 수집되지 않아 예천양수발전소에 대한 저류 효과를 모의에 고려하지 않았으나 예천 지점의

Table 7. Runoff Discharge Results For Rainfall Events

Event	Stations	Total Flow Volume (m ³)			Peak Flow (m ³ /s)			Time to Peak Flow (hours)		
		Measured	Simulated	RPD (%)	Measured	Simulated	RPD (%)	Measured	Simulated	RPD (%)
July 24-26, 2008	Hyangseok	8.21E+07	9.09E+07	10.7	1,619	1,615	-0.3	42.0	42.8	1.8
	Miho	8.45E+07	8.36E+07	-1.1	1,569	1,457	-7.1	34.0	41.9	23.1
	Wolho	3.27E+07	3.11E+07	-4.9	638	617	-3.3	30.0	34.8	16.0
	Yecheon	4.69E+06	9.29E+06	98.1	92	270	193.9	36.0	36.5	1.3
July 8-10, 2009	Hyangseok	3.56E+07	4.07E+07	14.3	520	582	11.8	54.0	53.4	-1.1
	Miho	2.93E+07	3.58E+07	22.2	452	519	14.8	50.0	51.5	2.9
	Wolho	9.23E+06	1.38E+07	49.5	196	250	27.6	45.0	46.1	2.3
	Yecheon	4.35E+06	7.25E+06	66.7	90	188	107.5	44.0	43.7	-0.8
June 23-28, 2011	Hyangseok	3.15E+08	2.72E+08	-13.8	2,301	2,161	-6.1	54.0	53.8	-0.4
	Miho	2.17E+08	2.04E+08	-6.0	2,155	1,574	-27.0	51.0	54.0	5.9
	Wolho	4.78E+07	7.24E+07	51.0	542	717	32.0	48.0	51.8	7.9
	Yecheon	2.89E+07	3.93E+07	36.0	227	452	99.0	51.0	49.5	-3.0

Table 8. Sediment concentration results for rainfall events

Event	Stations	Estimated (g/m ³)		Simulated (g/m ³)	
		Average	Range	Average	Range
July 24-26, 2008	Hyangseok	187	106 - 423	48	3 - 901
	Songriwon	797	290 - 21,700	40	0.7 - 1,940
July 8-10, 2009	Hyangseok	159	105 - 275	31	4 - 308
	Songriwon	11	0.05 - 1,720	17	0.5 - 250
June 23-28, 2011	Hyangseok	213	49 - 472	132	4 - 614
	Songriwon	2971	5.5 - 26,624	129	0.7 - 603

보다 정확한 수치모의 결과를 활용하기 위해서는 발전소 저류지의 저류량을 유출 모의시 고려해야 할 것이다.

호우사상별 TREX 모형의 유사 모의결과(Table 8)를 요약해 보면 향석 지점의 경우 평균 유사농도는 다소 차이가 있으나 모의된 유사농도 범위는 실측 유량-유사량 관계식에 의해 계산된 유사농도 범위를 포함하고 있는 것으로 나타났다. 송리원 지점의 경우 앞서 언급한 바와 같이 관측된 유량-유사량 범위를 벗어나는 값들에 대해 관계식을 외삽하여 사용하는 방법 자체의 불확실성으로 인해 모의된 유사농도는 계산된 유사농도에 비해 전체적으로 매우 작게 산정되었다. 호우사상별 유사에 대한 TREX 모형의 모의결과를 종합해 보면 모의된 결과와 유량-유사량 관계식에 의해 계산된 결과를 정량적으로 비교했을 때 모형의 정확도는 지점별로 관측된 유사량 자료의 양적, 질적 차이에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 송리원 지점의 경우 유량-유사량의 현장 측정자료 부족으로 인한 유량-유사량 관계곡선의 적용범위가 한정적이기 때문에 TREX 모형의 모의결과와 비교하기에는 그 대표성이 떨어지는 것으로 판단된다. 그러나 향석 지점의 경우 TREX 모형의 모의결과는 관측된 유사량 자료에 의해 유도된 유량-유사량 관계곡선식에 의해 계산된 유사농도 범위를 포함하고 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 내성천유역을 대상으로 TREX 모형을 이용하여 유출과 유사농도 모의 결과에 주요한 영향을 미치는 조도계수 및 투수계수의 민감도 분석을 실시하였다. 이를 통해 과거에 발생한 단기 호우사상별 최적화된 매개 변수들을 적용하여 다양한 크기의 호우 발생 시 유역의 유출 및 유사 농도 변화를 모의하였으며 정량적인 평가를 수행하였고 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

기존에 검토정된 2008년, 2009년 단기호우사상에 대한 모의결과와 본 연구에서 유출량이 크게 증가한 2011년 단기호우사상의 TREX 모의 결과를 종합해 봤을 때 내성천 유역의 토지 피복이 숲인 지역의 조도계수를 0.4에서 0.45로 변경하여도 유출량의 변화는 그 민감도가 적은 것으로 나타났으며 평균 유사농도 값과 유사농도의 범위에서 모의 결과가 근소하게 증가하나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 즉, 내성천의 경우 유출 모의와 유사농도 변화를 모의하는데 있어 토지 피복이 숲인 지역의 조도계수 값이 결과에 미치는 민감도는 적은 것으로 나타났다. 반면 내성천유역에 대한 TREX 모형의 투수계수에 대한

민감도 분석 결과, 투수계수 감소에 따라 모든 지점에서 전체적인 유출 수문곡선의 양상은 크게 변화하지 않았으나 투수계수 값을 저감 시킬수록 총 유출량 및 첨두 유출량은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 내성천의 최하류단 관측 지점인 향석 지점의 경우 투수계수를 50%, 80% 저감한 경우 총 유출량의 관측된 값과의 차이가 -26.2% ($8.20E+07 \text{ m}^3$)에서 -13.8% ($4.30E+07 \text{ m}^3$) 및 -3.8% ($1.20E+07$)로 감소하였다. 첨두 유출량은 관측 값과의 오차가 투수계수 저감 전에는 -14.4% ($331 \text{ m}^3/\text{s}$)였으나 50%, 및 80% 저감 후 -6.1% ($140 \text{ m}^3/\text{s}$) 및 -0.4% ($8 \text{ m}^3/\text{s}$)로 감소하였다. 유사농도 모의의 경우에도 투수계수를 저감시킬수록 모든 지점에서 평균 유사농도 및 유량에 따른 유사농도 범위가 증가하였으며, 향석 지점의 경우 투수계수를 50% 저감하였을 때 유사 농도 모의 값이 유량-유사량 관계식(실측 유사 자료를 이용하여 개발)에 의해 계산된 값과 가장 근사한 것으로 나타났다. 이러한 연구결과를 토대로 따라서 내성천유역의 경우는 상하류의 유출량 예측이 관측치와 비교했을 때 과대 및 과소 산정되는 경향을 개선하기 위해서는 조도계수 보다는 투수계수를 활용하여 모형의 예측 정확도를 높이는 것이 타당한 것으로 판단된다. 투수계수는 유역 전체의 모든 유출 모의결과에 대해 매우 민감한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

호우사상별(2008년, 2009년, 2011년)로 최적화된 조도계수와 투수계수를 적용하여 수치모의를 수행한 결과, 최종 유출구 지점인 향석 지점에서의 모의된 유출수문곡선은 관측된 유출수문곡선과 비교했을 때 총 유출량 보다는 첨두 유출량과 첨두 유출이 발생하는 시간에 대해 비교적 정확한 모의결과가 도출된 것으로 나타났다. 반면 향석, 미호, 월호 지점과 비교했을 때 유출량의 오차가 크게 나타난 예천 지점의 경우 투수계수 값을 변경하는 것 외에 본 연구의 수치모의 상에서 제외된 상류의 저류지 정보를 추가함으로써 과대 산정되는 총유출량과 첨두 유출량의 모의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 TREX 모형의 유사농도 모의의 경우 모의된 결과와 유량-유사량 관계식에 의해 계산된 결과를 정량적으로 비교했을 때 모형의 정확도는 지점별로 관측된 유사량 자료의 양적, 질적 차이에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 향석 지점의 경우 TREX 모형의 모의결과는 관측치에 기초하여 유도된 유량-유사량 관계식에 의해 계산된 유사농도 범위를 포함하고 있으며, 유출이 큰 구간에서 모의된 유사농도와 계산된 유사농도가 더 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 ‘(14주요-산업) 구조물로 인한 하천 지형 및 식생 변화 분석’의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 본문 내용의 일부는 제 1저자의 명지대학교 대학원 토목환경공학과 2014년 석사논문에 포함된 내용입니다.

References

- Borah, D.K., and Bera, M. (2003). “Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases.” *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 46, No. 6, pp. 1553-1566.
- Borah, D.K., Xia, R., and Bera, M. (2001). “Hydrologic and Sediment Transport Modeling of Agricultural Watersheds.” Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2001, American Society of Civil Engineers, Orlando, Florida.
- Bras, R.L. (1990). *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Reissued in 1988, McGraw-Hill, New York.
- Colleen O.D., Laura C.B., Jordan S.L., and Edwin P.M. (2006). “A spatially distributed model for the dynamic prediction of sediment erosion and transport in mountainous forested watersheds.” *Water Resource Research*, Vol. 42, W04417.
- He, Z., Wu, W., Yuan, Y., and Wang, S.Y. (2007). “Simulation of Soil Erosion and Sediment Transport Using a Physically-based Integrated Surface-Subsurface Model.” Proceedings of World Environmental and Water Resource Congress 2007, American Society of Civil Engineers, Tampa, Florida.
- Jang, P., Matt F., William S., and Paul, E. (2008). “Soil Erosion and Sediment Yield Modeling with the Hydrologic Modeling System (HEC-HMS).” Proceedings of World Environmental and Water Resource Congress 2008, American Society of Civil Engineers, Honolulu, Hawaii.
- Jeong, W.J. (2014). Rainfall-Runoff-Erosion-Sediment Transport Modeling of Naesung Stream Watershed after Dam Construction using a Distributed Watershed Model. M.S. Thesis, Myongji University, Yongin-si, Korea.
- Ji, U., Hwang, M.H., Yeo, W.K., and Lim, K.S. (2012). “Risk Assessment and Potentiality Analysis of Soil Loss at the Nakdong River Watershed Using the Land Use Map, Revised Universal Soil Loss Equation, and Landslide Risk Map.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 6, pp. 617-629.
- Ji, U., Julien, P.Y., and Hwang, M.H. (2014). “Risk assessment of watershed erosion at Naesung Stream, South Korea.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 136, pp. 16-26.
- Jia, Y., Kinouchi, T., and Yoshitani, J. (2005). “Distributed hydrologic modeling in a partially urbanized agricultural watershed using water and energy transfer process model.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 253-263.
- Joris, V., Jean, P., Gert, V., Anton, V.R., and Gerard, G. (2008). “Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain.” *Global and Planetary Change*, Vol. 60, No. 3-4, pp. 393-415.
- Julien, P.Y. (1998). *Erosion and Sedimentation* (First Edition). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim, B.S., Kim, B.K., and Kim, H.S. (2009). “Parameter Sensitivity Analysis of VfloTM Model in Jungnang Basin.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 6, pp. 503-512.
- Kim, J., Son, K., Noh, J., and Lee, S. (2008). “Estimation of Suspended Sediment Load in Imha-Andong Watershed using SWAT Model.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 30, No. 12, pp. 1209-1217.
- Koo, B.K., and Cho, J.H. (2007). “Estimating Temporal and Spatial Variation of Sediment Transport Processes using a Distributed Catchment Model.” *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 23, No. 6, pp. 872-880.
- KOWACO (2011). Long and Short Terms Watershed Sediment Model Development and Sediment Discharge Analysis at the Main Points (1st year). Report 2011 (in Korean), Korea Water Resources Corporation,

- Daejeon-si, Korea.
- KOWACO (2012). Long and Short Terms Watershed Sediment Model Development and Sediment Discharge Analysis at the Main Points (2nd year). Report 2012 (in Korean), Korea Water Resources Corporation, Daejeon-si, Korea.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H. (1982). *Hydrology for Engineers (Third Edition)*. McGraw-Hill, New York.
- MLTMA (2013). *River Maintenance Planning of Naesung Stream Section (Downstream Part)*. Report 2013 (in Korean), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea.
- Moore, I., and Burch, G. (1986). "Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory." *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 8, pp. 1350-1360.
- Park, S.S., Park, W.H., and Lee, J.T. (2008). "An Assessment of Optimized Parameter and Grid Size for Landuse of the Grid Based Model." Proceedings of Korea Water Resources Association 2008, Korea Water Resources Association, Kyongju, Korea.
- Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L., and Shirmohammadi, A. (1993). "Infiltration and Soil Water Movement." In *Handbook of Hydrology* ed. D.R. Maidment. McGraw-Hill, Inc., New York, pp. 5.1-5.51.
- Rojas, R., Velleux, M., Julien, P., and Johnson, B. (2008). "Grid Scale Effects on Watershed Soil Erosion Models." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 793-802.
- Tarboton, D. (1997). "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 309-319.
- USACE (1998). *HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual*. Report: CPD-1A, U.S. Army Corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center, Davis, California.
- Velleux, M., Julien, P., Rojas-Sanchez, R., Clements, W., and England, J. (2006). "Simulation of metals transport and toxicity at a mine-impacted watershed: California Gulch, Colorado." *Environmental Science and Technology*, Vol. 40, No. 22, pp. 6996-7004.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting Soil Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Agricultural Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., and Goodrich, D.C. (1990). KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Research Service, ARS-77.
- Yang, C.T. (1996). *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill, New York.
- Zeinivand, H., and Smedt F.D. (2009). "Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale." Proceedings of World Environmental and Water Resource Congress 2009, American Society of Civil Engineers, Kansas City, Missouri.

paper number : 14-095

Received : 22 September 2014

Revised : 22 October 2014 / 30 October 2014

Accepted : 30 October 2014