

GeoWEPP model을 이용한 화강암과 변성암 기반 두 소유역에서의 토사유출 특성 분석*

김민석**

Analysis of Sediment Yield properties in Two Small Watersheds situated under Granite and Gneiss Using GeoWEPP model

Min Seok Kim**

요약 : 지형학적인 관점에서 토사유출에 대한 연구가 중요하지만, 재해에 있어서도 토사의 발생원인 및 규모에 대한 정확한 예측 및 정량적 평가 역시 필요하다. 더욱이 우리나라와 같이 다양한 지질조건 기반에서 토사유출에 대한 연구가 중요함에도 대부분의 연구는 모형의 정확성 평가에 초점이 맞추어져 있다. 본 연구에서는 화강암과 변성암 기반의 소유역에 전 세계적으로 평가받고 있는 GIS와 결합된 Water Erosion Prediction Project (GeoWEPP) 모형을 평가한 후 토사유출의 특성분석에 대해 연구하였다. 연구기간 동안 화강암 지역과 변성암 지역에서의 실측 토사유출량은 270.54tons과 31tons으로 각각 나타났다. 또한 모형의 계산결과와 실제 측정 자료와의 비교 결과 화강암 지역에서 283 tons으로 실측치와 비교하여 -12.46tons의 오차를 보였으며, 변성암지역에서는 30.1tons으로 실측치와 비교하여 0.9tons의 오차를 나타냈지만, 두 지역 모두 합리적인 모델링 결과를 얻었다. 하지만, 모형의 가정을 벗어난 형태의 지형변화가 관측되고 있었기 때문에 이에 대한 정밀 지형조사와 모니터링을 통해 GeoWEPP의 가정과 비교해 볼 필요가 있다.

주요어 : GeoWEPP 모형, 토사유출, 화강암, 변성암

Abstract : In the view of geomorphology, the study on sediment yield is not only an important issue that needs to be addressed, but they are vital for the prediction and evaluation of natural hazards. Many studies are focused on the accuracy of model performance, although sediment yield researches based on various types of geologies are also important. To investigate the properties of sediment yields on two different geologies, i.e. granite and gneiss in small watersheds, the GeoWEPP model, which is integrated with GIS and Water Erosion Prediction Project model, was applied in this research. During the monitoring period, the amount of sediment yield was measured to be 270.54 tons at the granite area and 31 tons at the gneiss area. The results showed that when the measured data and simulated data were compared, an acceptable difference of -12.46 and +0.96 were observed for the granite area and gneiss area, respectively. However, though the model showed acceptable performance, it is still necessary to compare the model assumptions with the surveyed geomorphological investigations. This suggestion is necessary due to some geomorphological variations detected in both research sites, which deviates from the model assumption.

Key Words : GeoWEPP model, Sediment yield, Granite, Gneiss

*본연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 '실시간모니터링 기반의 산사태신속탐지기술 개발'과제의 일환으로 수행되었습니다.

**충남대학교 국제수자원연구소 연구원(Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University, varcgisv@gmail.com)

I. 서론

토양침식은 그 발생 원인에 따라 물에 의한 침식, 바람에 의한 침식, 중력에 의한 침식 등으로 구분될 수 있으며, 국내의 토양침식의 주요형태는 표토층 유실과 토양층 붕괴로써 집중 호우에 의한 침투 및 토양 포화도의 변동에 따른 물과 중력에 의한 침식현상이 복합적으로 발생하고 있다(백용 등, 2005). 지형을 급격하게 변화시킬 수 있는 중요한 요소 중 하나인 토사유출은 자연 재해 연구에서도 가장 중요한 요소 중 하나로 분류할 수 있다. 이는 기후변화 등으로 인해 국지적 집중호우의 발생빈도가 높아져 토사로 인한 재해의 위험이 증가하고 있기 때문이다(정재학·이종철, 2008). 우리나라의 경우 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있는 지형 특성과 국토의 지속적인 개발로 인해 매년 집중호우로 인한 토사유출이 발생하여 피해면적 및 복구비가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(이수근 등, 2008). 따라서 침식 및 토사유출로 인한 피해를 예방하고 대응방안을 수립하기 위해서는 토양침식의 발생원인 및 규모에 대한 정확한 예측 및 정량적 평가가 필요하다(오성렬·이기하, 2013).

최근 급격한 기후변화로 인한 여름철에 집중적으로 발생하는 국지성 호우, 태풍 그리고 장마로 인해 자연사면 유역에서 토양층 붕괴작용이 증가(국립방재연구소, 2003; 김진관 등, 2004b; 한국지질자원연구원, 2006)하고 있으며 이로 인해 급격하게 유실된 토사는 산지 소하천 및 하천으로 유입되어 하상고를 상승시켜(우효섭·김창환 1998; 김원, 2006) 홍수재해의 위험성 등이 점점 증가되고 있다. 특히 하천의 최상류에 해당하는 산지 소하천에서는 그 유량에 비해 많은 양의 토사를 운반하고 있으며, 때로는 표층붕괴(shallow failure) 또는 구곡(gully) 형성 등과 같은 다량의 토사공급으로 인한 토사류를 형성하면서 재해를 발생시키기도 한다(김진관 등, 2004a).

특히 2002년과 2003년의 태풍 루사와 매미로 경남 및 강원 지역에서 많은 산사태 및 토사유출이 발생함으로써 대규모의 인명 및 재산 피해가 발생하였다(국립방재연구소, 2002a; 2002b). 그리고 2004년 태풍 메기에 의해 강원도에 발생한 침수 피해 중 상당수는 하천의 상류부에서 유입된 토사로 인한 하천 범람이 원인이었다. 이에 대한 대책으로 하상의 준설이나 제방의增高 등이 거론될 수 있으나 근본적인 대책은 상류부 산지의 토사가 하

천으로 유입되는 것을 조절하는 것이다. 토사유출을 저감하기 위해서는 토사생산의 발생장소, 시간, 규모, 이동 형태를 정확하게 파악하고, 그것이 어떤 경로로 유출하는가를 예측할 필요가 있으며 이러한 연구는 매우 중요하다(Rose, 1993; Burgoa and Wauchope, 1995; 김진관 등, 2004a).

현재 국내에서는 토사유출량 산정을 위하여 미국에서 개발한 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier and Smith, 1978)과 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation)을 주로 사용하고 있다(신영규·김종욱, 2004; 신원호, 2004; 김진관 등, 2004b; 김민석, 2006). 그러나 이러한 공식들은 미국의 중동부 지역 토지 이용 방식의 변화에 따른 토사유출량의 변화와 조절을 주목적으로 개발된 경험공식으로 공식의 각종 독립인자 및 계수가 미국의 일부 지역에 적합하도록 개발되어 우리나라에 대해서는 실험적으로 적용성이 검증되지 않은 단점이 있다. 또한 공식을 실제로 적용할 때 설계자의 주관적 판단이 요구되는 경우가 많다.

이를 보완하고자 미국 농업 연구청(USDA-ARS), 미국 농무부 산하 산림청, 미국자연자원 보호청 그리고 미국 토지관리국과 미국 지질조사소의 연구자들에 의해서 개발된 분산형 모델인 WEPP(Water Erosion Prediction Project)은 물리적 방법에 기초한 토양 침식모델로 토양 구조, 기후, 지표이용도, 지표 상태에 따른 토양침식과 퇴적량의 추정이 가능하다. 더욱이 GIS상에서 공간 분석이 가능하게 수정된 GeoWEPP은 토사 유출량 연구에 있어서 주관적인 판단을 최대한 배제하고, 실제 자료의 활용성을 높인 모형으로 전 세계에서 현재 많은 검증과 정확성을 평가 받고 있다(Nearing *et al.*, 1989; Risse *et al.*, 1994; Flanagan and Nearing, 1995; Zhang *et al.*, 1996; 신원호, 2004). 하지만 국내에서 GIS기반의 GeoWEPP모형을 적용시킨 예가 드물며, 특히 지질별로 실제 분석 자료의 입력을 통해 측정된 데이터를 이용한 예는 드물다.

본 논문에서는 물리학기반의 토양침식 모델인 GeoWEPP model(Renschler, 2003)을 이용하여 두 개의 서로 다른 지질을 갖는 자연유역에서 측정된 토사유출량을 모형의 결과와 비교 산정 후 모형의 정확성과 적용 가능성을 비교 검토하였다.

II. Model의 기본 이론과 입력자료의 산정

1. GeoWEPP 모형의 소개

분산형 모델인 WEPP(Water Erosion Prediction Project)은 물리적 방법에 기초한 토양 침식모델로 토양과 수자원 보전, 환경계획 및 평가에 사용되고 있는 (R)USLE를 대체할 목적으로 만들어진 물리적 기반의 토양유실 산정모형이다. 단일포장 형태의 경사지나 복합경사지로 이루어진 유역의 강우에 의한 유출 및 토양침식량을 예측할 수 있으며, 유사전달율을 고려한 토사 유출량(sediment yield)을 산정할 수 있다. 이 모형은 여러 개의 부모형으로 구성되어 있으며 다음과 같다. 추계학적 방법으로 여러 기상자료를 생성해 내는 기상생성 부모형(Weather Generation Component), 강우 지속시간과 강도를 강우 사상에 적용할 수 있도록 수정된 Green-Ampt 모형으로부터 침투율을 결정하여, 지표면 운동량 방정식을 이용하여 강우와 침투의 비는 지표 수문학 부모형(Surface Hydrology Component)으로 산정한다. 고정된 스프링클러나 고랑 관개 시스템에 의한 토양유실량 추정은 관개 부모형(Irrigation Component)을 통해 이루어지며, 지표 수 유출은 지표 수리학 부모형(Overland Flow Hydraulics Component)을 통해 이루어진다. 뿌리 주변(root zone)에서의 토양수분과 증발산량을 계산하는 물 수지 부모형(Water Balance Component)과 작물 성장과 그에 따른 수문 및 토양유실 과정에 대한 영향을 고려하기 위한 작물성장 부모형(Plant Growth Component)으로 구성되어 있으며, 또한, 작물 잔류물질의 분해 및 처리효과를 고려하는 잔류물질 분해 부모형(Residue Decomposition Component), 수문학 및 침식에 영향을 미치는 여러 토양특성을 다루는 토양인자 부모형(Soil Parameters Component), 사면에서의 강우에 의한 토립자의 분리 및 이송, 그리고 퇴적을 다루는 사면침식과 퇴적 부모형(Hillslope Erosion and Deposition Component), 복합사면과 수로로 이루어진 유역에서의 수문학과 침식과정을 다루는 유역수문학 및 침식과정 부모형(Watershed Channel Hydrology and Erosion Processes Component), 유역에서 여러 수공구조물에서의 침전효과를 고려하는 유역 수공구조물 부모형(Water Impoundment Component) 등 이상의 독립적인 여러 부모형으로 이루어져 있으며, GeoWEPP의 개념도는 그림 1과 같다.

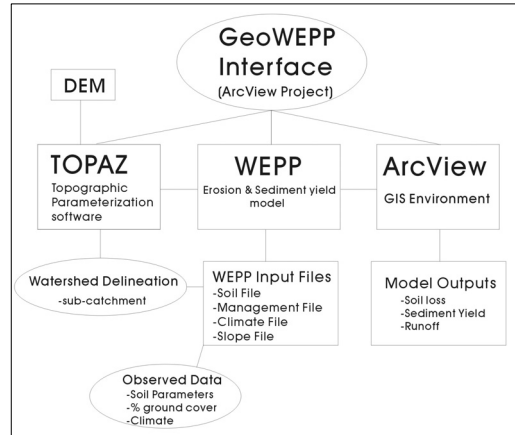


그림 1. GeoWEPP 모형의 개념도

III. 모형의 적용을 위한 연구지역

1. 화강암지역

경기도 이천에 위치한 실험유역의 전체 면적은 약 0.29km^2 이며 고도분포는 79-179m로 비교적 낮은 산지이다(그림 2A). 유역의 전체적인 사면방향은 남서방향이며 평균경사는 약 28.98%이다. 연구 유역의 지질은 강풍화의 흑운모화강암으로 구성(김민석, 2006)되어 있으며, 토양은 농업

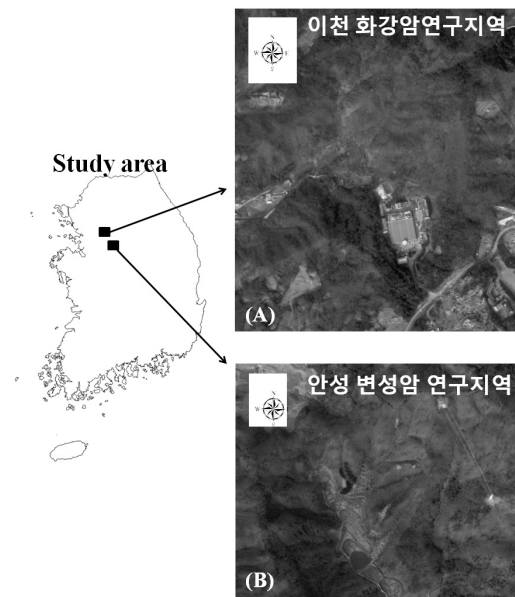


그림 2. 화강암 연구지역(A)과 변성암 연구지역(B)

표 1. 연구지역의 개략적인 특성

지역	이천(화강암)	안성(변성암)
유역면적 (km ²)	0.29	0.25
고도 (m)	Minimum 80 Maximum 175	90 240
사면경사 (degree)	Minimum 0 Maximum 47.1 Mean 15	0 52.2 20
연강수량 (mm)	1303	1269

과학연구원의 토양통 분류 기준으로 삼각과 사촌이며, 자갈이 없는 사양질 양토로 이루어져있다. 이 유역의 주된 식생은 리기다 소나무, 아까시나무, 밤나무 등이 조립된 식재림으로 구성되어 있다. 이 유역의 1971년~2004년까지의 30년간 자료를 평균한 결과, 연평균기온은 11.2도이며 6~8월은 20도를 넘고, 12월~2월에는 0도 이하로 낮게 유지된다. 강수량은 연평균 1329.5mm이며 6월~9월에 각각 100mm 이상이 내리며, 이때 내리는 강수량은 924.9mm로 전체 강수량에 69.6%에 해당하여 하절기에 강수가 집중된 양상을 보인다(김진관 등, 2004b).

2. 변성암 지역

경기도 안성시에 위치한 실험유역의 전체면적은 약 0.25km²이며 고도분포는 90~240m로 비교적 낮은 산지이다(그림 2B). 연구유역의 지질은 경기편암 복합체의 변성암류로 구성되어 있으며 엽리 또는 편리와 같은 층상 구조가 발달되어 있다. 이 지역은 표고가 높은 지역에 침활혼효의 자연림이, 표고가 낮거나 주거지에 가까운 지역은 리기다 소나무, 잣나무, 아까시나무, 밤나무 등이 조립된 식재림으로 되어 있다. 이 연구지역은 1950년대까지 땔나무와 목재용으로 남벌되어 산림이 황폐되었다가 60년대부터 산림녹화 정책을 강력히 시행한 이후에 조성된 2차림으로 식생의 상태는 좋지만, 표토층의 두께가 얇아서 나무의 뿌리가 직선으로 깊이 박히지 못하고 지표면과 평행하게 발달되어 있다(박용원 등, 1993).

3. 입력 자료의 구축과 토사유출량 측정

기상자료는 일별 모의를 위한 경우에는 일별 강우자료를 입력하고, 폭우사상별 모의를 위해서는 강우량자

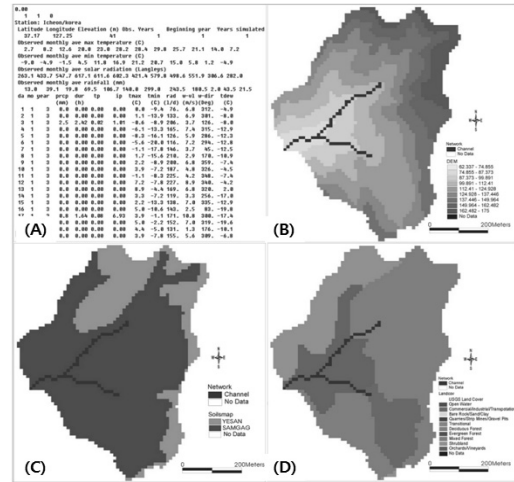


그림 3. 화강암지역에서의 입력자료

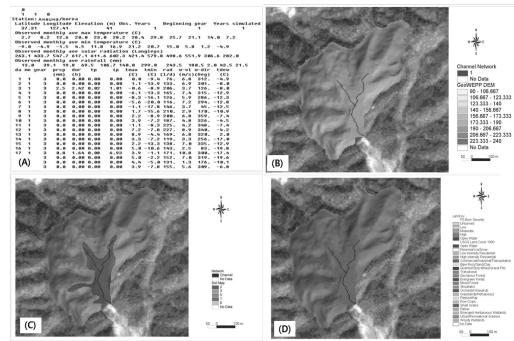


그림 4. 변성암지역에서의 입력자료

료를 시간별로 나눠서 입력하는 Break point 방법을 사용하거나 CLIGEN을 이용하여 강우 데이터를 생성하게 된다. 본 연구에서는 기상청의 이천과 안성에서 측정된 일 년 동안의 강우자료를 이용하여 모의하는 방법을 사용하였다. 지형자료는 경사지의 길이, 폭, 경사도에 관련된 자료이며, 국토지리정보원의 1/5,000 수치지형도를 이용하여 입력하였다. 토양자료는 모래, 점토, 유기물, 암석파편 함유율, 양이온치환능(CEC) 등의 토양조성에 관련된 자료 그리고 토양의 유효수리전도도 등의 자료이다. 이 중 토양 조성에 관련된 자료는 입도분석 등의 실내실험을 통해서 얻은 결과를 사용하였으며, 토양 침식능과 유효수리 전도도 등의 자료는 WEPP 모형에서 제공하는 추정절차를 사용하였다. 두 지역에서 구축한 입력 자료는 그림 3과 그림 4와 같다.

그림 3과 4에서 순서대로 (A)는 기상자료, (B)는 지형

표 2. 화강암과 변성암지역의 토양성질

토양샘플	자갈	모래	실트/점토	투수계수	포화도	습윤밀도	포화밀도	건조밀도
	Grain size analysis (%)			Permeability (cm/sec)	Degree of Saturation (%)	Density (g/cm ³)		
	Gravel (> 2 mm)	Sand (2 mm >)	Silt/Clay (1/16mm >)			Wet density	Saturatio density	Dry density
이천	0.94	93.14	5.92	5.80E-03	38.50	1.62	1.89	1.44
안성	20.64	75.71	3.65	1.49E-02	56.01	1.45	1.78	1.26

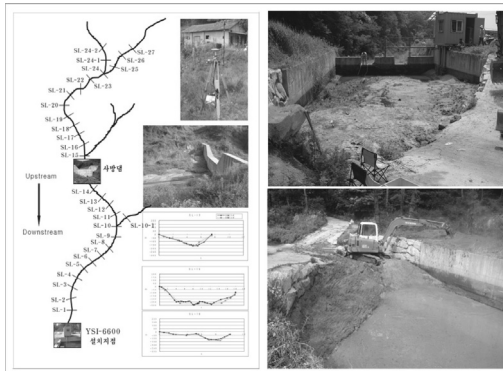


그림 5. 2004년 5월부터 2005년 4월까지 퇴적된 이천 연구지역의 토사유출량 측정

출처 : 김민석 등, 2007a.

자료, (C)는 토양자료 그리고 (D)는 토지피복 자료이다. 토양자료의 경우, 농업토양도에서 반영하지 못하는 자료가 많아 연구지역에서 추가적인 토양샘플을 채취하여 다양한 실험을 실시하였으며, 모형의 입력 자료로 추가 실시하였다(표 2).

화강암지역에서의 정확한 토사유출량을 산정하기 위해 2004년 5월 강우가 시작하기 전 포크레인을 이용하여 하류에 설치되어있는 소규모 위어(weir)의 퇴적물을 수거하여 무게로 환산 하였으며, 다음년도 강우가 시작되

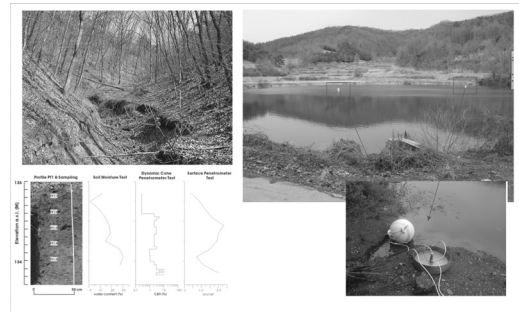


그림 6. 안성 연구유역에서의 토사유출량의 측정

* 김민석 등(2007b)에서 수정.

기 전 2005년 4월까지 퇴적된 양을 합산하여 2004년도의 총 토사유출량을 산정 하였다. 그리고 상류의 사방댐은 GPS를 이용하여 사방댐 내의 면적을 측정하여, 하류부에서와 같은 시기에 측량을 하여 입도 분석을 통해 나온 모래의 비중 값인 1.65를 사용하여 분석에 이용하였다.

변성암지역에서는 연구 지역내 토사유출량 측정을 위하여 소규모 저수지내에 지름 50cm의 sediment trap 실험장비 2개를 물의 유입구와 유출구에 각각 설치하고 한 달에 한 번 장비안에 퇴적된 퇴적물을 수거하여 실험실에서 건조 후 무게를 평균(표 3)하여 1년간의 토사유출량을 산정 하였다.

표 3. 변성암지역 저수지내 퇴적물의 건조 후 무게

날짜	기간 (일)	유입부 (g) (a)	유출부 (g) (b)	무게 (g) (c)=(a)+(b)	평균무게 (g) (d)=(c)/2
20-Jun-05	32	유실	236.83	236.83	236.83
22-Jul-05	32	유실	236.83	236.83	236.83
18-Aug-05	27	811.95	154.74	966.69	483.35
11-Oct-05	54	255.72	132.07	387.79	193.90
2-Dec-05	52	164.97	135.29	300.26	150.13
3-Mar-06	91	35.40	48.15	83.55	41.78
5-Apr-06	33	82.50	62.32	144.82	72.41

IV. 결과 및 토의

1. 모형의 정확성 분석

그림 7은 GeoWEPP 모형을 이용하여 토사유출량을 계산한 결과이며, (A)는 화강암지역 (B)는 변성암지역의 토양침식과 퇴적이 발생할 수 있는 맵의 결과이다. 그림 7에서 적색으로 보이는 부분이 토양 침식량이 4tons/year 이상의 침식이 발생 할 수 있는 위험 지역이며, 그보다 덜 진한 적색은 3~4tons, 분홍색은 2~3tons, 녹색 및 연녹색은 1tons 이하의 값을 보이는 부분이다. 노란색은 약 1ton 정도의 퇴적을 보이는 지역으로 도시된다. 화강암연구지역(그림 7A)은 유출구에서 상류방향의 왼쪽 사면에서 토양침식이 우세함을 나타내고 있으며, 변성암 연구지역은 계곡을 중심으로 상부사면에서 토양의 침식이 발생하는 것으로 나타났다.

표 4는 실제 측정자료와 GeoWEPP 모형을 이용해 계산된 결과를 비교한 표이다. 화강암지역에서 실제 측정된 토사유출량의 결과(270.54tons)와 모형에서 계산된 결과(283tons)의 비교를 통해 약 -12.46 tons의 오차를 보였다. 측정된 결과를 100%라 하면 모형의 결과에서 약

96.62%의 정확성이 나타났다. 또한 변성암지역에서 실제 측정된 토사유출량은 31tons이었으며, 모형을 이용해 계산한 결과는 30.1tons을 나타내어 약 0.9tons의 오차를 보였다. 화강암 지역과 마찬가지로 측정된 결과인 30.1tons을 100%라 하면 약 97.1%의 정확성이 나타났다. 이는 두 지역 모두 모형의 정확성이 우수함을 의미한다. 여기서, 두 지역에 대한 총 토사유출량의 오차는 부유사에 기여한 것으로 판단이 된다. 화강암 연구지역의 경우 김진관 등(2009)에 의하면 유역내에서 부유사가 상대적으로 많이 발생하는 것으로 보고하고 있지만 본 연구에서 실측 값에 정확한 부유사의 양을 산정하지 못하였다. 더욱이 안성의 경우에는 약간의 과추정을 한 것으로 나타났는데 이 역시 부유사의 영향 일 수 있다. 일반적으로 저수지의 경우 물이 저장되므로 퇴적물이 공간에서 이동되는데 제약이 발생할 수 있다. 표 3의 퇴적물 결과를 보면 유입부분(inlet)에서의 퇴적물 양이 방류부분(outlet)에서의 퇴적물 양보다 상대적으로 많은 것을 알 수 있으며, 이는 퇴적물의 이동이 저류된 물안에서 상대적으로 적은 것은 이를 지시할 수 있다. 즉, 이런 부유사에 대한 부분을 모형에 반영할 수 있다면 아마도 모형의 정확성은 더 향상될 것으로 판단된다.

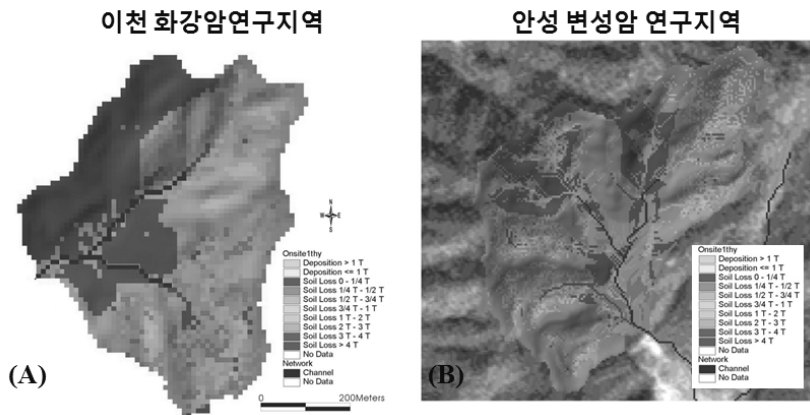


그림 7. 이천 화강암연구지역 (A)와 안성 변성암 연구지역(B)에서의 GeoWEPP 결과

표 4. 실제측정자료와 계산된 토사유출량의 비교

지역	퇴적물 모니터링 및 모형의 시물레이션 기간	측정된 토사유출량 (a) (tons/year)	계산된 토사유출량 (b) (tons/year)	실측 (a) - 계산치 (b) (tons/year)
이천 (화강암)	2004년 5월 ~ 2005년 4월	270.54	283	-12.46
안성 (변성암)	2005년 5월 ~ 2006년 4월	31	30.1	0.9

2. 화강암과 변성암 유역에서의 토사유출 특성

토사유출량을 계산하기 위해 GeoWEPP에서 사용하고 있는 세류(rill)와 세류간 침식(interrill erosion) 개념은 부정류연속방정식(Foster and Meyer, 1972)인 Foster's equation(1972)을 사용한다. 이 식은 확장하고 있는 구곡이나 하천에 의한 침식 및 퇴적을 계산하는 것이 아니고 구곡이나 하천을 통하여 퇴적물이 이동된 양을 모의하는 것이므로(Merritt *et al.*, 2003), 이는 사면에서 침식된 퇴적물이 하천으로 얼마나 유입되는지에 따라 유출구에서 채취한 퇴적물의 양에 영향을 미친다.

대부분의 침식과정은 우적에 의한 토양분리와 면상침식, 세류와 세류간 침식의 형태를 보인다(양동운 등, 2005). 즉 강우에 의해 발생하는 유출로 인해 퇴적물이 이동하게 된다. 그럼에도 불구하고 한국지질지원연구원(2006)에 의하면 안성의 경우 이천보다 약 $10,000\text{m}^3/\text{year}$ 의 유량이 많은데도 불구하고 실제 토사 유출량이나 모델링의 결과는 약 9배가 적다. 이는 식생 효과 및 기온에 떨어져 지표표를 피복하고 있는 나뭇잎의 영향으로 보이는데, 이는 실제 자연 사면에서는 위에서 서술한 침식양상을 대부분 찾아 볼 수 없었기 때문이다. 또한 이는 모델링 입력 자료와 결과인 그림 3C 과 그림 4C 에서 볼 수 있듯이 침엽수림 및 노출된 토양에서의 침식이 활엽수보다 많이 나타날 것으로 예측되었다.

또한, 토양자료 중 입도 자료의 경우 모래와 세사/점토의 함량에 따라 유출량이 달라지는데 이는 토양침식에 관련된 변수 등에 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 김진관 등(2007)은 침투율은 총강우량이 증가할수록 감소하는 경향이 있으며, 이는 표면의 sealing과 crusting (Agassi *et al.*, 1994)으로 해석할 수 있다고 보고하였다. 이와 더불어 침투율 감소에 따라 유출량은 증가한다고 설명하였으며, 유출량 증가의 원인을 높은 세사와 점토의 함량으로 보았다. 이천의 경우 토양층 입도분포에서 자갈의 함량은 0.94%에 불과하고 모래의 함량이 93.14%, 그리고 세사와 점토가 5.92%이며 안성의 경우 자갈의 함량이 20.64%, 모래의 함량이 75.71% 그리고 세사와 점토가 3.65%로 자갈과 모래는 많은 차이를 보이나 세사와 점토의 경우는 거의 비슷한 수치를 보인다. 하지만 실제적으로 이천지역에서 침식되어 퇴적된 토사와 안성지역에서 침식되어 퇴적된 토사를 비교해 보면 안성지역에서 세사와 점토의 함량이 더 높게 나타났다. 이는

안성유역이 세사와 점토의 함량이 이천 화강암 유역보다 상대적으로 더 높아 유출량이 더 많아졌다는 김진관 등(2007)의 연구결과와 유사하지만 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

3. 붕괴 해석 메커니즘의 차이

표 1은 본 연구지역의 개략적인 내용을 정리한 것이다. 이천 화강암 유역과 안성 변성암 유역의 유역면적, 고도, 사면경사 그리고 연평균강수량 등을 비교한 결과 큰 차이를 보이지는 않았다. 하지만 유역 내에서 발생한 실제 두 지역의 실측 토사유출량을 비교한 결과, 화강암 유역에서의 토사유출량은 $270.54\text{tons}/\text{year}$ 로, 변성암 유역에서의 $31\text{tons}/\text{year}$ 에 비하여 실측결과가 약 7배의 차이를 보여 변성암지역에서보다 화강암 지역에서의 토사유출량이 상대적으로 많음을 나타냈다.

또한, GeoWEPP 모델링 결과도 마찬가지로 변성암 지역에서보다 화강암 지역에서의 토사유출량이 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 이는 아마도 많은 연구자들이 밝혔듯이 지역적인 특성 지형을 묘사하지 못한 자료의 한계일 수 있다. 그림 5와 그림 6은 각 연구지역의 모습을 나타낸 것으로 실제 수치지형도내에서는 이런 구곡 등이 묘사되어 있지 않은 경우가 많다. 즉, 이렇게 지형의 완벽한 형태를 반영되지 못한 문제점이 있을 수 있지만, 이는 또한 붕괴 메커니즘의 차이로 해석 할 수 있다.

구곡이 발생되어 있다는 의미는 침식 및 수문 모형에서 가정하고 있는 우적에 의한 토양분리와 면상침식, 세류간 침식 등의 형태를 해석하는 범주를 벗어난다. 이는 지표류 보다는 토양 내에서 흐르는 지하수(subsurface flow)의 영향으로 토양의 수 cm 깊이부터 기반암 위에서 발생하는 표층 붕괴(Montgomery *et al.*, 1994)의 메커니즘에 가까운 것으로 생각된다. 즉, 침식 모형과 이런 붕괴 모형은 다른 해석방법을 가지고 있기 때문에 토사유출량에서 차이가 발생했을 가능성이 높다.

김진관 등(2009)에서 이천의 화강암 유역에서 토양수분압을 모니터링한 결과 강우에 의한 하부에서 상부로 반응하는 지표하 흐름 형태를 관측했으며 더욱이 구곡의 형태를 갖는 붕괴가 발생한 것으로 보고하고 있다. 또한, 한국지질자원연구원(2007)의 변성암지역 모니터링 결과에 의하면 반응시간이 늦지만, 갑작스런 호우에 유출특성이 달라지는 것을 관측하였다. 이와 같은 결과

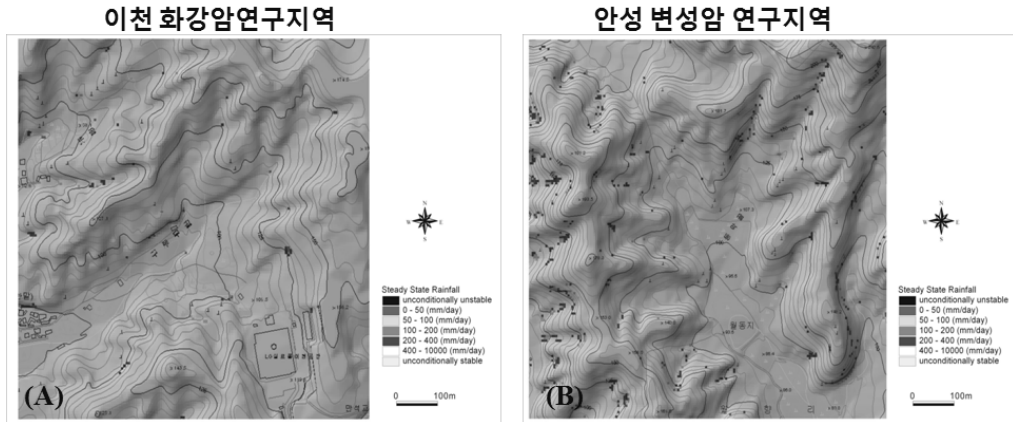


그림 8. 표층붕괴 모형(SHALSTAB)을 이용한 산사태 발생의 예측분석

는 일반적인 수문 또는 침식 모형에서 해석하기 어려운 측면이 있다는 것을 의미하기 때문에 표층 붕괴의 현상을 고려해 보았다. 이를 위해 전 세계적으로 평가를 받고 있는 지형기반의 물리학모형인 SHALSTAB 모형(Zizioli *et al.*, 2013)을 이용하여 5m 해상도의 DEM을 기준으로 두 지역에 대한 표층붕괴 모델링을 실시하였으며, 이때 두 연구지역에서의 서로 다른 붕괴 메커니즘의 가능성이 확인되었다. 그림 8은 SHALSTAB을 이용하여 두 지역의 표층붕괴를 예측한 것으로 그림 8A는 이천 화강암 연구지역의 결과이며, 그림 8B는 변성암 연구지역에서의 결과이다. 그림 8A의 이천 화강암 연구지역에서는 붕괴에 의한 메커니즘은 적은 것으로 나타난 반면, 그림 8B의 안성 변성암 연구지역은 붕괴에 의한 메커니즘이 큰 것으로 나타났다. 본 연구에서는 토양 표면의 침식 메커니즘을 이용하여 두 지역에 대한 해석을 실시하였기 때문에 정확한 모형간 비교는 어렵다. 하지만, 이런 붕괴 메커니즘은 기반암과 토양층의 영향에 의한 지표하 흐름(subsurface flow)으로 인해 발생 될 수 있다. 그러므로 추후 연구에서는 연구지역의 정밀 지형조사 및 모니터링을 통해 다양한 지질별 지표면과 지표하의 수문학적 메커니즘에 대한 연구가 필요하다.

V. 결론

토사에 의한 침식 및 퇴적을 연구함에 있어 지질, 지형에 의한 토양유실의 발생원인 또한 다양하며 그 과정의 복잡성으로 인해 정확한 토양 유실을 예측하기는 어려

운 일이다. 본 연구에서는 물리학 기반의 과정지향적 모델인 GeoWEPP을 이용하여 경기도 이천 화강암 소유역과 경기도 안성 변성암 소유역의 자연사면유역을 대상으로 연간 토사유출량을 모의하고 실제 측정된 토사량과 비교·검토하였다.

실제 화강암과 변성암 연구지역에서 토사유출량을 실측한 결과 화강암지역이 변성암 지역에 비하여 많은 토사유출량을 보였다. GeoWEPP 모형을 서로 다른 두 지역에 적용시킨 결과 실제 관측된 자료와 계산한 자료가 거의 비슷함을 보였고 또한, 실측 자료와 마찬가지로 화강암지역에서 토사유출이 변성암 지역에 비하여 7배 이상 발생하는 것으로 나타났다. 이는 이러한 복합특성을 보이는 유역에 대해서 GIS상에서 운영되게 개발되어 그 적용성을 평가 받고 있는 GeoWEPP Model의 이용이 필요할 것으로 보인다. 하지만, 실제 유역에서의 토사유출은 모형의 가정인 세류간 침식보다는 구곡침식 등과 같은 형태가 발생된 것으로도 나타났다. 이는 침식 및 수문 모형에서 가정하고 있는 우적에 의한 토양분리, 면상 침식, 세류 및 세류간 침식의 형태를 해석하는 범주를 벗어난다. 그러므로 정밀 지형조사와 모니터링을 통해 지표면과 지표하의 수문학적 메커니즘이 GeoWEPP에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

국립방재연구소, 2002a, 「재해영향평가대상저감시설 설치기준 개발」, 행정자치부.

- 국립방재연구소, 2002b, 「재해영향평가 실무지침서」, 행정자치부.
- 국립방재연구소, 2003, 「지리정보시스템을 이용한 사면붕괴 재해 연구」.
- 김민석, 2006, “산지 토사유출 산정을 위한 GeoWEPP Model의 적용 연구,” 충남대학교 석사학위논문.
- 김민석·김진관·양동운, 2007a, “소유역에서의 토사유출 산정을 위한 GeoWEPP model과 USLE의 비교·적용 연구 - 이천시 단월동 유역을 사례로,” *자원환경지질*, 40(1), 103-113.
- 김민석·김진관·양동운·정관수, 2007b, “Process based erosion model을 이용한 자연사면에서의 토사유출 산정: 편마암지역 사례연구,” *한국지형학회지*, 14(4), 107-116.
- 김원, 2006, A Proposal for New Flood Management Policy in Korea, *International Symposium on Sustainable Flood Control*.
- 김진관·양동운·김주용, 2004a, “토양피침식력(Kfactor)의 다양성연구-자연강우에서의 토양 침식구 실험을 통하여,” *한국지형학회지*, 11(3), 37-46.
- 김진관·양동운·김주용·박종관, 2004b, “유량-탁도 관계를 이용한 산지 소하천에서의 토사유출량 산정에 관한 연구,” *한국지형학회지*, 11(3), 25-36.
- 김진관·김민석·백봉현·양동운, 2007, “점토함량, 경사, 그리고 토양수분변화가 우곡간 침식에 미치는 영향: 단일크기 복합인공강우기를 이용하여,” *한국지형학회지*, 14(3), 115-121.
- 김진관·양동운·김민석·김주용·신현모, 2009, “화강암지대 산사면에서의 구곡발달,” *한국지형학회지*, 16(3), 87-100.
- 박용원·김감래·여운광, 1993, “1991년 용인-안성지역 산사태 연구,” *한국지반공학학회지*, 9(4), 103-116.
- 백용·권오일·김승현·구호본, 2005, “집중호우시 사면붕괴의 특성 및 토층 심도와 하수변동에 따른 사면안정성 해석,” *지질공학회논문집*, 15(1), 57-66.
- 신영규·김종옥, 2004, “대관령 지역의 토지 이용이 오염물 유출부하량에 미치는 영향,” *한국지형학회지*, 11(1), 91-104.
- 신원호, 2004, “방재조절지 설계를 위한 WEPP 모형의 적용,” 서울대학교 석사학위논문.
- 양동운·김진관·김주용·김민석, 2005, “노출지에서의 토양표면조건에 따른 침식량 변화,” *대한자원환경지질학회 2005 춘계 학술발표회 논문집*, 342-345.
- 오경두·홍일표·전병호·안원식·이미영, 2006, “GIS 기반 산사태 예측모형의 적용성 평가,” *한국수자원학회지*, 39(1), 23-33.
- 오성렬·이기하, 2013, “공간분포형 습윤지수를 이용한 유역규모의 사면안정해석,” *한국지리학회지*, 3(2), 111-126.
- 우효섭·김창완, 1988, “개발사업으로 인한 토양손실량 예측 및 침사지 설계,” *한국수자원학회 제6회 수공학 워크샵*.
- 이수곤·이경수·김병호, 2008, “절취사면 설계 현황에 대한 연구,” *한국방재학회 학술발표회 논문집*, 569-572.
- 정재학·이종설, 2008, “산지지역 토양침식 방지대책과 향후 과제,” *한국수자원학회지*, 41(11), 24-28.
- 한국지질자원연구원, 2006, 「침식퇴적재해저감기술개발」.
- 한국지질자원연구원, 2007, 「지질재해 피해평가기술 및 대응기술 실용화사업」.
- Agassi, M., Bloem, D., and Ben-Hur, M., 1994, Effect of drop energy and soil and water chemistry on infiltration and erosion, *Water Resources Researches*, 30(4), 1187-1193.
- Burgoa, B. and Wauchope, R.D., 1995, Pesticides in run-off and surface waters, In Roberts, T., and Kearny, P.C. eds., *Environmental Behavior of Agrochemicals*, 9, New York: Wiley, 221-255.
- Flanagan, D.C. and Nearing, M.A., 1995, *USDA-Water Erosion Prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation*, NSERL Report, No. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN 47097-1196.
- Foster, G.R. and Meyer, L.D., 1972, Transport of soil particles by shallow flow, *Transactions of the ASAE*, 15(1), 99-102.
- Merritt W.S., Letcher R.A., and Jakeman A.J., 2003, A review of erosion and sediment transport models, *Environmental Modeling & Software*, 18, 761-799.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., 1994, A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1171.
- Nearing, M.A., Page, D.I., Simanton, J.R., and Lane, L.J., 1989, Determining erodibility parameters

- from rangeland field data for a process-based erosion model, *Transactions of the ASAE*, 32(3), 919-924.
- Renschler, C.S., 2003, Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach, *Hydrological Processes*, 17(5), 1005-1017.
- Risse, L.M., Nearing, M.A., and Savabi, M.R., 1994, Determining the Green - Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model, *Transactions of the ASAE*, 37, 411-418.
- Rose, C.W., 1993, Erosion and sedimentation, In Bonell, M., Hufschmidt, M.M., and Gladwell, J.S. eds., *Hydrology and Water Management in the Humid Tropics: Hydrological Research Issues and Strategies for Water Management*, Cambridge University Press, 301-343.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D., 1978, Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning, *USDA Agriculture Handbook*, 537.
- Zhang, X.C., Nearing, M.A., Risse, L.M., and McGregor, K.C., 1996, Evaluation of WEPP runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data, *Transactions of the ASAE*, 39, 855-863.
- Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R., and Montrasio, L., 2013, Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility, *Natural Hazards and Earth System Science*, 13, 559-573.
- 교신 : 김민석, 34134, 대전광역시 유성구 대학로 99 충남대학교 국제수자원연구소 (이메일: varcgisv@gmail.com)
- Correspondence : Min Seok Kim, 34134, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University (Email: varcgisv@gmail.com)
- 투 고 일: 2016년 3월 20일
심사완료일: 2016년 4월 4일
투고확정일: 2016년 4월 6일