

소유역에서의 토사유출 산정을 위한 GeoWEPP model과 USLE의 비교 · 적용 연구 - 이천시 단월동 유역을 사례로

김민석 · 김진관* · 양동윤

한국지질자원연구원, 지질환경재해연구부

Application and Comparison of GeoWEPP model and USLE model to Natural Small Catchment - A Case Study in Danwol-dong, Icheon-si

Min-Seok Kim, Jin-Kwan Kim* and Dong-yoon Yang

Department of Geological and Environmental Hazards, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The empirical USLE and the physically-based GeoWEPP which were distributed model linked with GIS (Geographical Information System) were applied to small natural catchment located in Icheon-si, Gyeonggi-do, South Korea. The results using by two models were total sediment yield from study catchment between January, 2004 and January, 2005. During the study period, the observed total sediment yield was 270.54 ton and the total sediment yield computed by USLE and GeoWEPP model were 358.1 ton and 283.30 ton, respectively. Each of results computed by USLE and GeoWEPP overestimated more than the observed total sediment yield, but, based on the results, the total sediment yield computed by GeoWEPP approximated to the observed result. We suggest that the reason why the total sediment yield using by models overestimated was that computed amounts by two models did not contain the amount of suspended sediment flowed over the weir.

Key words : sediment yield, small catchment, GeoWEPP model, USLE model

GIS와 연계시켜 만든 분산형 모델의 대표적인 경험식인 USLE model과 물리학기반의 GeoWEPP model을 경기도 이천시에 위치한 소유역에 적용하여 2004년 1월에서 2005년 1월까지 1년간의 토사유출량을 비교하였다. 연구기간동안의 유출된 토사량은 실제관측결과 270.54 ton, USLE 모델 적용 시 358.1 ton, 그리고 GeoWEPP 모델 적용 시 283.30 ton 으로 각각 산출되었다. 각각의 모델을 적용한 산출량은 실제 산출량보다 과대하게 산출되었으며, 산출결과만을 볼 때, GeoWEPP 모델을 적용한 토사유출량이 USLE 적용 산출량 보다 관측량에 더 근사한 산출량을 보였다. 모델 적용 산출량이 과대산출 된 원인으로는 실험웨어를 월류하여 빠져나간 부유물에 대한 양이 포함되지 않았기 때문으로 판단된다.

주요어 : 토사유출, 소유역, GeoWEPP 모델, USLE 모델

1. 서 론

농경지에서 발생하는 토양유실은 토양에 인이나 질소와 같은 각종 오염물질 등의 흡착되어 강이나 하천, 저수지 등으로 유입되면서 수질오염의 직 · 간접적인 원인이 되며(Beasley *et al.*, 1980; Brown *et al.*, 1987;

Hanley *et al.*, 1998; Shin, 2004), 토양의 유실로 인한 토사가 하천이나 저수지, 댐 등에 퇴적됨에 따라 수로의 통수능이 저하되고 홍수범람을 비롯한 저수용량의 감소에 영향을 미치고 있다(Hanley *et al.*, 1998). 특히 하천의 최상류에 해당하는 산지 소하천에서는 그 유량에 비해 많은 양의 토사를 운반하고 있으며, 때로

*Corresponding author: jkkim@kigam.re.kr

는 산사태 또는 갈리 형성 등과 같은 다량의 토사공급으로 인한 토사류를 형성하면서 재해를 발생시키기도 한다. 그러나 산지 소유역에서의 토사유출량 산정과 관련된 연구는 Park(1994), Kim *et al* (2004b) 등이 있으나 매우 부족한 실정이다.

토사유출을 저감하기 위해서는 토사생산의 발생장소, 시간, 규모, 이동형태를 정확하게 파악하고, 그것이 어떤 경로로 유출하는가를 예측할 필요가 있으며 이러한 연구는 매우 중요하다(Rose, 1993; Burgoa and Wauchope, 1995; Kim *et al*, 2004a). 현재 국내에서는 토사유출량 산정을 위하여 미국에서 개발한 범용토양손실공식(USLE, Universal Soil Loss Equation)과 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation)을 주로 사용하고 있다. 그러나 이러한 공식들은 미국의 중동부 지역 농지의 사용 용도에 따른 토사유출량의 변화 및 조절을 주목적으로 개발된 경험공식으로 연평균 토사유출량 산정에 활용되고 있으며, 공식의 각종 독립인자 및 계수가 미국의 일부지역에 적합하도록 개발되어 우리나라에 대하여는 적용 시 설계자의 주관적 판단이 요구되는 경우가 많다.

미국의 농무성, 국립자원보존부, 임업부 그리고 내무성의 연구자들에 의해서 개발된 분산형 모델인 WEPP(Water Erosion Prediction Project)은 물리적 방법에 기초한 토양 침식모델로 토양구조, 기후, 지표이용도, 지표 상태에 따른 토양침식과 토사 유출량의 추정이 가능하다. 더욱이 GIS상에서 공간 분석이 가능하게 수정된 GeoWEPP(Renschler, 2003)은 토사 침식량 및 토사유출량 연구에 있어서 주관적인 판단을 최대한 배제하고, 실제 자료의 활용성을 높인 모델로 전세계에서 많은 검증과 정확성을 평가 받고 있다(Nearing *et al.*, 1989a, Risse *et al.*, 1994; Flanagan, 1995, Zhang *et al.*, 1996).

이 두 모델은 크게 경험기반과 물리기반으로 구분되며 실험방법 및 연구목적에 따라 유용하게 사용된다. 그러나 최근 기후온난화로 인한 이상 기후현상(IPCC, 2001)과 관련하여 태풍 및 집중호우로 인한 피해가 증가하고 있으며(Lee and Lee, 1998), 이러한 기상이변속에서 강우특성의 변화는 지표유출량 및 토사유출량에 많은 영향을 미치므로 실제 특정 연도나 특정 강우사상에 대한 토사유출량을 산정에 대한 정확한 정보의 필요성이 증가하고 있다. 그리하여 본 연구에서는 우선적으로 1년이라는 기간동안에 보다 신뢰할 수 있는 예측결과를 도출하는지에 관하여, 경험기반 모델과 물

리기반 모델을 대표하는 USLE와 Geo-WEPP을 이천시 단월동 부근의 소유역에서 적용하여 1년동안의 토사유출량을 산출하여, 실제 계측 자료와 비교·분석함으로써 모형의 적용성과 정확성을 검토하였다.

2. Model의 기본 이론

2.1. GeoWEPP

분산형 모델인 WEPP(Water Erosion Prediction Project)는 물리적 방법에 기초한 토양 침식모델로 토양과 수자원 보전, 환경계획 및 평가에 사용되고 있는 (R)USLE를 대체할 목적으로 만들어진 물리적 기반의 토양유실 산정모형으로 단일포장 형태의 경사지나 복합경사지로 이루어진 유역의 강우에 의한 유출 및 토양침식량을 예측 할 수 있으며, 유사전달을 고려한 토사 유출량(sediment yield)을 산정할 수 있다.

이 모형은 여러 개의 부모모형으로 구성되어있는데, 추계학적 방법으로 여러 기상자료를 생성해 내는 기상생성부모모형(Weather Generation Component), 부정강우사상에 적용할 수 있도록 수정된 Green-Ampt 모형으로부터 침투율을 결정하며, 지표면 운동량 방정식을 이용하여 강우와 침투의 비를 구하는 지표수문학부모형(Surface Hydrology Component), 고정된 스프링클러나 고랑 관개 시스템에 의한 토양 유실량 추정을 위한 관개부모형(Irrigation Component), 지표수의 유출을 다루는 지표수리학부모형(Overland Flow Hydraulics Component), 근구역(root zone)에서의 토양수분과 증발산량을 계산하는 물수지 부모모형(Water Balance Component), 작물 성장과 그에 따른 수분 및 토양유실 과정에 대한 영향을 고려하기위한 작물성장부모모형(Plant Growth Component), 작물 잔류물질의 분해 및 처리효과를 고려하는 잔류물질분해부모모형(Residue Decomposition Component), 수문학 및 침식에 영향을 미치는 여러 토양특성을 다루는 토양인자 부모모형(Soil Parameters Component), 사면에서의 강우에 의한 토립자의 분리 및 이송, 그리고 퇴적을 다루는 사면침식과 퇴적부모모형(Hillslope Erosion and Deposition Component), 복합사면과 수로로 이루어진 유역에서의 수문학과 침식과정을 다루는 유역수문학 및 침식과정 부모모형(Watershed Channel Hydrology and Erosion Processes Component), 유역에서 여러 수공구조물에서의 침전효과를 고려하는 유역 수공구조물부모모형(Water Impoundment Component) 등 이상의 독립적인 여러 부모모형으로 이루어져 있다(Fig.1).

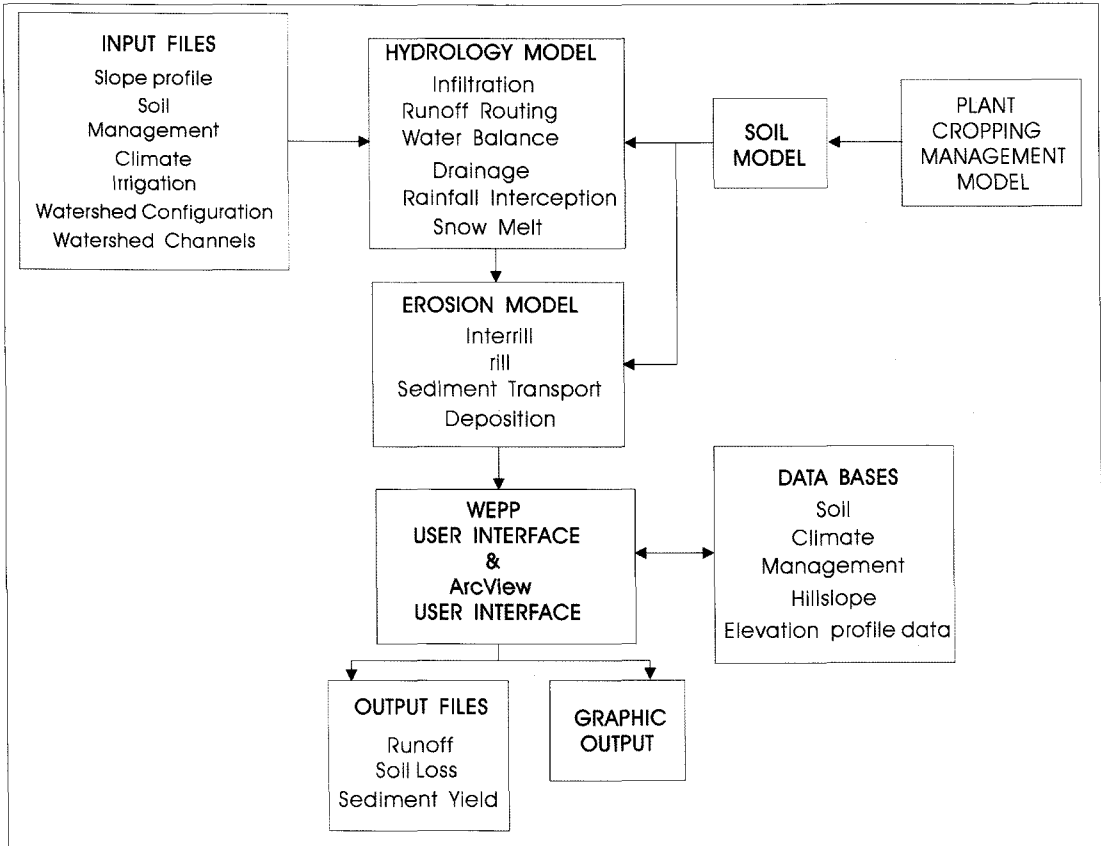


Fig. 1. The Flowchart of GeoWEPP(applied with Shin, 2004).

2.2. USLE Model

USLE 모형은 농업지역의 토양유실량을 산정하기 위하여 Wischmeier and Smith(1978)가 강우에 의한 토립자의 이탈 및 운송에 의한 개념을 기초로 처음 제안하였고, 1978년에 수정식을 제안하였다. 미국농무성(1996)은 개발목장이나 산림과 같은 실험 지점 이외의 토양조건에 대한 토사침식량 산정을 위해 기후인자의 수정, 계절적 변화에 대한 토양의 침식성 인자의 개발, 사면의 길이 및 경사에 대한 수정과 피복식생인자를 산정하는 새로운 계산 과정의 개발 등을 추가한 개정 범용토양손실공식(RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation)을 발표하였다. 현재 전 세계적으로 많은 검증을 받으며 쓰이는 토양침식 모형 중 하나이다.

토양유실량을 추정하기위한 범용토양유실공식(USLE)는 다음과 같이 정의된다.

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

A=연평균 토양유실량(tonnes/ha/yr)이고, 강우 인자

$$R \text{ 값}(EI \text{의 단위, } Mjmm \text{ ha}^{-1}h^{-1}) \text{은 } R = \frac{\sum EI_{30}}{100} \text{ 같이}$$

특정 호우에 대한 최대 30분 강우 강도와 강우의 총에너지 곱을 100으로 나눈 값이다(Wischmeier and Smith, 1953). 여기서, E는 강우운동에너지(MJ/ha/mm)이며, I는 호우의 평균강우(mm/hr)이다.

토양 침식인자 K값(tha⁻¹yr⁻¹per unit R)은 강우에너지와 유출에 의한 침식능에 저항하는 토양의 저항도를 나타내며, L값(무차원)은 경사길이 인자로 $L = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^m$

로 계산되고, 여기서 λ는 미터단위의 평면에 투영된 사면의 길이이며 m은 지면경사(%)에 따른 값으로 경사(s)에 따라서 m≤0.5 이하 값을 갖는다. 그리고, S값(무차원)은 사면경사인자로 일반적으로 (0.43+0.3s+0.043s²)/6.613으로 나타내며 s는 평균 경사값이다. C값(무차원)은 주어진 피복 및 관리상태 하에서 발생하는 토양손실량과 동일지역에 대한 연속 휴경지에서 발생하는 토양 손실량과의 비이며, P 값(무차원)은 토양

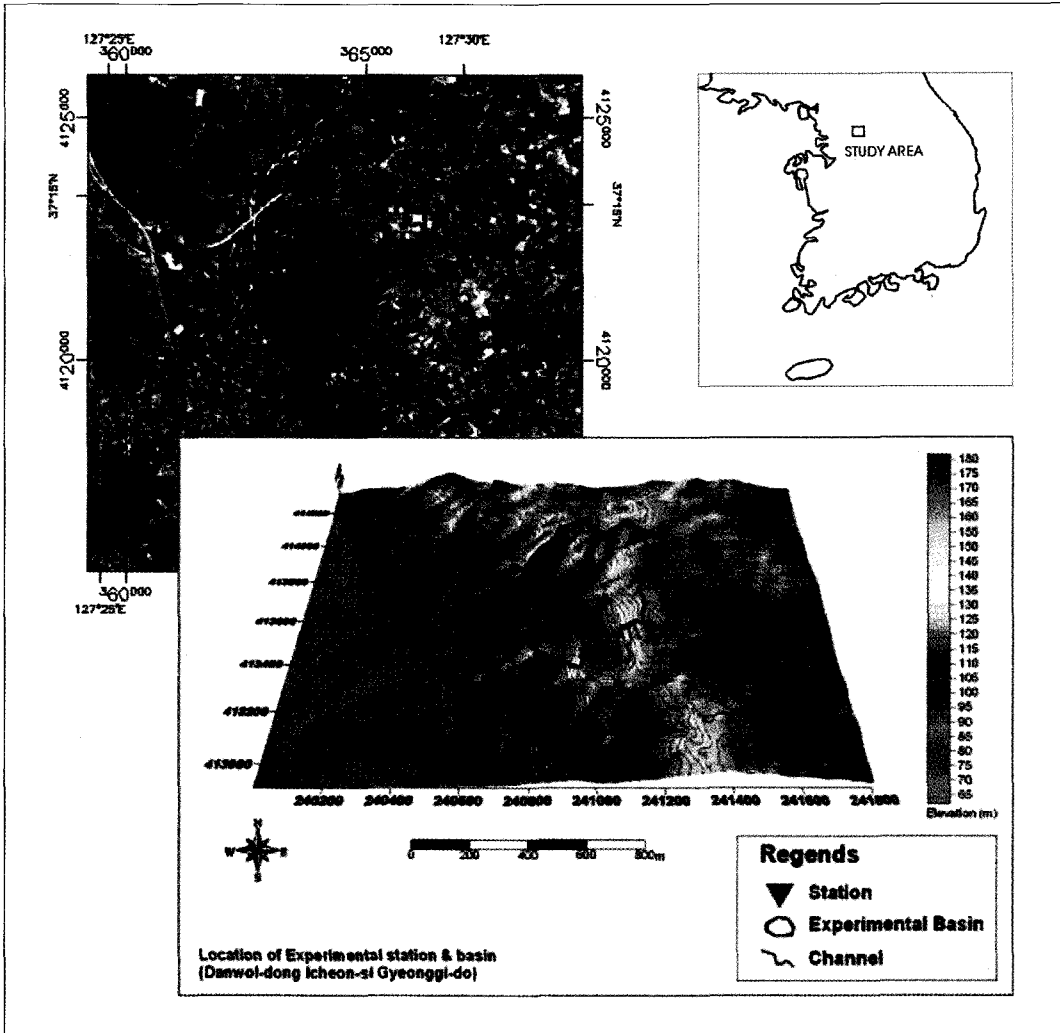


Fig. 2. Location of experimental station & catchment area.

보존대책인자로 산중턱을 따라 고랑이나 두둑의 설치, 계단식 경작방식 등 지표면에 설치된 대책들을 고려하여 주는 인자이다.

3. 연구지역

실험구역의 전체 면적은 약 0.29 km² 이며 고도분포

는 79~179 m로 비교적 낮은 산지이다(Fig. 2). 유역의 전체적인 사면방향은 남서방향이며 평균경사는 약 28.98% 이다. 연구 유역의 지질은 강풍화의 흑운모화강암으로 구성되어 있다. 토양은 삼각과 사촌이며, 자갈이 없는 사양질 양토로 이루어져있다. 이 유역의 1971년~2004년까지의 30년간 자료를 월별로 평균한 기후 월 평년값은 Table 1에 정리되어 있다. 연평균

Table 1. Monthly mean temperature and precipitation in Icheon (1971-2004, from Korea Meteorological Administration).

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean
Temperature (°C)	-3.75	-0.46	5.01	12	17.3	21.43	24.33	24.43	19.51	12.4	5.26	-0.91	11.36
Precipitation (mm)	27.29	30.76	34.7	98.8	90.2	149.3	327.3	298.4	148	49.1	37.0	20.38	1311.3

기온은 11.2°C이며 6~8월은 20°C를 넘고, 12월~2월에는 0°C 이하로 낮게 유지된다. 강수량은 연평균 1329.5 mm이며 6월~9월에 각각 100 mm 이상이 내리며, 이때 내리는 강수량은 924.9 mm로 전체 강수량에 69.6%에 해당하여 하절기에 강수가 집중된 양상을 보인다(Kim *et al.*, 2004b).

4. 토사유출량 관측 및 모델 자료 입력

4.1. 토사유출량 관측

이천 단월동 실험지에서 USLE와 GeoWEPP Model에 필요한 입력 자료 생성을 위하여 토양 단면을 기재하고 토양표면의 유기물 층을 제거 후 10cm 깊이 토양과 35cm 깊이의 토양시료를 채취하여 물리 실험을 하였다(Fig. 3). 실험항목은 비중, 함수비, 간극비, 간극율, 포화도, 습윤밀도, 포화밀도, 액성, 소성, 소성지수, 입도 분석, 그리고 투수계수 등이다.

이와 더불어 연구지역의 침식양상을 살펴보기 위하여 GPS 및 토탈스테이션을 이용하여 25m의 간격을 이루어 2004년 봄과 2005년 봄에 횡단면을 측정하여 계류의 변화 양상을 살펴보았으며, 2004년도 매 강우

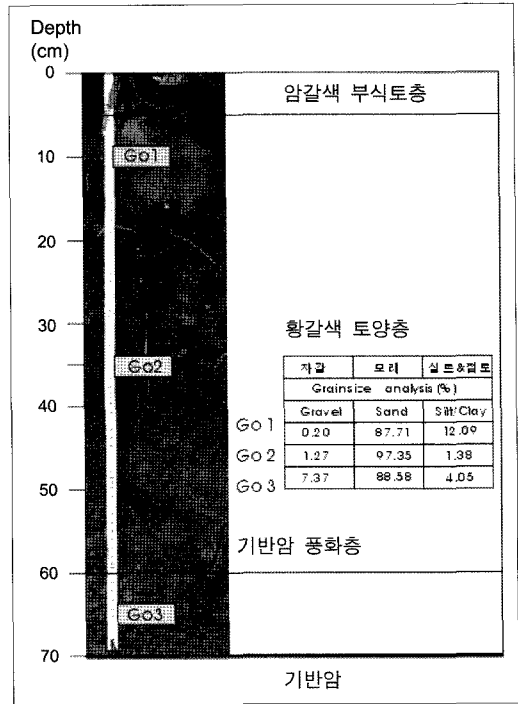


Fig. 3. Soil profile.

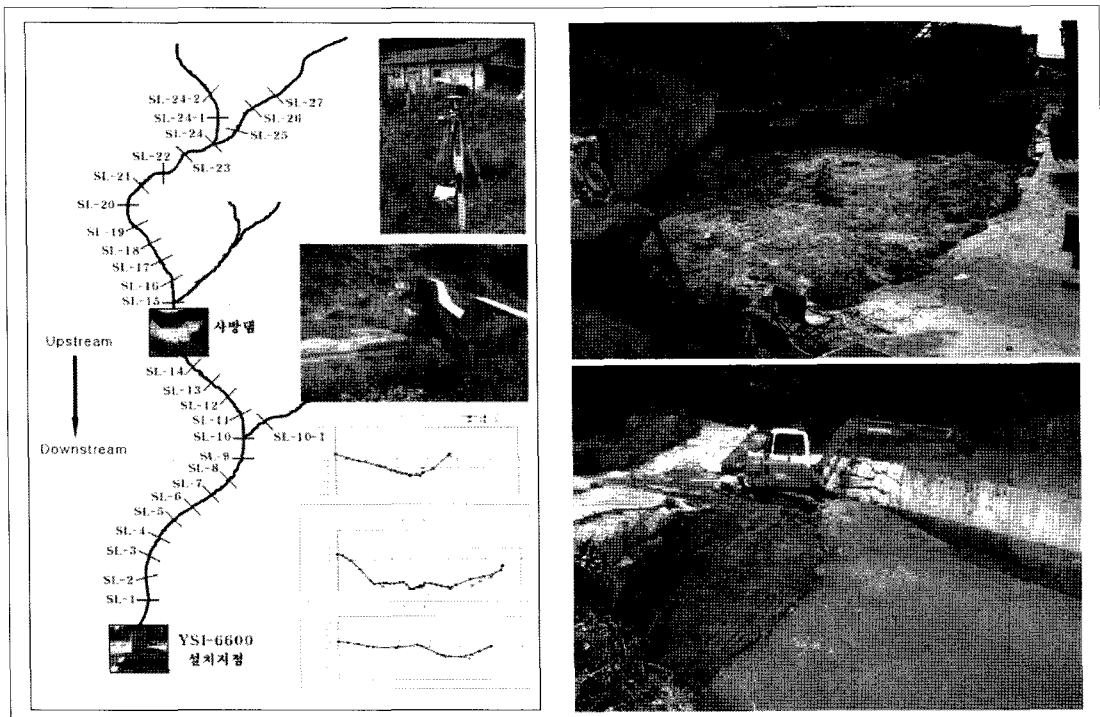


Fig. 4. Geodetic survey(left) and computation of the total sediment in the weir(right).

시 마다 현장에 설치되어 있는 장비를 이용하여 부유 토사를 채취하였다. 또한, 2004년 6월 강우가 시작하기 전 포크레인을 이용하여 하류에 설치되어있는 소규모 웨어의 퇴적물을 수거하여 무게로 환산 하였으며, 다음년도 강우가 시작되기 전 2005년 4월까지 퇴적된 양을 합산하여 2004년도의 총 토사유출량을 산정 하였다. 그리고 상류의 사방댐은 GPS를 이용하여 사방댐 내의 면적을 재고, 하류부에서와 같은 시기에 측량을 하여 입도 분석을 통해 나온 모래의 비중 값인 1.65를 사용하여 분석에 이용하였다(Fig. 4).

4.2. GeoWEPP 모델의 입력자료

기상자료는 일별 모의를 위한 경우에는 일별 강우자료를 입력하고, 폭우사상별 모의를 위해서는 강우량자료를 시간별로 나눠서 입력하는 Break point 방법을 사용하거나 CLIGEN을 이용하여 강우 데이터를 생성하게 된다. 본 연구에서는 이천지방기상청의 일년 동안의 강우자료를 이용하여 모의하는 방법을 사용하였다. 지형자료는 경사지의 길이, 폭, 경사도에 관련된 자료이며, 국토지리정보원의 1/5000 수치지형도를 이용하여 입력하였다. 토양자료는 모래, 점토, 유기물, 암석

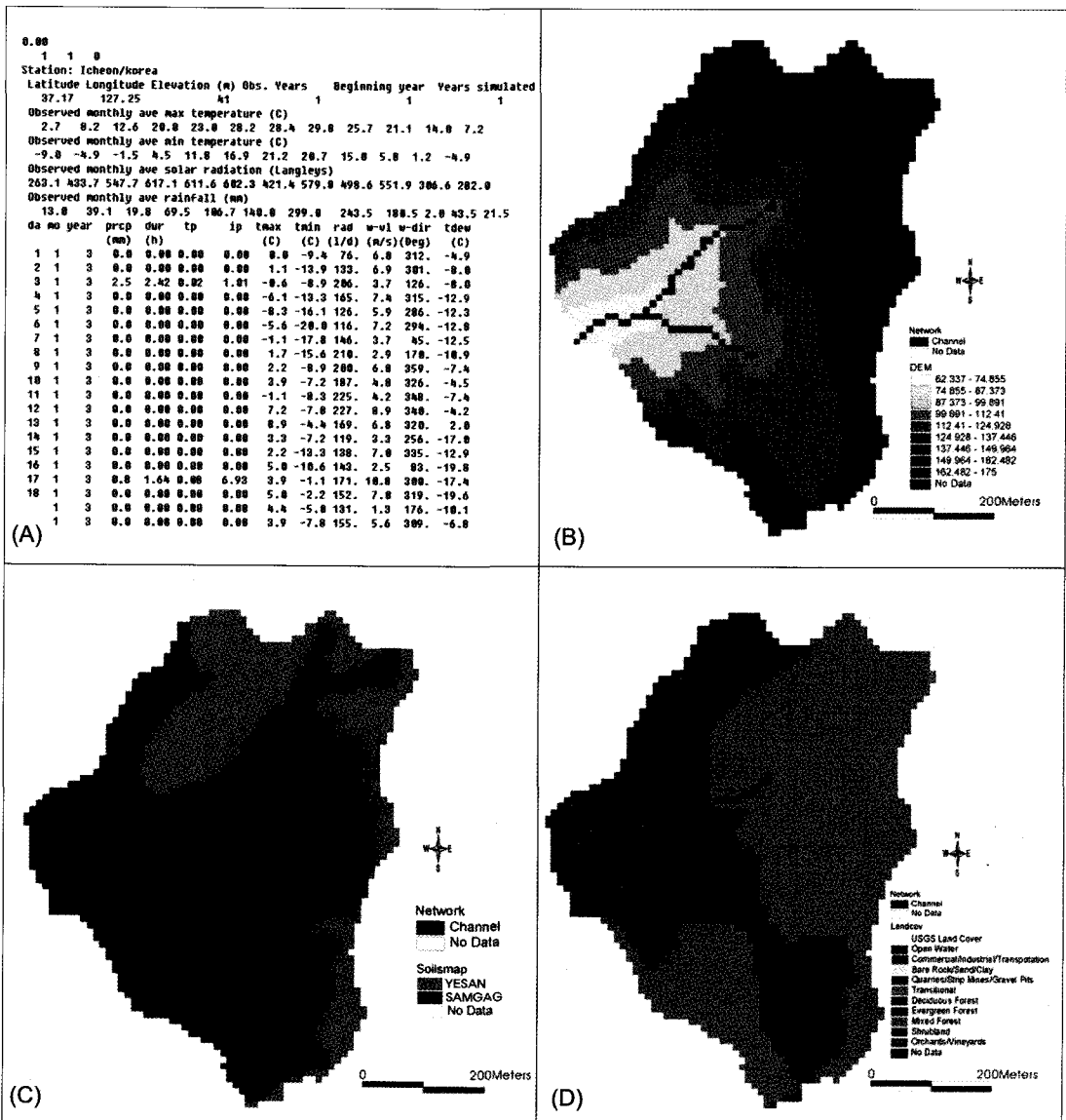


Fig. 5. GeoWEPP input data (A is climate data; B is topography map; C is soil data; D is land cover data).

파편 함유율, 양이온치환능(CEC)등의 토양조성에 관련된 자료 그리고 토양의 유효수리전도도등의 자료이다. 이 중 토양 조성에 관련된 자료는 입도분석 등의 실내 실험을 통해서 얻은 결과를 사용하였으며, 토양 침식능과 유효수리 전도도 등의 자료는 WEPP 모형에서 제공하는 추정절차를 사용하였다(Fig. 3).

4.3. USLE 모델의 입력자료

USLE의 R 값은 A. G. Toxopeus(1998)가 제안한 $R=3.85+0.35 \times P(\text{mm/yr})$ 를 이용하여 산정하였다. 1971년부터 2004년까지의 년 평균 강수량은 1311.26

mm/yr 이며, 위 공식에 의해 계산된 R 값 462.791 mm/yr 을 사용하였다. 전체 사용되는 입력자료의 통일성을 위하여 5 m의 격자로 통일 하였다. LS 값은 국립지리원의 1:5000 수치지도를 TIN보간법을 통한 GRID File로 만들어 사용하였으며, 토양침식성인자(K)는 1/25,000 정밀토양도를 도엽별로 토지이용에 따른 토양통을 분류하고, 연구지역의 토양통별 토양특성 값인 0.26을 적용하여 토양 침식성 인자를 산정하였다(농업과학기술연구원). 경작인자인 P 값의 경우 경작 방식을 결정해야 하지만, 자연유역인 관계로 1 값을 부여하였으며, 지표피복인자 C는 IRS-1C위성영상과 Landsat

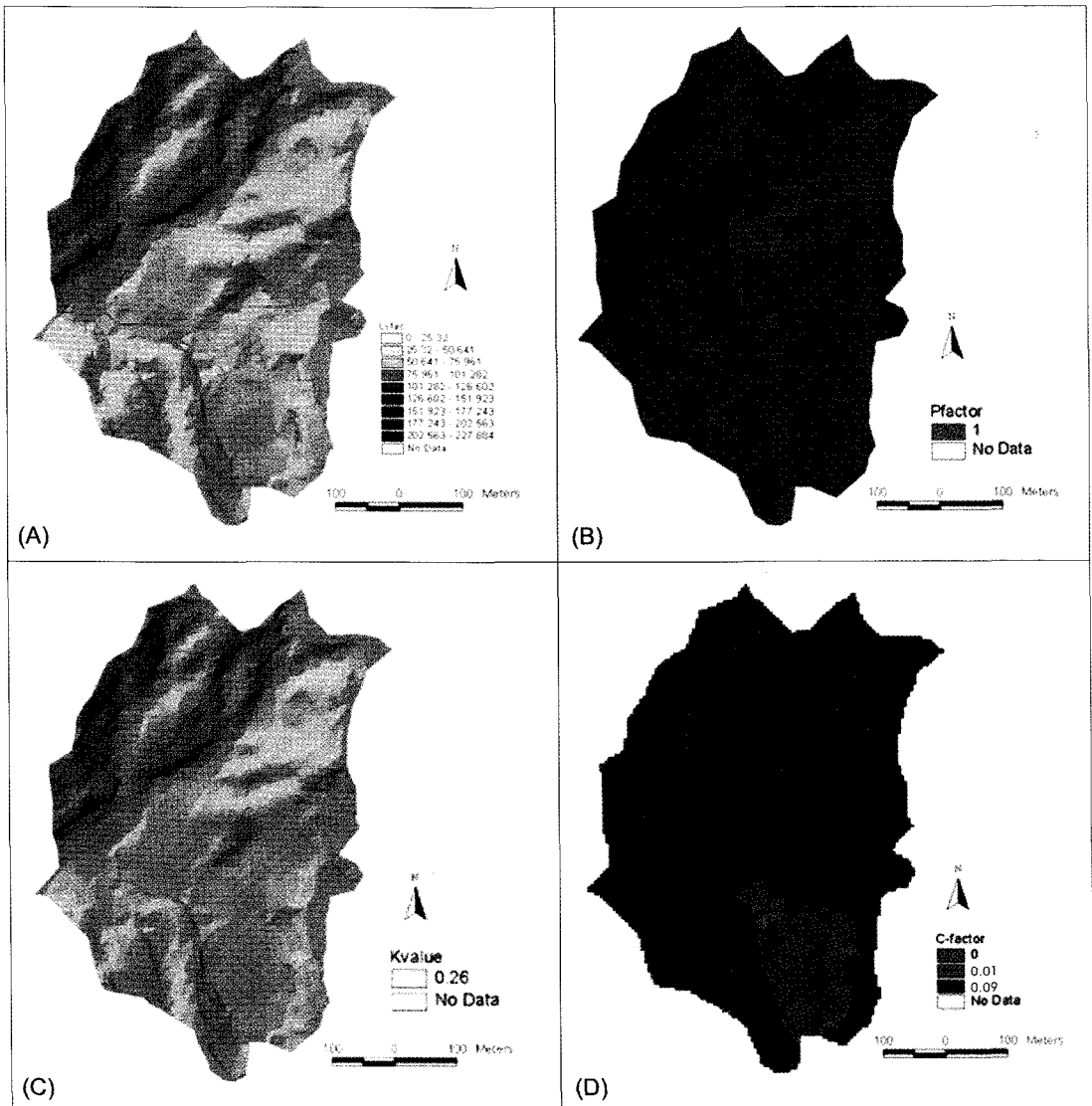


Fig. 6. USLE input data (A is LS factor; B is P factor; C is K factor; D is C factor).

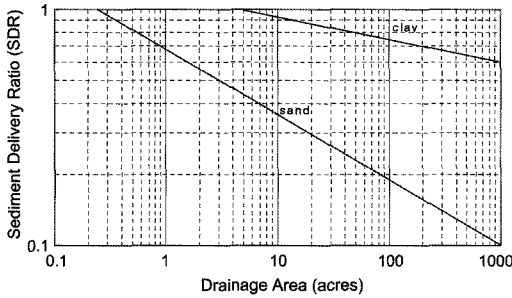


Fig. 7. SDR suggested for the Design of Sedimentation Basin.

ETM+의 영상융합을 통해 만들어진 환경부의 토지피복분류도와 미국농무성에서 산출한 C값을 사용하였다. 산림의 밀도가 높은지역에 0.01, 밀도가 낮은 지역에 0.09 그리고 상업지역에 해당하는 속성값인 0을 각각 부여 하였으며 결과는 Fig. 6과 같다. 그리고 USLE의 경우는 유역에서의 전체 토양침식량을 구하는 식으로 토사유출량을 산정하지는 못한다. 이때 사용하는 방법이 유사전달률(Sediment Delivery Ratio)로 본 연구에서는 유역의 면적에 따른 유사의 전달비를 미국 NCHRP(1980)에서 실험을 통하여 제안한 유사전달률 곡선을 이용하여 토사유출량을 산정하였다(Fig. 7).

5. 토사유출량 산정결과 및 토론

유역 내 사면에서의 전체 토양침식량은 USLE와 GeoWEPP 모델의 적용한 결과 1705.2 ton과 GeoWEPP 1072.9 ton으로 각각 산출되었으며, 연구지역 내 실험웨어가 있는 지점에서의 토사유출량은 USLE는 358.10 ton, GeoWEPP은 283.80 ton으로 각각 산출되었다. 그리고 연구지역 내 실험웨어에서 퇴적된 토사량을 산정한 결과 270.54 ton 으로 나타났다. 각각의 결과는 Table 2에 정리하였다.

유역 내 토양유실은 USLE에서는 1705.2 ton, GeoWEPP에서는 1072.9 ton 으로 각각 산정되었다. USLE에서 산출된 토양유실량은 GeoWEPP에서 산출된 양보다 약 630 ton 이 더 많게 추정되었다. 이와 같은 차이가 나타나는 가장 큰 요인은 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 그 첫 번째 요인으로는 USLE 모델은 연평균 토양침식량을 구하기 위한 목적으로 한 것이므로, 강우인자 값 산정 시 약 30년 동안의 연강우량의 평균을 이용하여 산출하였다. 이는 특정연도인 2004년도의 토양침식량이 아닌 연평균 토양침식량으로 2004년도의 총강우량은 1176 mm으로 연평균 강우량인 약

Table 2. Comparison of Results (unit: ton)

Methods	Soil loss	Sediment yield
USLE	1705.2	358.10
GeoWEPP	1072.9	283.80
Observed amount	No Data	270.54

1311 mm 보다 적은 것으로 2004년도의 토양침식량을 제대로 반영하지 못하고 과대산정된 것으로 판단된다. 그러나 기존 USLE 적용연구에서도 일반적으로 밝혔듯이, USLE 적용 시 특정연도의 강우량으로 적용한 것의 정확도가 크게 떨어지므로 이에 대한 충분한 요인이 될 수 없다. 참고로 2004년도의 강우를 적용하여 산출하였을 때의 토양침식량은 1610.34 ton 으로 산출되어 GeoWEPP 산출값보다 여전히 상대적으로 과대산정한 것으로 나타난다. 두 번째 요인으로는 USLE 인자 값 중 강우인자 값을 제외하고 산출량에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 사면인자로 다른 인자값이 보통 0-1 값을 갖는 것에 반하여 사면인자 값의 범위는 0부터 시작하기는 하나 수십에서 수백까지의 값을 갖는다. 그리하여 사면인자 값 산정 시 연구지역의 DEM이 정확히 반영되지 않아 과대산정 되었을 가능성이 있으나 이는 흐름 누적을 반영하는 LS인자의 특성 때문으로 보이나, GeoWEPP 에서도 같은 DEM을 사용하고, 또한 GeoWEPP역시 USLE와 같이 흐름방향을 계산 하므로 사용된 DEM과 현실과의 차이는 무시된 것으로 가정될 수 있다.

DEM 적용시 또 다른 요인으로는 USLE 적용에 따른 LS 값의 초기입력데이터 작성시 Grid 크기를 1m 격자로 산정한 데에서 오차가 발생할 가능성이 있다. 그러나 GeoWEPP에서 사용한 Grid 크기와 같은 5m 로 적용한 결과와 거의 차이가 없게 산출되어 Grid 크기에 영향은 많이 없었던 것으로 판단된다.

이와 같은 요인을 고려한 결과 USLE와 GeoWEPP의 적용결과 토양침식량에서의 차이는 이 모델의 근본적인 차이에서 발생한 것임이 추정된다.

토사유출량은 USLE의 경우 실측량과 비교하여 약 88 ton 의 과대추정을 보이고 있으며, GeoWEPP 역시 약 13톤의 과대 추정을 보이고 있다. 그러나 GeoWEPP은 USLE에 비하여 실측량에 보다 가까운 결과를 보이는 것으로 나타났다. 하지만 실측량 자체에서 부유토사로 실험웨어를 월류하여 빠져나간 양이 포함되지 않았기 때문에 모델링 결과가 과대추정 되었을 것으로 판단된다. 그러나 연구지역에서의 실험웨어를 월류해 나가는 부유토사 산출 실험에서 부유토사의 입

자는 대부분 실트 이하의 크기이며, 2005년도 최고 침투유량 1,000 l/sec 일 때의 부유토사농도는 약 2,113 mg/l 로, 유량과 부유토사농도와 관계는 약 1.67 mg/sec 으로 나타나(Kim *et al.*, 2004b; KIGAM 2005), 연간 유출량이 약 1,200,000 kl로 추정할 때, 최대로 빠져나간 부유토사량은 약 2 ton으로 추정되어 GeoWEPP 모델 결과가 실제 토사유출량을 잘 반영하는 것으로 보이나, 보다 정확한 유출량 및 토사량에 대한 결과는 부유토사에 대한 실험 및 연구가 필요한 것으로 판단된다.

토사유출량에 대한 실측량에 대한 오차를 인정하더라도 각각의 모델결과는 상당한 양을 과대 추정하고 있다. 이에 대하여 각각의 모델의 적용에 있어 모델 자체가 갖는 한계점에 대해 고려하여야 할 것이다. 우선 USLE의 적용 시 한계점은, 첫째 USLE식의 개발 목적 자체가 장기간에 걸쳐 농업위주의 토양침식을 계산하기 위한 것이므로(Loch and Rosewell, 1992) 자연유역에 대한 적용 시 문제점이 발생할 수 있음을 시사한다. 둘째는 우리나라 자연 유역에서의 USLE 입력 자료의 실험이 거의 전무하여 적절한 요인별 가중치 및 적용식에 대한 평가 및 보정이 제대로 이루어지지 않았음을 들 수 있으며, Evans *et al.*(1992) 등이 제시한 입력되는 데이터의 실험기간이 적어도 10년 이상 되어야 한다는 실험결과와 연관이 있는 것으로 생각된다. 또한 토양의 피침식성 인자인 K 값(soil erodibility)의 경우 휴경지에서의 실험결과이므로 이를 자연유역에 적용하는 것은 무리가 있는 것으로 보인다. 또한 K 값은 면상침식(sheet erosion)과 세류 침식(rill eorsion) 산정을 위해 개발된 것이나, 계절적 변동 및 월별에 따른 값의 변동이 크게 나타나는 것으로(Kim *et al.*, 2004a), 이와 같은 요인들이 중첩되어 전체적으로 과대산정된 것으로 판단된다.

이런 USLE의 단점을 보완하여 토양 침식산정시 과정 지향적인 모의를 하기위하여 RUSLE (Renard *et al.*, 1993; Renard *et al.*, 1994) 및 USLE-M(Kinnell and Risse, 1998)등의 수정공식이 나왔지만, 기본적으로 USLE의 형태를 가지고 있기 때문에 자연유역에 적용 시 무리가 따르는 것으로 생각된다(Renard *et al.*, 1993; Renard *et al.*, 1994; Kinnell *et al.*, 1998; Shin, 2004, Kim *et al.*, 2004a).

물리적 기반의 과정 지향적 모델인 GeoWEPP의 경우 실측량과 비교해서 USLE보다 정확한 토사유출량을 보이는데 이는 유역의 특성을 상대적으로 잘 반영한 것으로 추정된다. 즉, 과정지향적인 모델인 GeoWEPP은

복합적인 자연특성에 따른 토사유출을 강우와 지표 및 식생의 관계, 그에 따른 지표 수분 변화에 의한 유출의 발생과 퇴적물의 이동을 물리화적으로 모의하여 결과가 USLE보다 비교적 실측치에 근사한 값을 보였던 것으로 판단된다.

그러나 GeoWEPP의 경우도 몇 가지 한계점을 갖는다. GeoWEPP은 TOPAZ(Garbrecht and Martz 1997)를 이용하여 흐름 방향을 계산하기 때문에 정밀한 지형고도자료(Digital Elevation Model)에 영향을 많이 받는다. 즉, 일반 1/5000 수치지도에서도 자연사면에서 발생한 구곡(gully) 등이 묘사되어 있지 않은 경우가 많기 때문에 실제적인 측량을 통한 지형고도자료에 추가가 필요하다. 또한 GeoWEPP에서 사용하고 있는 토양입자의 이탈과 퇴적을 위한 세류(rill)과 세류간(interrill) 개념의 부정류연속방정식인 Foster's equation (1972)은 확장하고 있는 구곡이나 하천에 의한 침식 및 퇴적을 계산하는 것이 아니고 구곡이나 하천에 의해 퇴적물이 이동된 양을 모의하는 것이므로 모델의 해석 시 주의가 요망된다(Merrit *et al.*, 2003).

6. 결 론

본 연구에서는 경험공식인 RUSLE와 물리학 기반의 과정 지향적 모델인 GeoWEPP를 이용하여 경기도 이천 단월동에 위치한 자연유역을 대상으로 연간 토사유출량을 모의하고 실제 측정된 토사량과 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

이천 단월동 자연유역에의 USLE 적용 결과 2004년도 전체 토양침식량은 약 1705.2톤, 토사유출량은 358.10톤, 그리고 GeoWEPP Mode에서는 전체 토양유실량 1072.9톤, 토사유출량은 283.8톤으로 실제 관측된 토사유출량인 270.54톤과 비교하였을 때, GeoWEPP 모델이 USLE 결과보다 관측된 유출량에 비교적 근사한 값을 산출하였다.

USLE의 경우 미국에서 개발된 경험적인 실험식이라는 단점을 가지고 있어 모형에 입력되는 값들이 국내에서 적합하지 않은 것으로 보이며 또한 이 식의 개발 목적 자체가 농경지 중심의 침식 모델이기 때문에 자연유역사면에 적용 시 주의가 필요할 것으로 보인다. 특히 USLE 적용 시 강우 값과 사면경사인자 값에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 물리학 기반의 과정 지향적 모델인 GeoWEPP은 토양 침식 과정에 충실하게 복잡한 유역특성을 잘 반영하며 야외조사를 통한 실제 분석 자료의 입력을 토대로 계산을 수행해 토사유

출량 산정에 있어 좋은 결과를 보인 것으로 보이나, 추가적으로 부유사에 관련된 실험을 통한 유량 및 유사량에 대한 검증이 요구된다.

토사유출 및 토양침식산정에 있어서 실측의 어려움이 있고 물리적 모형의 적용 시 모형에 입력되는 인자값의 측정이 많아 우리나라에서는 아직 많은 수행이 되지 않고 있다. 그러나 실험을 통한 데이터의 축적 및 GIS(Geographic Information System)를 활용하여 공간 데이터가 구축 된다면 더 많은 지역에서 쉽게 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 보이며, 또한 이에 대한 GeoWEPP모형에 대한 검증이 계속적으로 이뤄져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 수탁사업의 '석조문화재 재해예방시스템 개발' 과제에서 지원되었습니다.

참고문헌

- Beasley, D. B., Huggins, L. E. and Monke, E. J. (1980) ANSWERS: A Moseld for Watershed Planning, Trans. ASAE, 23, p. 938-944.
- Brown, L.C. and Brownwell, T.O. (1987) The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS, US Environmental Protection Agency EPA, 600(3).
- Burgoa, B. and Wauchope, R.D. (1995) Pesticides in runoff and surface waters, In: Roberts, T., Kearny, P.C. (Eds.), Environmental Behavior of Agrochemicals, 9, Wiley, New York, p. 221-255.
- Evans, K.G., Loch, R.J., Aspinall, T.O. and Bell, L.C. (1992) Spoil pile erosion prediction-How far have we advanced?, In: Third Large Open Pit Mining Conference, Mackay, Queensland, p. 201-205
- Flanagan, D.C., 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.
- Garbrecht, J. and Martz, L.W. (1997) Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks, Computers & Geosciences, 23(9), p. 961-966.
- Hanley, N., Faichney, R., Munro, A. and Shortle, J.S. (1998) Economic and environmental modelling for pollution control in an estuary, Journal of Environmental Management, 52, p. 211-225.
- IPCC, 2001, Climate Change 2001- Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 255p.
- KIGAM (1974) LEECHEON geologic map of Korea.
- KIGAM (1975) YeJU geologic map of Korea.
- KIGAM (2005) Mitigation Technology of Geohazard of Erosion and Sedimentation, Ministry of Science & Technology.
- Kim, J.K., Yang, D.Y. and Kim, J.Y. (2004a) The Variety of Soil Erodibility (K-factor) by Erosion-plot Experiment during Rainfall, Journal of the Korean Geomorphological Association, 11(3), p. 37-46.
- Kim, J.K., Yang, D.Y., Kim, J.Y. and PARK, J.K. (2004b) Suspended Sediment Yields related to Discharge-Turbidity in Small Mountainous Catchment, Journal of the Korean Geomorphological Association, 11(3), p. 25-36.
- Kinnell, P. and Risse, L. (1998) USLE-M: Empirical modelling rainfall erosion through runoff and sediment concentration, Soil Science, 62(6), p. 1667-1672.
- Lee, E.G. and Lee, H.Y. (1998) Spatial distribution and causative factors of typhoon disasters in Korea, Journal of the Korean Geographical Society, 33(2), p. 179-190.
- Loch, R. and Rosewell, C. (1992) Laboratory methods for measurement of soil erodibilities (K factors) for the universal soil loss equation, Australian Journal of Soil Research, 30, p. 233-248.
- Merritt W.S., Letcher R.A. and Jakeman A.J. (2003) A review of erosion and sediment transport models, Environmental Modeling & Software, 18, p. 761-799.
- NCHRP (1980) Design of Sedimentation Basin, Synthesis of Highway Practice #70, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- 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, Trans. ASAE, 32(3), p. 919-924.
- Park, J. K. (1994) The Estimation of Suspended Sediment Yield by the SRC Method in a Small Mountainous, Journal of the Korean Geomorphological Association, 1(1), p. 17-32.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Wessies, G. A., McCool, D. K. and Yoder, D. C. (1993) Predicting Soil Erosion by Water-A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE, Agriculture Handbook No.703, USDA.
- Renard, K.G., Laflen, J.M., Foster, G.R. and McCool, D.K. (1994) The revised universal soil loss equation, In: Lad, R. (Ed.), Soil Erosion: Research Methods, p. 105-126.
- Renschler, C.S. (2003) Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach. Hydrological Processes, 17, p. 1005-1017.
- Risse, L.M., Nearing, M.A., Savabi, M.R. (1994) Determining the Green - Ampt effective hydraulic conductivity from rainfall-runoff data for the WEPP model, Trans. ASAE, 37, p. 411-418.
- Rose, C.W. (1993) Erosion and sedimentation. In: Bonell, M., Huftschmidt, M.M., Gladwell, J.S. (Eds.), Hydrology and Water Management in the Humid Tropics: Hydrological Research Issues and Strategies for Water Management. Cambridge University Press, p. 301-343.
- Shin, Y.K., Kim, J.W. (2004) The Effect of Land Uses on Pollutant Loads in Daegwallyong Area - An Appli-

- cation of USLE-series Models and CN Method, Journal of the Korean Geomorphological Association, 11(1), p. 91-104.
- Shin. W.H. (2004) Application of WEPP Model for Estimation of Sediment Yield. Master's Thesis, Seoul National University.
- USDA (1996) Predicting soil erosion by water : A Guide to conservation planning with the RUSLE, Agriculture Handbook #703.
- 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, Trans. ASAE, 39, p. 855-863.

2006년 9월 14일 원고접수, 2007년 2월 12일 게재승인.