

지형공간정보체계와 토양유실모형을 이용한 토양유실량과 유사량에 대한 비교

Comparison Sediment load with Soil Loss Using Revised Universal Soil Loss Equation and Geo-Spatial Information System

박재훈* · 양인태** · 김등문*** · 천기선****

Park, Jae-Hoon · Yang, In-Tae · Kim, Dong-Moon · Chun, Ki-Sun

요 旨

강우에 의한 토양유실은 환경에 침각한 영향을 미치고 있음에도 불구하고, 인식의 부족으로 실제 유역에서 발생되고 있는 유실량을 측정할 자료가 없는 실정이다. 본 연구에서는 수정토양유실모형을 지리정보체계와 통합하여 홍천강유역에 적용해 봄으로써 발생 가능한 유실량을 정량적으로 예측하였으며, 홍천강 유역에서 측정된 유사량 자료와 비교 분석을 통하여 그 상관성을 알아보았다. 수정토양유실모형에 필요한 각각의 인자들은 격자분석을 통하여 수행하였으며, 지형인자는 추출과정을 프로그래밍하여 효율성을 높였다.

ABSTRACT

Soil loss by the rains has effect on natural environment. But It is difficult to find out the data that is surveyed in watershed. In this study, we combine RUSLE and GIS, develop a program to automatically extract geo-factors to predict soil loss, and perform recurrent analysis against actual sediment load to bring out the relativity between soil loss and sediment load. Each factors need to RUSLE conducted by grid analysis. As the process to extract terrain factor became programming, the efficiency is rised.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리 나라는 장마철의 집중호우와 태풍으로 인하여 토양유실이 극히 심하며, 전 국토 면적의 67%가 경사 7도 이상인 경사지로 분포되어 있고, 토양을 형성하고 있는 대부분의 암석이 침식을 받기 쉬운 화강암 및 화강편마암으로 되어 있다. 또한 우리 나라의 토양은 유기물 함량이 낮고 토양 조직의 발달이 미약하기 때문에 흙이 지니는 힘이 약해 토양유실이 매우 심하다. 뿐만 아니라 지하로 스며드는 물이 적은 반면 지표면으로 흐르는 물이 많아 비가 올 때, 표면수와 함께 많은 양의 토사가 유실되며, 유실된 토사는 오염물질을 운반하는 매개체로써 큰 문제를 유발시킨다.

본 연구에서는 강우시 발생하는 토양유실량을 정량적으로 구하기 위해 수정토양유실모형을 지형공간정보시스템에 입력하여 분석하였으며, 강우시 발생된 유사량과의 관련성을 알아보았다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구를 수행하기 위해서 유사량 관측 지점인 홍천교 지점을 출구로 하여 홍천강 유역을 선정하였으며, 유역도는 1994년에 제작된 DTED(Digital Terrain Elevation Data)로부터 추출하였다.³⁾

본 연구에서 사용된 토양유실모형으로는 RUSLE 모형이 사용되었다. 토양유실모형에서 토양유실 분석에 고려되는 인자들로는 강우량의 분포, 경사길이, 경사도, 토양의 침식률, 식생의 분포 등이 있다. 각각의 인자들을 GIS 기법을 이용하여 인자별로 자료기반을 구축하고, RUSLE 모형에서 제시한 방법에 따라 인자값을 결정된 후, 각각의 인자별 자료층(layer)을 구축하였다.

구축된 각 자료층들을 격자형 형태의 자료로 변환하

*경동대학교 토목공학과 조교수

**강원대학교 토목공학과 교수

***강원대학교 토목공학과 박사과정

****강원대학교 토목공학과 박사과정

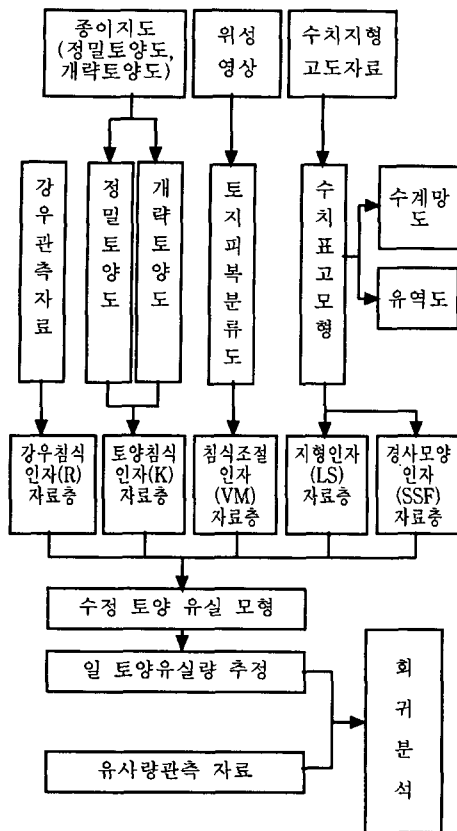


그림 1. 연구 수행 과정

고, GIS 기법의 중첩기능과 연산기능을 사용하여 각 자료층들을 통합하고 토양유실량을 계산하였다.

추정한 토양유실량의 검증을 위해서, 강원대학교 수공학연구소에서 1998년 6월 6일부터 8월 9일까지 약 2개월에 걸쳐 강우가 발생하였을 때 관측한 유사량 자료와 비교 분석하였다.

그림 1은 연구 수행 과정을 나타낸 모식도이다.

2. 토양유실모형

USLE 모형은 1960년대에 농경지에서의 토양유실량 예측을 위해서 Wischmeier와 Smith가 미국에서 처음 소개하였다. 이 모형은 경험적 방법에 의해 개발되었으며, 미국 이외에도 유럽, 서부아프리카 등 다른 지역에도 범용적으로 적용되었다.

USLE 모형을 수정하여 보완하여 보다 현실적으로 실정에 맞도록 고안된 것이 수정토양유실모형(RUSLE)이다.

RUSLE 모형에서 추정되는 토양유실량은 강우분포, 토양침식률, 경사길이, 경사도, 식생분포, 경작지형태, 경사모양 등 일곱 가지 기본적인 인자에 의해 결정된다.

식 (1)은 RUSLE 모형의 기본형태를 나타낸 식이다. 여기서, A는 토양유실량(t/ha/yr or t/ha/day), R은 강우침식인자, K는 토양침식인자, LS는 지형인자, C는 식생피복인자, P는 침식조절방법인자, SSF는 경사모양인자이다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \times SSF \quad (1)$$

3. 관측대상에 대한 적용해석

3.1 연구대상지역

홍천강은 우리나라의 중앙에 위치하고 있는 북한강의 제1지류로 한강 전체유역면적(34,423.2 km²)의 약 4.5%를 점하고 있다.

유역의 위치는 한강유역의 중앙부인 동경 127° 31'~128° 20', 북위 37° 33'~37° 56'사이 에 위치하고 있다. 본 연구지역은 홍천강 하구로부터 5.4 km 떨어진 지점을 출구로 하여 유역면적 1,549.6 km², 유로 연장 134.8 km에 달하는 범위를 선정하였으며, 유역의 형상은 수지형에 가깝다. 그림 2는 연구지역인 홍천강 유역에 대한 위치를 나타낸 것이다.

3.2 수정토양유실모형의 인자값 결정

토양유실량을 산정하기 위해서는 식 1에서 언급한 수정토양유실모형에 사용되는 각각의 인자에 대한 평가를

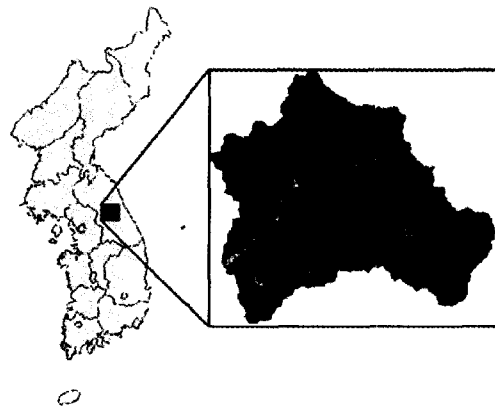


그림 2. 연구적용지역(홍천강유역)

수행해야 한다.

3.2.1 강우침식인자

홍천강유역에 대한 강우 분포현황을 알아보기 위하여 유역 안팎에 위치하고 있는 홍천, 두촌, 추양, 신평, 상남, 창촌, 봉평 등 7개 지역을 선정하고 강우량을 조사하였다.

각각의 강우량 관측 위치를 TM좌표로 변환한 후, Arc/Info의 커버리지 형태로 저장하였다. 강우량 관측 위치에 대한 값을 기초데이터로 하여 티센망을 구축하여 강우분포도를 작성하였다. 표 1은 유사량을 실측한 날짜에 해당하는 날짜를 선택하여 조사한 강우량 자료에 대한 강우침식인자를 나타낸 것이다. 6월 초부터 시작해서 7월 초까지 총 4회에 걸쳐 조사하였으며, 강우침식인자 결정에 사용되는 자료층의 산출은 각 날짜별로 총 4개의 구축 자료가 생성되어 토양유실량 산정에 사용된다. 그림 3은 홍천강유역에 대한 강우관측소와 구축된 티센망에 대한 그림이다.

강우침식인자(R)는 Wischmeier와 Smith의 방법을 사용하였다. 강우의 운동에너지에 고려하여 계산하게 되는데, 강우의 운동에너지는 강우강도와 강우의 운동에너지

사이의 관계식을 이용한다. 여기서, e 는 운동에너지, I 는 강우강도, R 은 강우침식인자이다.

$$e = 1.213 + 0.89 \log_{10} I$$

$$E = \sum_i^m (e \cdot I \cdot t) i$$

$$R = EI_{30} \quad (2)$$

강우침식인자(R) 자료층은 강우관측 지점을 사용하여 구한 티센망에 강우침식인자 값을 입력하여 구축하였다. 즉, 강우관측소별 관측값을 EXCEL에 의해 계산 처리하였으며, 계산된 결과값은 ASCII 형식의 파일로 저장받아 INFO 자료기반(DB: Data Base)의 R값 저장표에 자동 입력시켰다.

입력된 R값 저장표(RVALUE.DAT)를 강우 측정 티센망에 연결하여 일별 강우침식인자를 갖는 격자형 자료를 생성하였다.

그림 3의 티센망에는 표 1에 표시된 강우침식인자 값들이 입력되어 토양유실량 산정에 이용되었다.

3.2.2 토양침식인자

토양침식인자(K)는 미국 농무성(USDA)의 분류법에 따라 조직, 유기물함량, 토양의 구조, 토양의 투수성으로 분류하였다. 이것을 기준으로 Wischmeier의 추정방정식을 이용하였으며, 또한 건설기술연구원에서 제공된 토양토양별 토양침식인자 추정 자료를 참조하였다. 토양침식인자(K) 분포도는 정밀토양도와 개략토양도를 수치지도로 만들어 기초자료로 이용하였다.

토양도에 의한 K값 결정은 우선 정밀토양도와 개략토양도에 대한 K값을 분류하기 위해서 두 토양도를 격자형으로 변환한 후, 전체 유역에 대한 셀별 처리에 의해

표 1. 강우사상별 강우침식인자

관측지점	강우관측일			
	6/5-6/6	6/25-6/26	6/30-7/1	7/2-7/3
홍천	0.033	3.521	6.169	12.214
두촌	0.010	4.686	8.067	6.476
봉평	0.391	5.734	8.911	7.207
추양	0.000	4.195	8.359	2.571
신평	0.000	4.432	4.594	2.360
상남	0.003	5.385	9.652	8.048
창촌	0.267	3.253	7.384	1.996

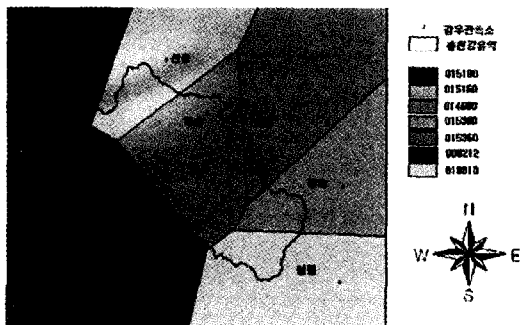


그림 3. 홍천강 유역의 강우관측소와 티센망

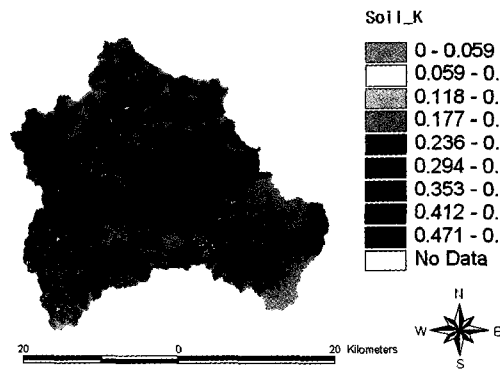


그림 4. 토양침식인자(K) 분포도

정밀도양도에 해당하는 K값을 우선 할당하고 정밀도양도에 누락되어 있는 셀에 대해 개략도양도에 해당하는 K값을 할당하는 방법으로 토양침식인자(K)값의 격자형을 작성하였다.

그림 4는 연구대상지역의 토양도를 이용하여 결정된 토양침식인자(K)값을 범위별로 분류하여 나타낸 분포도이다.

3.2.3 지형인자

지형인자(LS)를 구하기 위해서 DTED를 사용하였다. 토양유실량을 산정하는데 사용된 단위 구획의 크기가 22.1 m이기 때문에 DTED의 격자 크기를 22 m로 구축하였다. 22 m의 격자 크기를 갖는 DTED로부터 수계망과 유역을 추출하였다. DTED로부터 추출한 수계망은 지형도의 수계망과 비교해 볼 때 계곡까지 추출할 수 있어 하천의 수가 사용자에 의해 조절될 수 있다. 따라서 지형도의 수계망과 가장 적합한 수계망을 선정하여 사용하였다. 이렇게 구한 수계망을 근거로 유역도를 자동 추출한 후, 유역도를 사용하여 DTED에서 해당지역의 범위를 결정하였다.¹³⁾

지형인자(LS)를 결정하기 위해서는 경사분석을 수행해야 한다. 지형인자는 경사길이 인자 L과 경사인자 S로 이루어져 있으며, RUSLE 모형에서는 이 두 가지를 합해서 지형인자로 분류하고 있다.

본 연구에서는 지형인자를 구하기 위해 Arc/Info의 AML로 프로그램을 구축하여 자동 추출하였다. 그림 5는 경사분석을 통하여 계산된 지형인자(LS)값을 나타낸 분포도이다

경사도(S)는 각 셀마다 흐름 방향을 조사하여 인접하

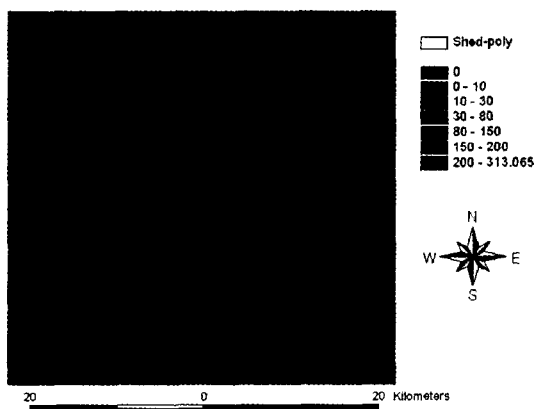


그림 5. 지형인자(LS) 분포도

는 셀과의 높이차로부터 구하였다. 경사길이인자(L)는 각 셀의 경사값에 의해 남북 또는 동서일 경우는 셀 크기가 22m로 경사길이를 구하고, 사선방향일 경우는 22×1.414 로 경사길이를 구하여 각 셀들을 흐름방향에 의해 길이를 누적해 나가는 방법으로 경사길이를 구하였다.

3.2.4 침식조절인자

현재 구할 수 있는 토지이용도는 1971년에 만들어진 도면이어서, 최근의 토지 이용현황과는 상당히 다른 상태를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 96년 10월 20일 영상을 사용하여 토지피복분류를 수행하였으며, 토지 피복분류 항목은 물, 삼림, 도시, 경작지, 나지 등 5개의 항목으로 분류하였다.⁴⁾

본 연구에서는 10월 영상을 사용하여 토지피복분류를 수행한 결과 논과 밭을 분류할 수가 없었다. 논과 밭의 분류가 이루어지지 않은 경우는 기존의 방법인 식생피복인자(C)와 침식조절방법인자(P)를 각각 사용하는 것은 아무런 의미가 없으므로 식생피복인자(C)와 침식조절방법인자(P)를 결합하여 사용하는 방법을 사용하였다.

여기서는 토양침식조절인자라는 개념을 도입하였는데, 토양침식조절인자(TM)는 식생 특성과 침식방지 대책을 대표하는 값으로 식생피복인자와 침식조절방법인자를 조합한 형태이다.⁷⁾

USLE 모형에서의 식생피복인자(C)와 침식조절방법인자(P)를 각각 사용하는 방법보다는 다소 정도가 떨어지는 단점이 있으나 대 유역과 같이 광범위한 지역에 사용하는 데는 무리가 없다고 여겨진다. 본 연구에 사용된 토양침식조절인자(TM)는 표 2와 같다.⁷⁾

3.2.5 경사모양인자

경사모양인자(SSF)를 구하기 위해서, 미리 만들어 놓은 DTED를 사용하였다. 경사모양인자는 흐름방향으로 생성된 경사모양에 따라 부여되는 값으로, 흐름방향에 따른 인접셀의 표고값을 비교하여 볼록한 모양이면 0.5, 등경사이면 1.0, 오목한 모양이면 1.5의 값을 부여하도록

표 2. 토양 피복상태와 토양침식조절인자(TM)

대상물	TM
나지	1.00
파종한지 60일 이전	0.40
파종한지 60일 이후	0.05
삼림지	0.01
물	0.00
도심지	0.00

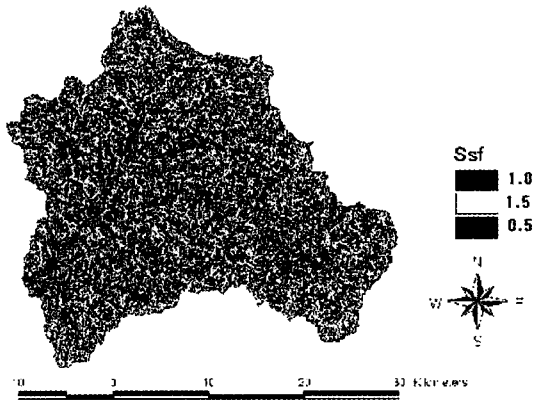


그림 6. 경사모양인자에 대한 분포도

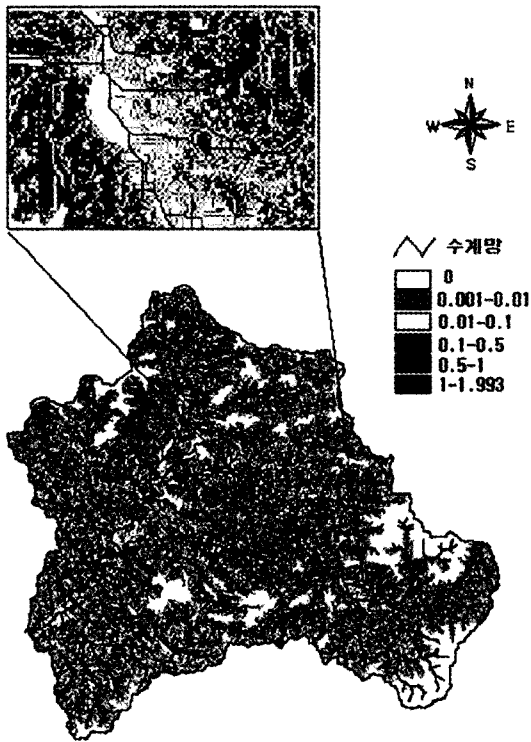


그림 7. 홍천강유역의 토양유실량 분포도

하였다.

3.3 수정토양유실모형에 의한 토양유실량 산정

토양유실량의 산정은 강우침식인자, 토양침식인자, 지형인자, 침식조절인자, 경사모양인자 등을 각각 자료층별로 구축하여 식 1에 의해서 통합된다.

수치화된 각각의 포괄영역을 22 m×22 m 크기를 갖는

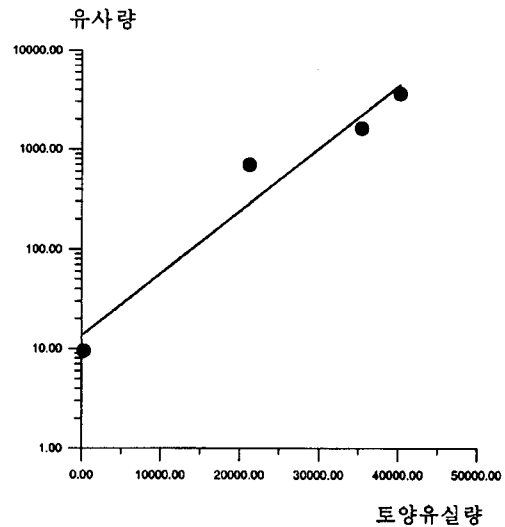


그림 8. 토양유실량과 유사량에 대한 회귀분석

격자형 자료로 변환한 후, 그리드 분석기능을 사용하여 토양유실량을 계산하였다.

그림 7은 6월 5일에서 6월 6일까지의 강우사상에 대하여 대상유역에서 추정된 토양유실량을 나타낸 것이다.

유역내에서 흰색부분은 토양유실이 발생되지 않은 지역을 나타내고 있고, 전체적으로 헥타아르당 0.001톤에서 평균값이 0.0035톤의 이내의 범위가 지배적으로 분포하고 있으며, 발생하는 토양유실량 대부분이 하천이 지나가는 부분에서 많이 발생되고 있음을 알 수 있다.

6월 5일과 6월 6일에 발생한 강우사상으로 발생한 토양유실량의 최소값은 셀을 기준으로 볼 때, 헥타아르당 0.0톤, 최대값은 1.993톤으로 그 간격이 1.993톤이며, 평균값은 0.003톤으로 계산되었다. 이것은 대부분의 지역에서 발생하는 토양유실량이 낮은 값이라는 것을 의미하기 때문에, 등급을 일정하게 두고 그림으로 나타냈을 경우 대부분의 지역이 같은 색으로 표현되어 가시적인 효과가 떨어진다. 그러므로 그림 8에 제시된 것처럼 등급을 0, 0.001-0.01, 0.01-0.1, 0.1-0.5, 0.5-1, 1-1.993 등 임의로 지정하여 나타내었다.

그림 7에서 붉은색 부분은 헥타아르당 토양유실이 가장 많이 발생하는 지역을 나타내고 있다. 삼림지역이 대부분 위치하고 있어 토양유실이 발생하지 않는 지역인 녹색이나 흰색 부분은 상류쪽에 많이 분포되어 있는 반면에, 농경지가 많이 분포하고 있는 하류쪽은 붉은색 부분의 빈도가 많아지고 있음을 알 수 있다.

표 3. 홍천교 지점에서의 유사량

날짜	관측시간	유량 (CMS)	관측 유사 농도(mg/l)	총유사량 (ton/days)
6/6	13:10	4.423	25.00	9.55
6/26	14:50	139.134	60.54	727.76
6/26	16:58	132.016	53.56	610.92
7/1	19:10	266.079	81.16	1865.81
7/1	19:15	265.314	60.45	1385.70
7/3	11:40	398.643	142.55	4909.82
7/3	13:45	343.577	110.47	3279.31
7/3	14:50	319.704	97.66	2697.61

하천을 따라 곳곳에 흰색 부분이 나타나고 있는데, 이러한 부분은 도심지역이거나 물이 분포하고 있는 지역으로 강우로 인하여 발생하는 토양유실량이 없는 지역이다.

3.4 총유사량 산정

표 3은 강원대학교 수공학연구실에서 1998년에 관측한 홍천강유역의 홍천교지점에 대한 유량과 유사량을 나타낸 것이다

유사량 관측지점으로는 유역의 특성상 하상재료가 거의 자갈이나 자갈에 가까운 조립질로 이루어진 지역을 찾아 선정하였다. 유사의 종류가 하상재료가 모래인 곳에서처럼 소류사가 아니라 씻겨서 생성되는 세류사이므로 관측시 전구간에서 유사농도 분포가 일정하다고 보고, 유사실측시 미관측구간의 오차를 최대한 줄이기 위하여 하상 가까이에서 채취를 실시하였다. 채취한 유사에 대해 입도 분포 실험을 실시하여 입도 분석을 수행한 후, 단위 유사농도를 구하였다. 총유사량 산정은 단위 유사농도에 유량을 곱하여 구하는 방법을 사용하였다. 유사량 관측은 강우가 발생한 뒤 수위가 가장 높았을 때 관측하였으며, 이 때 발생한 순간 유사량을 일단위로 변환하여 하루동안 생성될 수 있는 최대 유사량을 구하였다.⁶⁾

6월 26일, 7월 1일, 7월 3일 등은 강우가 시작된 후, 수위가 가장 높았을 때 유사량을 관측한 다음, 수위가 점차 내려갈 때 임의의 시간을 선정하여 관측한 것이다. 이 자료들은 일(日) 평균 유사량을 구할 때 기초 자료로 사용하였다.⁶⁾

3.5 회귀분석

토양유실량은 강우에 의해 발생하여 손실되는 토립자

표 4. 토양유실량과 유사량

번호	강우관측일	토양유실량 (t/ha/day)	유사량 (t/day)
1	6/5-6/6	273.83	9.55
2	6/25-6/26	21249.87	669.34
3	6/30-7/1	35412.72	1625.75
4	7/2-7/3	40282.43	3628.91

의 양인 반면에 유사량은 하천에서 유수에 의해 운반되는 토립자의 양으로 역시 강우시 주로 발생한다는 특징이 있다. 표 4는 추정된 토양유실량과 관측한 유사량을 나타낸 표이다.

유사량을 관측할 당시의 강우량을 보면, 강우가 지속되는 동안 강우강도의 변화 때문에 강우의 분포가 일정치 않게 된다. 따라서 유사량을 관측할 경우도 수위가 가장 높았을 때 관측한 것 이외에 관측을 더 수행하였으며, 유사량과 유실량을 비교하기 위해서 같은 강우사상에 대해서 관측한 유사량들에 대해서는 평균값을 사용하였다. 유실량은 각 셀마다 헥타아르 당 톤으로 계산되어 있어서 이 값을 전체유역에서 발생하는 유실량으로 변환하였다. 변환하는 방법은 셀 크기에 해당하는 22m×22m에 대한 유실량으로 바꾼 후, 각 셀에 있는 모든 값을 더하는 방법을 사용하였다.

홍천강 유역에 대해서 수정토양유실모형(RUSLE)으로 구한 토양유실량과 실측한 유사량 사이의 상관성을 알아보기 위하여 회귀분석을 수행하였다. 그림 8은 토양유실량과 유사량 사이의 관련성을 알아보기 위해서 수행한 회귀분석 결과로서, x축은 수정토양유실모형(RUSLE)으로 계산한 토양유실량을, y축은 직접 관측한 유사량을 나타내고 있다. 유실량에 대한 유사량의 회귀분석 결과는 $\ln Y = 0.00014403 \cdot X + 2.59656$ 이며, 그의 상관 계수는 0.949였다.

Equation :

$$\ln(Y) = 0.00014403 \cdot X + 2.59656$$

Alternate equation :

$$Y = \exp(0.00014403 \cdot X) \cdot 13.4175$$

R-squared : 0.948812

4. 결 론

지형공간정보체계를 이용하여 연구대상지역의 토양유

실량을 예측하기 위한 수정토양유실모형을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유실량 예측을 위하여 강우사상시 USLE모형을 수정 개선하여 일단위의 토양유실량을 구할 수 있는 수정 토양유실모형을 지형공간정보체계에 도입함으로써 기초 자료의 저장과 갱신을 신속하고 편리하게 처리할 수 있었다.

2. Wischmeier가 제시한 경사도와 경사길이 개념을 지형공간정보체계에 대입하여 지형인자를 자동으로 계산할 수 있도록 프로그래밍함으로써 복잡한 처리과정을 단순화시켜 작업시간을 단축할 수 있었다.

3. 수정토양유실모형을 적용함으로써 면상침식으로 유입되어, 동시에 여러지점에서 유실량을 관측할 수 없는 호소나 우수지로의 퇴적 가능한 양을 예측할 수 있어 호소에서의 담수량의 감소 및 오염도 예측도 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 양인태, 김연준, “수문해석을 위한 DEM에 의한 지형의 경사도분석에서 격자크기의 영향”, 한국측지학회지, 제 15권, 제2호, 1997, pp. 221-230.
2. 김연준, “지형공간정보체계를 이용한 유역분석”, 강원대학교 토목공학과 박사학위논문, 1999.
3. 양인태, 천기선, 박재훈, “수치표고모형에 의한 유역에서의 지형인자 분석”, 한국측지학회지, 제17권, 제1호, 1999, pp. 61-67.
4. 김용남, 양인태, 김육남, 박 건, “세계열 인공위성 데이터와 GIS Tool을 이용한 춘천시 도시공간변천 조사”, 대한토목학회, 1999년도 학술발표회 논문집(IV), 1999, pp. 541-544.
5. 신계중, “지형공간정보체계를 이용한 유역의 토양유실분석”, 강원대학교 토목공학과 박사학위논문, 1999.
6. 강원대학교, “지방하천 유사량 산정기준 개발 용역 보고서”, 강원대학교 토목공학과 수공학연구실 보고서, 1998.
7. “수공학워십”, 한국수자원학회, 1998.