

제주도의 토양침식과 유사전달 예측 기법에 관한 연구

A study on soil loss and sediment delivery modeling for three ungauging basins in Jeju-do

박원배·배선학*·강상혁**

< 목 차 >

- | | |
|---------------|-------------|
| I. 서론 | IV. 결과 및 고찰 |
| II. 연구대상지의 선정 | V. 적용결과 |
| III. 연구방법 | <참고문헌> |

< 국문 초록 >

최근 해안 침식 및 지형변화가 사회적인 문제가 되고 있다. 해안의 침식과 지형변화의 대책을 수립하기 위해서는 무엇보다도 토사의 유출량을 평가하는 것이 출발점이라 하겠다. 본 연구의 목적은 미계측 유역이 대부분인 우리나라 하천에 대해 하천의 유역 특성을 고려한 유사량 산정방법을 제시하는 것이다. 미계측 유역의 유사량을 산정하기 위해 먼저 계측 지역에 대해 면적-유사량 관계식을 도출하였다. 이를 토대로 미계측 유역인

* 박원배, 제주발전연구원

* 강원대학교 지리교육과 조교수(Assistant professor, Dept. of Geography Education, Kangwon National University), gis119@kangwon.ac.kr

** 교신저자(Corresponding author), 한도엔지니어링 이사, kang7231@hanmail.net

제주도 3개 하천의 유사량을 계산한 결과 유도된 계산식 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

이러한 결과는 향후 미계측 표사계의 토사 수지식을 정량적으로 계산할 수 있으며 해안의 지형변화에 대한 대책을 수립하는데 유익한 정보를 제공할 것으로 기대한다.

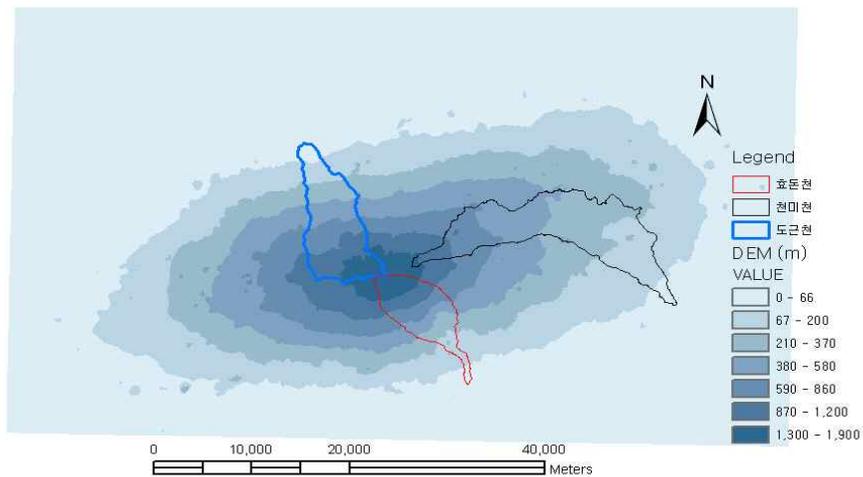
주요어 : 해안 지형변화, 토사량, RUSLE, 토사전달율, GIS

I. 서론

해안은 육지와 바다를 연결하는 완충지대로 인구와 자산이 밀집해 있는 경우가 많다. 최근 빈번하게 발생하는 태풍으로 인해 해안지역에 설치된 도로 및 접속된 구조물에 대한 피해가 사회적 문제로 대두되고 있다(육근형 외, 2008; 강동균과 서종철, 2012). 해안침식의 범위, 규모 등에 대한 원인은 아직 명확히 규명되어 있지 않으나 대체로 유역으로부터 공급되는 토사의 불균형으로 인한 해안의 침식과 표사계 내에 설치된 구조물과 해안파에 의한 국부 세굴이 주 원인이 되는 것으로 알려져 있다(국토해양부, 2008; 2009; 우한별과 장동호, 2010). 그 외에 기후변동으로 인한 해수면 상승도 하나의 요인으로 분류되고 있으나 이에 대한 구체적인 분석은 아직 정형화 되어 있지 않다. 이 중에서 본 고에서는 제주도의 지형변동의 유형 분석과 유역에서 해안으로 유입되는 토사에 대해 다루기로 한다. 유역으로부터 하구 또는 해안으로 유입되는 토사의 유출은 해안의 표사원을 구성하는 중요한 공급원이다. 우리나라의 경우 토사에 대한 체계적인 조사는 국토부가 국제수문조사계획(International Hydrological Programme)에 가입하기 시작한 1975년부터 시작되어 왔다. 그러나 그 당시에 계측된 자료는 하상의 변동 및 제반 환경의 변동으로 인해 현재 자료를 활용하기에는 무리가 있다. 이 후 2005년부터는 유량조사 사업단이 발족되어 유량과 유사량을 체계적으로 조사, 분석하게 되었다. 그러나 조사 지점이 우리나라 대하천 및 주요 하천에 편중되어 있어 지역적인 하천의 유사량을 평가하기에는 한계가 있다. 이러한 인식을 토대로 본 고에서는 먼저 지형자료를 이용하여 해안의 변동요인을 분석하였고 GIS기반의 계측 유역의 면적-유사량 관계식을 유도하여 미계측 유역에 적용 가능성을 검증하였다.

II. 연구대상지의 선정

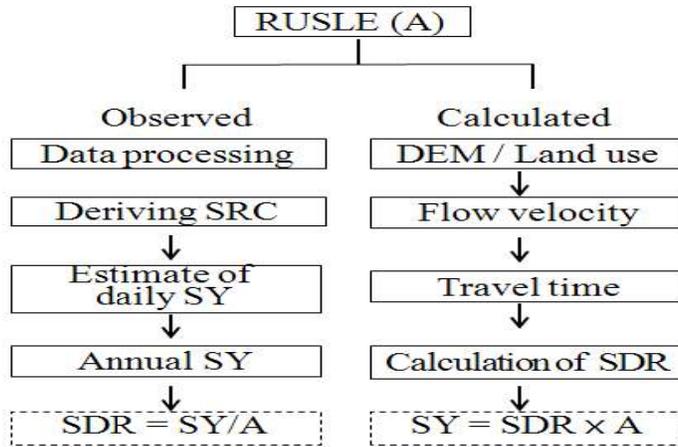
미계측 구역의 토사량을 예측하기 위해서는 먼저 관측 지점에 대한 구역-토사유출량 관계식을 유도하는 것이다. 이를 위해 기존 하천의 관측지점으로 대상으로 유량과 유사량 자료를 분석하였다. 유사계의 미계측 구역 지점은 제주도의 효돈천, 천미천 그리고 도근천의 3개 하천을 <그림 II-1>와 같이 선정하였다.



<그림 II-1> 제주지역 표고분포 및 연구대상지

III. 연구방법

미계측 구역의 유사량을 평가하기 위해서는 면적-유사량 관계식을 먼저 도출하여야 한다. 계측 구간인 경우는 실측 유사량을 직접 구할 수 있으나 이를 위해서는 유량과 유사량 자료로부터 토사-유사량 관계곡선을 구해야 한다. 이 관계곡선으로부터 시간 적분을 하여 월간 또는 연간 단위의 유사량을 구할 수 있다. 계측 구역과 미계측 구역의 토사량을 구하는 방법을 정리하여 나타내면 <III-1>과 같다.



〈그림 Ⅲ-1〉 유사전달율과 유사량 계산 흐름도

3.1 유역에서의 토양의 잠재적 손실량

유역으로부터 토양손실량은 토양, 식생과 지형적인 특성에 의존한다. 실제 유역에서 이러한 특성은 다양한 소유역에 따라 변한다. 따라서 계산하고자 하는 적용 유역은 동질성을 가지는 작은 단위로 나눌 필요가 있다. 격자 기반의 분할은 모형을 단순화하는데 합리적이다. 그러나 분할하는 격자의 크기는 유역의 동질성을 나타낼 수 있는 크기가 되어야 한다. 유역의 토양 손실량을 나타내는 USLE 방법은 작은 규모의 소유역에서 개발되었으므로 격자 기반의 토양손실량 평가방법이 보다 적절할 것이다. 본 연구에서 토양 유실량을 산정하는데 적용한 공식은 USLE식을 개선한 RUSLE 공식으로 다음과 같다.

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

여기서 A: 연간 토양유실량 (t/ha^{-1}) R: 강우인자 ($MJ \text{ mm } ha^{-1} h^{-1}$) K: 토양침식인자 ($t \text{ ha } h \text{ ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1}$) LS: 지형인자 C: 식생인자 P: 토양보전인자이며 이 중에서 토양 침식인자, 지형인자, 식생인자 및 토양보전인자는 기존 연구를 참조하여 구하였고(김주흔 외, 2007; 이민부, 2008) 연평균 유사량을 산정하기 위한 강우인자는 전국 기상관측망 축적자료 중에서 최소 20년 이상된 강우관측소의 자료를 등우선도를 작성하여 적용하였

다. 연평균 강우인자 산정을 위한 계산식은 식(2)와 같고 도출된 값을 이용하였다.

$$R = 38.5 + 0.35 \times r \quad (2)$$

여기서 r 은 연평균 강우량 (mm)이다.

3.2 하천의 유사량 평가

하천의 유사량 평가는 연구방법에서 이미 언급한 바와 같이 유사채취기에 의한 직접적인 관측방법과 모형에 의해 산정하는 간접적인 방법으로 나눌 수 있다. 직접적인 유사량 관측방법은 많은 인원과 장비가 소요되어 현재 관측 지점이 제한적으로 운영되고 있다. 이에 비해 간접적인 방법은 수위관측점이 설치되어 있지 않은 미계측 유역을 대상으로 적용성이 평가되고 있다.

모형에 의한 유사량 평가 방법은 구체적으로 유역의 잠재적 토양 침식량으로부터 토사전달율 (SDR)과 유사량 (SY)의 조합에 의해 구할 수 있다.

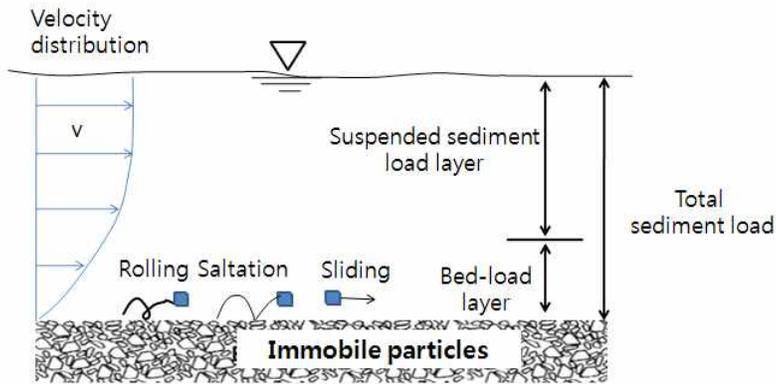
하천에서 유하되는 유사는 크게 부유사와 소류사로 나눌 수 있다. 소류사는 토립자가 하상에서 <Ⅲ-2>와 같이 구르거나 진동에 의해 이동하는 입자이며 부유사는 부유상태에서 이동하는 토사를 말한다. 총 유사량은 부유사의 관측에 의해 평가할 수 있는데 이 경우 소류사의 관측은 무시된다. 일반적으로 총유사 중에서 소류사는 10-20%로 알려져 있으며 산지하천인 경우는 그 보다 많은 20-40%로 보고되고 있으나 실제 소류사의 관측은 많은 오차를 포함하므로 관측된 자료는 많지 않다 (Moges, 2010). 따라서 본 고에서는 부유사(유사)를 대상으로 평가하기로 한다.

유사의 연속관측은 다음과 같이 유사농도, 유량 및 관측기기의 관측시간 간격으로 구할 수 있다.

$$SSL = \int_0^t SSC_i \times Q_i \times dt \quad (3)$$

여기서 SSL 은 토사량(g), SSC_i 는 부유사 농도(g/L) Q_i 는 유량(L/s), dt 는 시간간격(s)

이다. 그러나 유사의 연속적인 관측은 많은 노력과 비용이 소요되므로 일반적으로 토사 농도는 유량 증가에 따라 증가하는 1차 선형 함수관계를 이용하여 유사와 유량의 관계 식(Sediment Rating Curve, SRC)을 개발하여 산출한다.



〈Ⅲ-2〉 유사의 이동 및 분류

3.3 하천의 유사 전달을 평가

하천의 임의 기준점에 도달하는 유사 전달율은 시간에 대한 함수이다. 토사의 이동시간이 짧으며 유사전달율은 크고 이동시간이 길면 유사전달율은 작아질 것이다. 이 유사 전달율 (SDR)을 모형식으로 표시하면 다음과 같다 (Lane *et al.*, 1997; Jain and Kothyari, 2000; Moges, 2010)

$$SDR = \exp(-\gamma t_i) \quad (4)$$

여기서, t_i 유하시간(travel time, 시간), γ 대상하천의 특성에 따른 계수를 나타낸다.

식 (5)에서 i 번째의 격자에서 최단거리의 흐름격자가 m 격자로 횡단하고 i 번째의 흐름 길이를 l 라고 한다면, i 격자의 흐름의 속도는 v_i 격자에서 가장 근접한 수로의 유하시간 t_i 가 된다. 식 (4)의 유하시간 t_i 는 다음 식(5)와 같이 흐름방향에 위치한 각각의 m 격자를 통한 시간을 합하여 평가된다.

$$t_i = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{v_i} \quad (5)$$

식 (5)에서 흐름속도는 표면경사와 피복도를 고려하여 다음과 같이 구한다.

$$v_i = a_i \cdot S_i^b \quad (6)$$

물 흐름 속도의 참고 값은 토지피복도를 고려하여 다음 <표 Ⅲ-1>과 같이 제시하고 있다. 여기서 b 는 0.5로 경험값이다. S_i 는 i 번째 격자의 경사, a_i 는 유속계수라고 하면 식 (4)와 (5)을 결합하여, 다음의 식 (7)를 얻을 수 있다.

$$SDR = \exp\left(-\gamma \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{S_i^{0.5}}\right) \quad (7)$$

여기서 t 는 유하시간이며 S_E 를 RUSLE를 이용한 i 격자에서의 토양 손실량이라 하면 토 사유출량 SY 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$SY = \sum_{i=1}^n SDR \cdot S_E \quad (8)$$

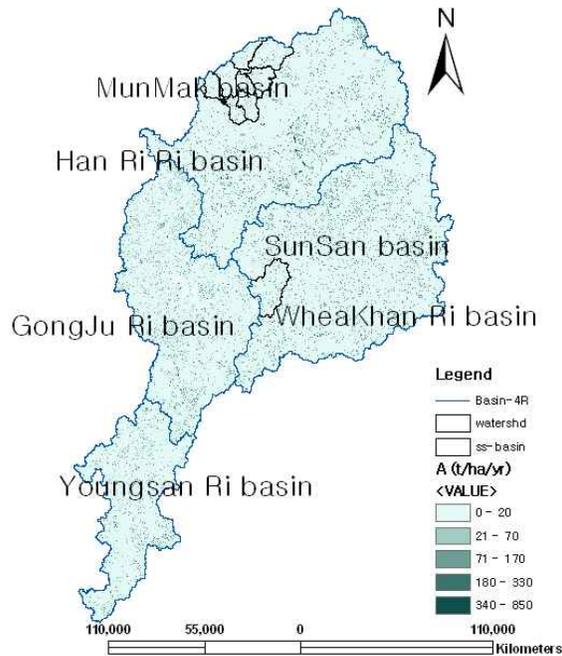
<표 Ⅲ-1> 토지이용별 유속계수

Land clover	a value	reference
Forest	0.76	Fernandez et et al., 2003
Paved wildfield	6.19 3.08	
Short grass	2.13	Mutua and Klik(2006)
Agriculture	2.62	
Paddy field	0.45	
Upland field	2.77	
Wetland	2.7	
Water	0.0	

IV. 결과 및 고찰

4.1 잠재적 토양손실량 평가

유역으로부터 토양의 잠재적 손실량 평가는 현재 유사량 관측을 운영하고 있는 여주(YJ), 왜관(WK), 구례(KR), 공주(KJ), 문막(MM), 선산(S-San) 등 6개 지점을 선정하여 구하였으며 계산 결과는 <IV-1>과 같다.



<그림 IV-1> 관측 지점의 토양유실량 평가

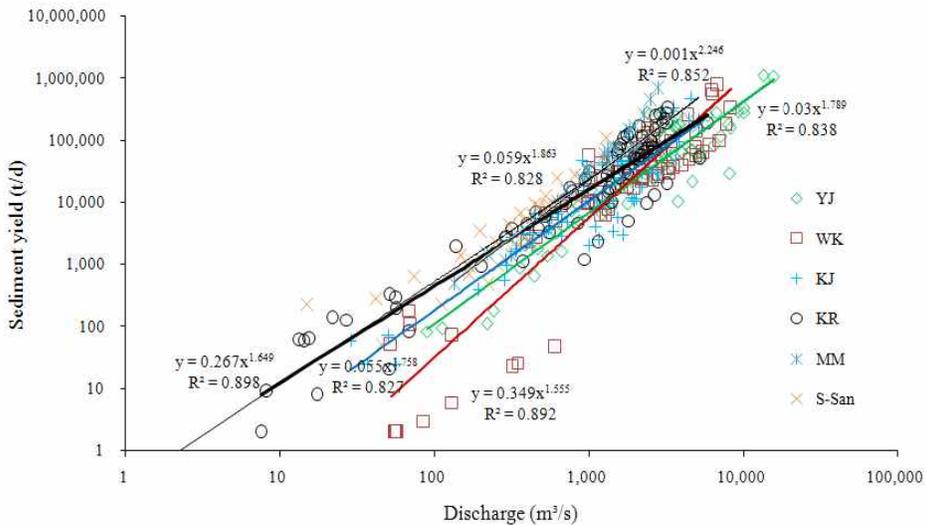
4.2 유사량 평가

관측에 의한 유사량 계산은 일평균 유량에 대하여 SRC를 시간 적분함으로써 월간 또는 연간 유사량을 구하는 방법이다. SRC는 유량조사 사업단에서 제공하는 자료 중에서

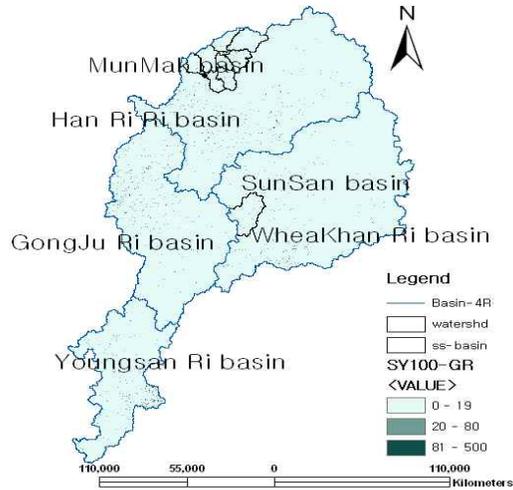
유역면적의 크기를 고려하여 선정된 6개 지점에 대해 구하였으며 도출된 SRC는 <그림 IV-2>에 나타난 바과 같이 유량과 유사량의 유출 경향이 0.8 이상 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 하도에 유출되는 토사의 양은 일반적으로 유역의 규모 및 지형적인 영향에 크게 지배를 받는다. 유역에서 유출되는 토양의 잠재적 유출량에 대해 실제 임의 하천까지 도달하는 토사의 비율을 토사전달율(Sediment Delivery Ratio, SDR)이라 하는데 일반적으로 입자의 유하시간과 지수함수적인 관계에 있는 것으로 알려져 있다. 도달시간이 작은 급경사 소규모의 유역에서는 SDR이 큰 값을 가지며 도달시간이 긴 대유역에서의 SDR은 작은 값을 가지는 것으로 보고되고 있다. 유사전달에 대한 계산은 다음 식(9)를 변형하여 유사량 또는 전달율을 구할 수 있다.

$$SY = S_E \times SDR \quad (9)$$

여기서 SY는 하천기준점에서의 토사유출량(t/yr), S_E 는 토양의 잠재적 손실량을 나타낸다. 유량-유사량 관계곡선식(SRC)에 의해 계산된 계측유역의 토사유출량을 도식적으로 표시하면 <그림 IV-3>과 같다.

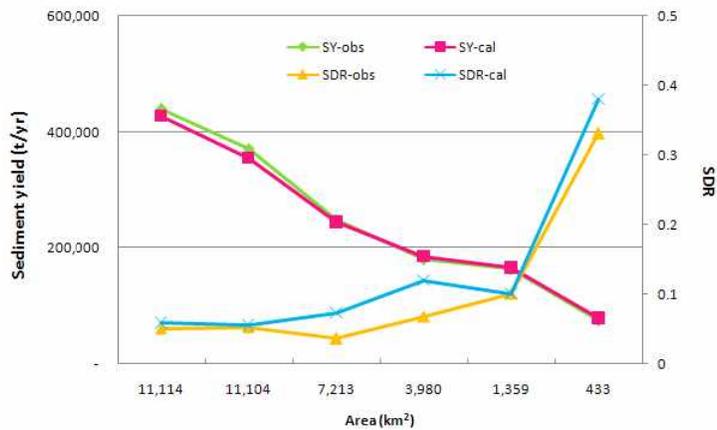


<그림 IV-2> 유사-유량 관계곡선

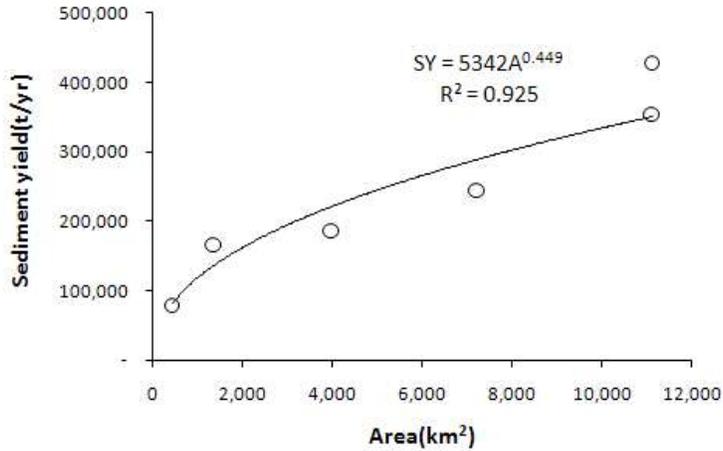


〈그림 IV-3〉 토사 유출량 산정

계측 유역의 토사유출량을 구하기 위해 모형의 유역 특성 파라미터를 조정하여 다음 〈그림 IV-4〉과 같이 유역에 대한 토사전달율과 유사량의 결과 값을 비교하였다. 모형의 보정은 식(4)의 유역특성 파라미터를 관측 값에 근사하도록 조정하였으며 파라미터 값은 0.6-1.2의 값을 보였다. 유량과 계측된 토사량을 이용하여 면적 유사량의 관계곡선은 〈그림 IV-5〉와 같으며 이를 수식화한 관계식은 식(10)과 같다.



〈그림 IV-4〉 유역면적과 유사량·토사유출량 관계곡선



〈그림 IV-5〉 유역면적-토사유출량 관계곡선

$$SY = 5,342 \times A^{0.449} \quad (R^2 = 0.925) \quad (10)$$

4.3 미계측 유역의 유사량 평가

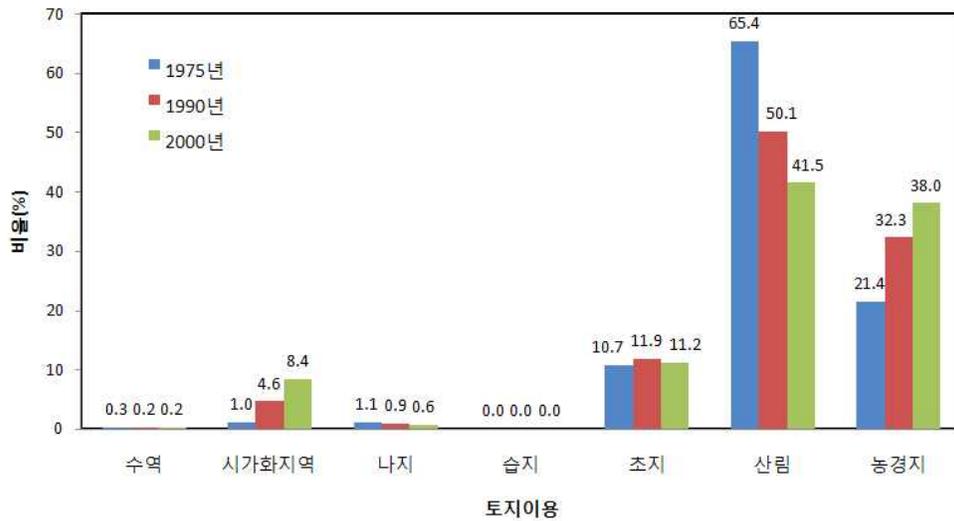
제주도 토지피복은 〈표 IV-1〉 및 〈그림 IV-6〉에 제시한 바와 같이 산림은 급격히 줄어든 반면 농경지는 지속적으로 증가하는 것으로 조사되었다. 본 연구 대상지인 3개 하천의 모의된 토사유출량과 기존 계측 유역의 관측 값과 비교하면 〈표 IV-2〉와 같다. 모의 계산한 토사유출량을 계측유역에서 구한 유역-유사량 관계곡선으로부터 유도한 유역-토사생산량식(식 10)에 대입하여 계산한 결과, 〈표 IV-2〉에 제시한 바와 같이 유사한 규모(order)로 되었음을 알 수 있다. 각 연도별 토양 손실량은 수자원 관리시스템(WAMIS)에서 제공하는 토지피복도를 이용하였으며 연도별 유사량의 차이가 발생하는 것은 해당 연도의 토지피복이 다르기 때문이다.

본 연구에서 계산된 제주도 3개 하천의 유사량 모의 결과는 지형, 토지이용의 형태 등의 복잡한 불확실성에 비하면 의미있는 계산 값이라 보여진다.

〈그림 IV-7〉과 〈그림 IV-8〉은 제주도 3개 하천의 연간 토양손실량과 유사량을 각각 예시적으로 나타낸 것이다.

〈표 IV-1〉 제주지역 연도별 토지피복 변화

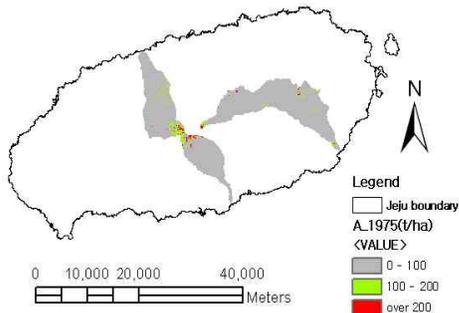
토지피복		면적(km ²)			비율 (%)		
분류번호	종별	1975년	1990년	2000년	1975년	1990년	2000년
1	수역	6.1	4.6	3.7	0.3	0.2	0.2
2	시가화지역	19.1	85.6	154.9	1.0	4.6	8.4
3	나지	20.1	16.4	11.9	1.1	0.9	0.6
4	습지	0.3	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
5	초지	198.9	219.5	207.6	10.7	11.9	11.2
6	산림	1,210.0	926.0	767.0	65.4	50.1	41.5
7~8	농경지	397.0	597.0	704.0	21.4	32.3	38.0
7	논	-	9.8	16.3	0.0	0.5	0.9
8	밭	397.0	587.4	687.5	21.4	31.7	37.2
계		1,851.9	1,850.4	1,850.0	100.0	100.0	100.0



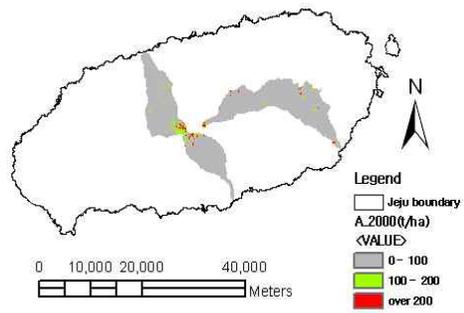
〈그림 IV-6〉 제주도의 토지피복 변화

〈표 IV-2〉 연도별 토사 유출량 계산결과

년도	하천	토양손실량 (t/ha)	전달율	토사량(t/ha)	
				예측 값	관측 값
1975	효돈천(HD)	91,000	0.12	45,000	36,066
	천미천(CM)	80,000	0.04	25,000	55,628
	도근천(DG)	190,000	0.09	62,000	44,069
1990	효돈천(HD)	91,000	0.13	34,000	36,066
	천미천(CM)	80,000	0.03	9,300	55,628
	도근천(DG)	190,000	0.08	32,000	44,069
2000	효돈천(HD)	91,000	0.18	51,000	36,066
	천미천(CM)	80,000	0.05	17,500	55,628
	도근천(DG)	190,000	0.12	48,000	44,069

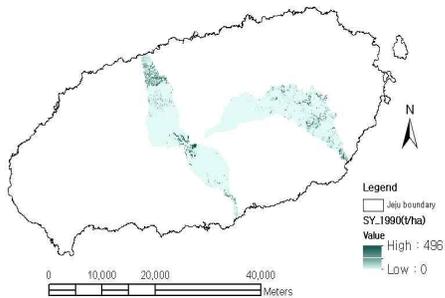


(a) 1975년

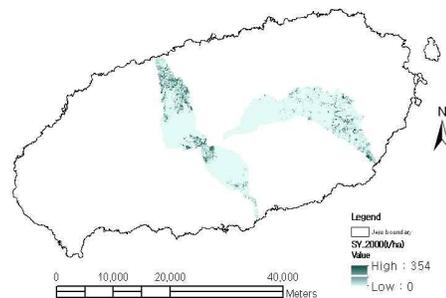


(b) 2000년

〈그림 IV-7〉 제주 3개 하천 잠재적 토양유실량 분포도



(a) 1990년



(b) 2000년

〈그림 IV-8〉 제주 3개 하천 토사생산량

V. 적용결과

본 연구에서는 유사량 평가에 대한 자료 구축이 되어 있지 않은 미계측 유역에 대해 각종 지형정보를 이용하여 유사량을 산정할 수 있는 방안에 대해 고찰하였다. 모형에 의한 유사량을 평가하기 위해서는 먼저 모형에 대한 검증이 선행되어야 한다. 유사량 산정에 대한 모형의 검증은 분포형 모형의 유사전달율의 유역특성 계수 γ 값을 관측 유사량에 근접시키는 방법으로 수행하여 유역특성계수의 범위를 구하였다. 이와 같은 과정을 통하여 유역의 면적-유사량 관계식을 도출하였다. 모형으로 얻어진 유역 특성계수를 이용하여 미계측 유역인 제주도 3개 하천에 적용한 결과 유사한 규모의 유사량을 구할 수 있었다.

본 연구의 성과는 미계측 해안 유역에 대한 표사계의 지형변화의 원인과 해빈 유실대책을 수립하는데 기초적인 자료를 제공할 것으로 기대한다.

[참고문헌]

- 강동균·서종철(2012), “주기적 지형측량을 통한 해빈과 해안사구의 지형변화:충남 보령시 소항사구를 사례로”, 한국지형학회지, 19(2), 69-79.
- 김주훈·이충대·김경탁·최윤석(2007), WAMIS 토지피복도를 활용한 토양유실량 분석, 한국지리정보학회, 10(4), 122-131.
- 국토해양부(2009), “연안침식방지 종합대책 수립을 위한 조사연구”.
- 국토해양부(2008), “국제수문개발계획(IHP) 연구보고서”.
- 박경훈(2003), “GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식 위험도 평가”, 한국지리정보학회, 6(4), 24-36.
- 우한별·장동호(2010), “다중시기 항공사진과 현장조사를 통한 해안침식변화 연구:태안반도를 중심으로”, 한국지형학회지, 17(4), 71-83.
- 육근형·최희정·정지호·장정인(2008), “연안완충공간의 보전 및 관리에 관한 연구”, 한국해양수산개발원.
- 이민부·김남신·金石株·김항덕(2008), 임진강 유역의 토지이용에 따른 지표침식에 관한 연구, 대한지리학회, 43(3), 263-275.
- Fernandez, C., Wu, J.Q., McCool, D.K., and Stockle, C.O., 2003, Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD, J. of Soil and Water Conservation, 58(3), 128-136.
- Jain, M. K. and Kothyari, U. C., 2000, Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS, Hydrological Sciences, 45(5), 771-786.
- Lane, L. J., Hernandez, M., and Nichols, M. 1997, “Processes controlling sediment yield from watershed as function of spatial scale”. Environmental modeling & Software, 12(4), 355-369.
- Moges, E. M. 2010, “Evaluation of Sediment Transport Equations and Parameter Sensitivity Analysis Using the SRH-2D Model”. MS Thesis in Universität Stuttgart.
- Mutua, B. M. and Klik, A., 2006, “ Estimating spatial sediment delivery ratio on a large rural catchment”, J. of Spatial Hydrology, 6(1), 64-80.