

# 토사유출량 산정을 위한 분포형 모형과 총괄형 모형의 비교연구

금중호<sup>1)</sup>, 박무중<sup>2)</sup>, 강인주<sup>3)</sup>, 윤용남<sup>4)</sup>

## 1. 서론

토양침식으로 인해 발생하는 토사유출은 유역내의 토사가 손실되는 그 자체로도 하천이나 저수지 등에 막대한 영향을 미치지만 토사와 함께 유출되는 오염물의 이송 또한 매우 중요하다. 그러나, 현재까지 사용되는 대부분의 토사유출량 추정공식들은 개개의 호우사상에 대한 총 토사유출량을 산정하거나, 연평균 토사유출량을 산정하기 때문에 침사지 등의 토사유출 방지를 위한 구조물의 설계나 하천 또는 저수지 등의 수질관리에 효율적이지 못하다. 따라서, 토사유출의 시간분포는 수질 모의, 침사지의 효율적 설계, 토사와 함께 이동하는 오염물질에 관한 연구, 토사유출의 추적 등에 매우 중요한 요인이 된다.

본 연구에서는 소유역의 토사유출량 산정을 위해 분포형 모형을 국내에 적용하여 그 적용성을 평가하고, 기존의 토양침식량 산정공식인 USLE 공식과 비교함으로써, 토사유출량 산정에 있어서 기존 산정공식의 문제점 및 적용한계를 밝히고, 분포형 모형을 사용함으로써 얻어질 수 있는 장점에 대해 고찰하여 침사지의 설계, 오염물질의 이송 연구에 관한 새로운 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 토양침식량 산정 모형

### 2.1 분포형 모형

분포형 모형은 일반적으로 운동파방정식(kinematic wave equation)을 수치해석하여 원하는 값을 산출하며, 강우가 하천유출로 변환되는 각 과정의 지배방정식은 다음과 같다.

#### 1) 지표면 유출(Hortonian overland flow)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $t$ 는 시간,  $q$ 는 단위흐름길이당 측방유입량,  $\alpha$  및  $m$ 은 하천경사, 조도계수, 흐름영역 등에 따른 변수이다.

#### 2) 하천홍수추적

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial x} = q_c(x, t)$$

여기서  $A$ 는 단면적,  $Q$ 는 유량,  $q_c(x, t)$ 는 단위흐름길이당 측방유입량이다.

- 
- 1) (주)새길엔지니어링 수자원부
  - 2) 한서대학교 토목공학과 조교수
  - 3) (주)유일엔지니어링 전무
  - 4) 고려대학교 토목환경공학과 교수

### 3) 유사이송

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q(x,t)$$

여기서  $C_s$ 는 유사농도,  $Q$ 는 유출량,  $A$ 는 흐름단면적,  $e$ 는 침식량,  $q$ 는 측방유사 유입량이다.

### 2.2 총괄형 모형

국내에서 토양침식량을 산정하기 위해 주로 사용되는 모형은 USLE 공식, RUSLE 공식, MUSLE 공식 또는 원단위법 등의 총괄형 모형이며, 가장 대표적인 모형인 USLE 공식의 기본이론은 다음과 같다.

USLE 공식은 강우침식인자  $R$ , 토양침식인자  $K$ , 지형인자  $LS$ , 식생피복인자  $C$ , 및 토양보존대책인자  $P$ 의 곱으로 이루어져 있으며, 경사진 소유역에서의 토양침식량 추정에 합리적인 방법으로 알려져 있고, Wischmeier 등(1965)에 의해 제안되었다. 또한, USLE 공식은 토사유출량이 아닌 토양침식량을 계산하는 공식이기 때문에 유역출구에서의 토사유출량을 계산하기 위해서는 유사전달률(delivery ratio, DR)을 고려해 주어야 한다.

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

여기서  $A$ 는 단위면적당 평균토양침식량,  $R$ 은 강우침식인자,  $K$ 는 토양침식인자,  $LS$ 는 침식사면의 지형인자,  $C$ 는 식생피복인자,  $P$ 는 토양보존대책인자이다.

## 3. 모형의 적용

### 3.1 대상 유역

본 연구의 대상 유역은 충청남도 서산시 해미면에 위치한 무명천 유역이며, 산수저수지로 유입한다. 대상 유역의 총 면적은 3.04km<sup>2</sup>로서 소유역에 속하며, 산림이 차지하는 비율이 82.5%로 가장 높고, 밭, 시가지, 논 순이다. 또한, 최근에 들어 유역의 중심에 위치한 한서대학교로 인하여 급격한 도시화가 이루어져 시가지의 비율이 증가하고 있으며, 다량의 점원, 비점원 오염물질이 유입되고 있는 실정이다. 대상 유역의 유역도는 그림 1과 같고, 모형의 적용을 위한 소유역 분할도는 그림 2와 같다.

본 연구에서는 3개의 강우사상(1999년 7월 8일, 1999년 7월 22일, 1999년 10월 1일)으로 인해 발생한 실측 유출수문곡선과 실측 유사량수문곡선을 획득한 후 동일한 강우를 분포형 모형과 총괄형 모형의 입력으로 하여 계산된 유출수문곡선과 유사량수문곡선을 비교하도록 한다.

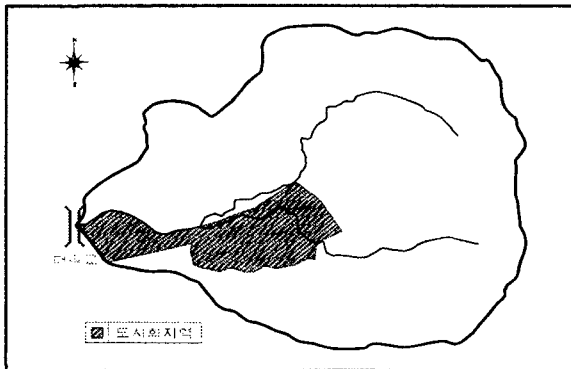


그림 1. 유역도

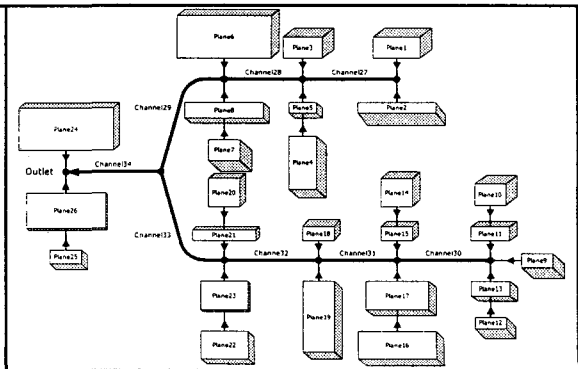


그림 2. 모형의 적용을 위한 유역분할도

### 3.2 분포형 모형의 적용

획득한 3개의 강우사상 중에서 1999년 7월 8일의 강우에 대해 분포형 모형을 적용하고, 1999년 7월 22일과 10월 1일의 강우에 대해 모형을 검증하였다. 각 강우사상에 대해 실측값과 계산된 값을 그림 3~그림 8에 나타내었다.

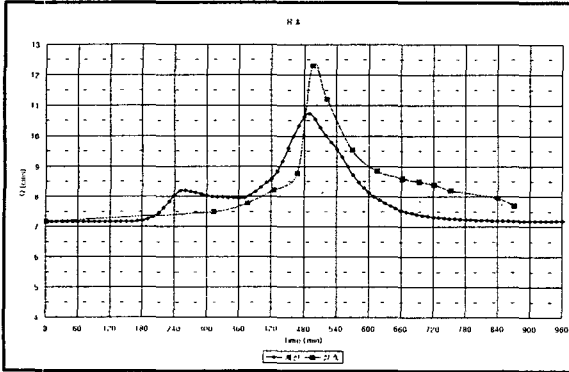


그림 3. 유출수문곡선(7월 8일)

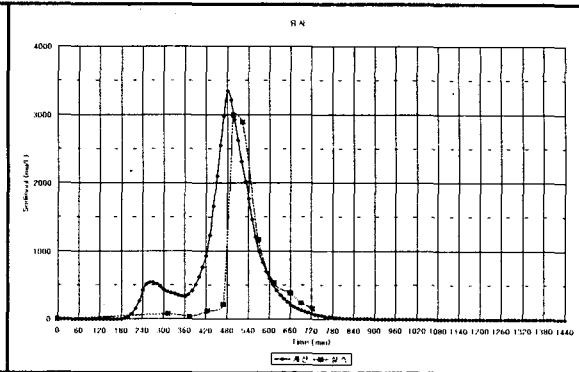


그림 4. 유시유출수문곡선(7월 8일)

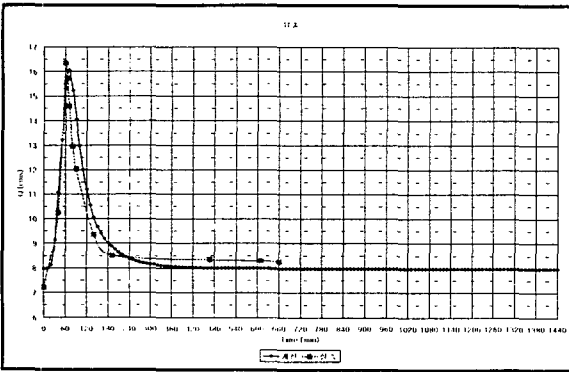


그림 5. 유출수문곡선(7월 22일)

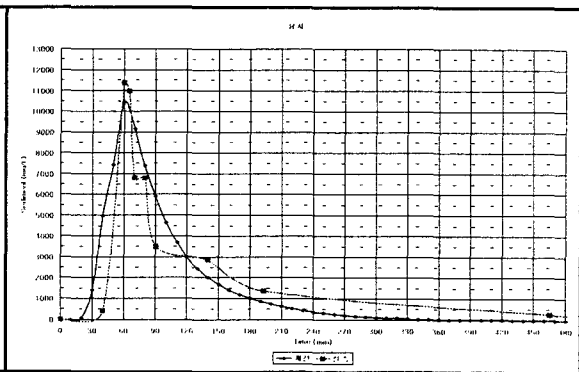


그림 6. 유시유출수문곡선(7월 22일)

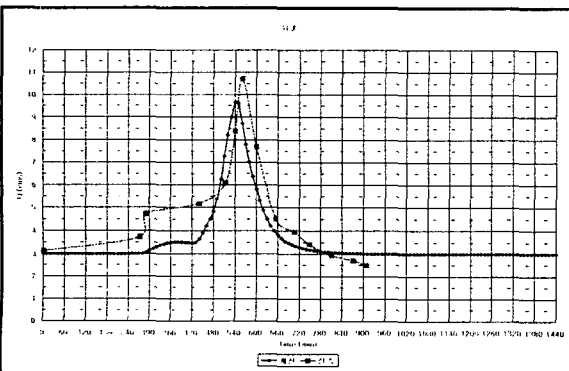


그림 7. 유출수문곡선(10월 1일)

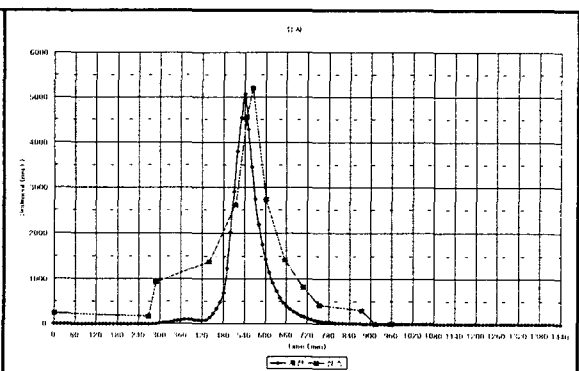


그림 8. 유시유출수문곡선(10월 1일)

분포형 모형을 적용, 검증한 결과 유출량의 경우 3개의 강우사상에 대해 분포형 모형을 사용하여 계산된 첨두유량이 실측된 첨두유량보다 작게 산출되었으며, 특히 1999년 7월 22일 강우의 경우 실측값과 계산된 값의 비가 약 92%로 거의 일치한 결과를 보였다. 또한, 첨두시간의 경우 1999년 7월 22일의 강우를 제외한 나머지 강우사상에 대해서는 실측된 첨두시간보다 계산된 첨두시간이 더 늦게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 7월 22일 강우의 특성이 발생 1시간 이내세 강우가 집중된 소나기의 형태를 띠고 있기 때문에 시간단위의 강우자료를

획득하여 계산한 결과가 1시간 이내에 집중적으로 내렸다가 소멸되는 경우에 의한 유출을 완벽히 재현하기에는 무리가 있기 때문이라고 사료된다.

유사량의 경우 침투값을 비교하면 1999년 7월 8일의 강우의 경우에만 계산된 값이 실측된 값보다 약간 크게 산출되는 것을 알 수 있으며, 침투시간의 경우 7월 22일의 강우사상에 대해 계산된 침투시간과 실측된 침투시간이 일치하고, 나머지의 경우 계산된 침투시간이 실측된 침투시간보다 약간 빠름을 알 수 있다.

### 3.3 총괄형 모형의 적용

일반적으로 재해영향평가 등에서는 유역의 규모에 따라 지속기간별 재현기간별 강우를 입력으로 하여 USLE 공식으로 토사유출량을 추정한다. 따라서, 본 연구에서는 총괄형 모형 중 USLE 공식으로 지속기간별 재현기간별 토사유출량을 산정하여 총량을 비교함으로써 매개변수의 단순 곱으로 이루어져 있는 USLE 공식의 문제점 및 적용한계에 대해 분석하였다.

표 1. 대상 유역의 USLE 매개변수표(R 제외)

소유역번호	K	LS	C	P
1	0.4	11.219	0.01	1.000
2	0.4	9.192	0.01	1.000
3	0.4	8.486	0.01	1.000
4	0.4	11.159	0.01	1.000
5	0.4	3.758	0.3	1.000
6	0.4	6.059	0.1	1.000
7	0.4	12.523	0.01	1.000
8	0.4	1.636	0.1	1.000
9	0.4	17.085	0.01	1.000
10	0.4	11.439	0.01	1.000
11	0.4	6.024	0.2	1.000
12	0.4	14.784	0.01	1.000
13	0.4	6.036	0.2	1.000
14	0.4	12.046	0.01	1.000
15	0.4	2.867	0.2	1.000
16	0.4	14.226	0.01	1.000
17	0.4	5.822	0.2	1.000
18	0.4	8.001	0.2	1.000
19	0.4	9.815	0.05	1.000
20	0.4	9.156	0.05	1.000
21	0.4	1.702	0.1	1.000
22	0.4	11.541	0.01	1.000
23	0.4	1.555	0.005	1.000
24	0.4	13.178	0.1	1.000
25	0.4	10.238	0.01	1.000
26	0.4	0.680	0.01	1.000

표 2. 대상유역의 지속기간별 재현기간별 강우침식지수, R

(단위:  $10^7 J/ha \cdot mm/hr$ )

재현기간 (년)	지 속 기 간			
	60분	120분	180분	360분
2	49.6235	53.1945	53.0669	43.4944
3	68.0028	73.1635	74.2538	63.2719
5	92.3273	98.7494	101.7009	88.2973
10	128.2181	135.7623	141.4358	122.9964
20	168.6670	176.6042	185.1738	159.0960
30	194.5753	202.5734	212.8729	180.7447
50	230.0804	237.8471	250.3619	208.8855
70	254.6132	262.4608	276.5091	227.8256
100	282.0972	290.0653	305.7228	248.3099

### 3.4 분포형 모형과 총괄형 모형의 비교

본 연구에서는 총괄형 모형을 적용함에 있어서 유사전달률을 1.0으로 가정하여 비교하였으며, 유사전달률을 고려하지 않은 총괄형 모형의 결과가 분포형 모형으로 산정한 토사유출량보다 월등히 큰 값을 보여야 하지만, 표 3의 비교결과에서 볼 수 있듯이 지속시간 60분에 대해 재현기간별로 토사유출량을 산정한 결과를 보면 오히려 총괄형 모형으로 산정된 토양침식량의 양이 분포형 모형으로 산정된 토사유출량보다 작음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 총괄형 모형이 강우에 대한 민감도가 커서 상대적으로 작은 강우에 대해서는 실제 토양침식량보다 작은 값을 산출하기 때문이라고 생각된다. 즉, 총괄형 모형의 산정결과 강우에 따른 토사유출량의 차이가 크기 때문에 강우에 따라 토사유출량이 과소, 혹은 과대산정될 여지가 있다. 이와 같은 영향은 강우침식지수 뿐만 아니라, K, LS, C, P 등 나머지 매개변수에 대해서도 동일하게 나타날 수 있다. 왜냐하면, USLE 공식은 여러 개의 매개변수들의 단순한 곱으로 표현되기 때문이며, 이러한 특성으로 인하여 매개변수 중 어느 하나라도 산정이 잘못되면 토사유출량의 산정에 큰 오차를 줄 수 있고, 특히 C와 P 등의 매개변수는 설계자의 주관에 따라 편차가 매우 커질 수 있으므로 매개변수의 산정에 주의를 요하며 잘못된 결과를 산출할 여지가 있다.

표 3. 분포형 모형과 총괄형 모형의 비교

지속시간 (분)	재현기간 (년)	USLE (tons)	KINEROS2 (tons)	USLE/KINEROS2 (%)
60	2	2636.7	3794.7	69.4844
	3	3608.4	5032.3	71.7050
	5	4905.3	6545.3	74.9440
	10	6812.8	8754.5	77.8211
	20	8958.7	11126.5	80.5162
	30	10338.0	12582.8	82.1598
	50	12222.7	14549.7	84.0064
	70	13518.6	15874.6	85.1586
120	100	14998.7	17346.2	86.4092
	2	4295.6	4647.0	92.4389
	3	5894.8	6114.5	96.4059
	5	7938.5	7896.8	100.5278
	10	10897.5	10341.4	105.3780
	20	14142.0	12916.8	109.4856
	30	16218.2	14482.5	111.9842
	50	19011.9	16559.4	114.8109
120	70	20977.5	17984.1	116.6452
	100	23153.6	19567.4	118.3278

## 4. 결론

본 연구에서는 국내에 소개된 토양침식량 산정모형을 살펴보고, 아직 국내에서 많은 연구가 이루어지지 않은 분포형 토사유출량 산정모형을 소개하고 적용하였다. 기존에 주로 사용된 토양침식량 산정모형은 유역의 토사유출량이 아닌 토양침식량을 산정하는 모형이기 때문에 토사유출을 대비한 구조물 설계 등에 사용할 경우 토사유출량으로 환산하는 절차가 필요할 뿐만 아니라, 연평균 토양침식량 혹은 단일 호우에 대한 총 토양침식량을 산정하는 모형이기 때문에 구조물의 효율적인 설계에 바람직하지 못하다. 본 연구의 결과 국내 소유역에 분포형 모형을 적용하여 적용성이 충분함을 알 수 있었으며, 기존 토양침식량 산정공식의 적용한계와 문제점을 제시하여 토사유출량 산정시 분포형 모형을 사용해야 함을 알 수 있었다. 결론의 내용을 항목별로 정리하면 다음과 같다.

- 유역에서의 침사지 설계, 토사유출에 따른 오염물질의 이송, 하천의 수질관리 등을 위해 유역의 토사유출량을 산정할 경우, 총 토사유출량을 산정해주는 총괄형 모형으로는 적용의 한계가 있다. 따라서, 시간에 따른 토사유출을 아는 것은 매우 중요하다.
- 분포형 모형 중 KINEROS2 모형을 국내 소유역에 적용한 결과, 유사량수문곡선의 경우, 3개의 강우사상에 대하여 침투값은 실측값에 비해 최소 92%에서 최대 112%로 나타났으며, 침투시간은 약 96%에서 100%로 3개의 강우사상 모두 실측값과 유사한 결과를 도출하였다. 따라서, 산정된 유사량수문곡선이 실측된 유사량수문곡선을 훌륭히 재현하는 것으로 나타났다.
- 분포형 모형의 매개변수 민감도 분석을 수행한 결과, Manning의 조도계수에 대한 민감도가 상당히 큼을 알 수 있었으며, 정확한 산정식이 존재하지 않고 일반적으로 경험적으로 산정되는 Manning의 조도계수의 산정에 주의를 기울여야 할 것이다.
- 토사유출량의 산정방법으로 주로 사용되는 총괄형 모형인 USLE 공식은 미국의 농경지에 대한 실험에 의해 개발된 모형이기 때문에 모형의 개발배경을 충분히 고려하여야 하고, 모형의 형태가 5개 매개변수의 곱으로 이루어져 있어서 매개변수에 대한 민감도가 크기 때문에 산정된 총 토사유출량의 신뢰도가 떨어질 것으로 판단된다.
- 또한, USLE 공식은 연평균 토양침식량을 산정하기 위해 개발되었고, 단일 호우에 적용할 경우 호우기간의 총 토양침식량을 산정하도록 개발되었기 때문에, 토사유출의 시간 분포를 산정하는 것은 불가능하다.
- 분포형 모형과 총괄형 모형을 비교한 결과, 총괄형 모형의 경우 강우의 영향에 따른 총 토양침식량의 차이가 분포형 모형보다 크기 때문에 토양침식량이 과다산정될 수 있다.
- 국내에 시간에 따른 토사유출량의 실측값이 많지 않은 실정이기 때문에 현재까지는 토사유출량 산정 모형의 명확한 검증이 이루어지지 않은 실정이며, 이를 위해서는 보다 많은 실측자료가 체계적으로 축적되어야 하고, 이에 따라 축적된 실측자료를 통하여 분포형 모형을 국내 유역에 보다 효율적으로 적용할 수 있도록 해야 할 것이다.

## 참고문헌

- 김용태(1998), “분포형 개념을 이용한 토사유출량 산정에 관한 연구”, 고려대학교 대학원 토목환경공학과 석사학위 논문
- 김형수, 김상단, 홍창선, 윤용남(1999), “소유역에서의 KINEROS 모형 매개변수 민감도 분석”, '99학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 39-42
- 우효섭(2001), “하천수리학”, 청문각
- 행정자치부 국립방재연구소(1998a), “개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I)”
- 행정자치부 국립방재연구소(1998b), “개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(II)”
- KINEROS2 Homepage, "http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/", United States Department of Agriculture(USDA), Agricultural Research Service(ARS), Southwest Watershed Research Center
- 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, Agricultural Research Service, ARS-77