

# 산지 계곡하천의 수리특성 분석

김진홍<sup>\*</sup>

## 1. 서론

본 연구에서는 산지 계곡하천을 대상으로 하여 집중호우시 발생한 홍수 흐름에 대한 수리특성을 분석하고, 홍수시 발생하는 토사유출량을 산정한 후 토사유출을 차단하기 위한 사방댐의 규모를 결정하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 먼저 계곡하천의 홍수피해 상황을 검토하고, 급경사의 산지 하천 발생하는 유송토사의 특성을 분석하였으며, 연평균 비유출량 산정 공식과 홍수시 유출량 산정 공식을 적용하여 토사 유출량을 산정하여 본 대상 지역의 토사 유출량을 결정하였다. 또한 토사유출을 차단하되, 홍수량을 안전하게 통수시키기 위한 적정 규모의 사방댐을 결정하였다.

## 2. 산지 계곡하천 유송토사의 특성

산지 개간으로 인해 산지가 황폐해졌을 때, 또는 하상이 견고하지 않은 급경사의 산지 하천에서 강우가 발생되면 산지는 붕괴되어 계곡침식(gully erosion)이 발생되고, 이 흐름은 계곡을 따라서 돌과 흙 그리고 물이 혼합되어 흐르게 되는데 이를 土石流라고 한다(吉岡良朗, 1980). 만약 계곡침식과 그에 따른 토석류가 계속되면 이는 산사태로 이어지면서 하류에 위치한 밭가와 농지에 많은 인명과 재산 피해를 유발시킬 우려가 있다. 따라서 산지 하천에는 계곡침식을 방지하기 위해 사방댐이나 침사지를 설치하게 된다. 토석류는 일반 하천에서 홍수시 발생하는 유사현상과는 다른데 그 이유는 다음과 같다.

- ① 토석류는 경사가 급한 산지 하천에서 발생된다.
- ② 토석류의 유사 농도는 0.6~0.7로서 일반 하천에 비해 매우 높다
- ③ 토석류를 형성하는 흐름은 운동량이 입자의 충돌에 의해 전달되는 dilatant model에 의해 성립된다.

산지 하천은 급경사이므로 홍수시 토석류를 발생시킨다. 토석류는 흙과 모래, 자갈, 돌의 고체와 물이 일체가 되어 종력에 의해 흐르게 되는 집합유동(集合流動)현상으로서 다음과 같은 경우에 발생한다.

- ① 계곡에서 퇴적된 토사가 흐름의 증가에 의해 유동하는 경우
- ② 산지 붕괴된 토사가 지표수와 함께 유동하는 경우
- ③ 산사태 및 대규모의 토양침식이 발생하는 경우    ④ 댐 파괴시    ⑤ 화산활동에 의한 경우

일반적으로 집합유동 현상은 고체와 유체의 혼합 흐름(fluid-granule mixed flow)에 의해 발

---

\* 중앙대학교 토목공학과 조교수

생하는데 이들 혼합 흐름은 고체 입자의 직경과 농도의 크기의 변화에 따라 응력-변형을 관계가 다음과 같이 변한다.

- ① Newtonian model : 고체 입자가 아주 작고 농도가 작을 때 성립
- ② Bingham fluid model : 고체 입자의 입경이 작고 농도가 클 때 성립.
- ③ Quasi-dilatant model : 고체 입자의 입경이 크고 농도가 클 때 성립.
- ④ Dilatant model : 고체 입자의 입경이 크고 농도가 클 때 성립.

이들 model의 제안자, 특성 및 적용 분야는 표 1에 나타나 있다.

표 1. 고체-유체 혼합류의 모델 제안자 및 적용 분야

모델	제안자	영역	적용 분야
dilatant model	Takahash (1977) Bagnold (1964) Tsubaki et al (1982)	grain-inertia regime	fast flow of mixture molecular fluid
quasi-dilatant model	Daido (1984) Miyamoto (1985) Ashida (1985)	grain-inertia regime	fast flow of mixture deposition of debris flow
Bingham fluid model	Johnson (1970) Shibata and Mei (1986) Yano and Daido (1965)	macro-viscous regime	slow flow of mixture flow of clay slurry dilute suspension
Newtonian model	Egashira (1988)	fluid-viscous regime	volume fraction is very small

산지 유송토사의 흐름은 토석류로 설명할 수 있는 바 그 특성은 다음과 같다.

- ① 하천에서 홍수시의 흐름과 달리 토석류는 산지 하천 계곡을 따라 형성되는데 이때 흐름은 계곡 하상의 전 영역에 걸쳐 형성되지 않고 하상의 일부분을 유로로 해서 흐르게 되며 더욱이 유로는 시간에 따라 영역이 변한다.
- ② 하상 경사가 급하므로 유속이 크고 소류력이 매우 커서 하상 세굴이 많이 발생된다.
- ③ 평상시의 유량은 작지만 홍수시의 유량은 커서 유량 변동이 심하다.
- ④ 흐름을 형성하는 토사 입경은 그 분포의 범위가 큰 돌에서부터 세립자까지 광범위하다
- ⑤ 입경이 큰 입자는 토석류 흐름의 先端에 모여서 유하한다.

토사유출 과정은 토사생산과 토사유송의 2가지로 분류, 구성되지만 산지하천 토사유출을 산정하기 위해서는 대상 유역의 면적이 작고 유로 연장도 짧으므로 이들 2 가지를 한데 묶어 취급하고 있다.

일반적으로 토사의 생산, 유송 형태는 여러 가지가 있으며 이들 형태의 토사유출은 각기 다른 범칙에 의해 결정된다. 관련 인자도 많아 토사유출량을 양적으로 정확히 계산하는 것은 쉽지가 않다(武居 行恒, 1985).

토사 유출의 추정에는 저수지 퇴사나 산지하천 침전지의 규모 결정 등과 같은 실질적인 목적에서 연평균 유출량을 대상으로 하는 것과 홍수시의 하상 변동이나 토사 재해의 문제를 취급하는 관점에서 홍수로 인한 유출량을 대상으로 하는 것으로 분류되며 이들의 유출량 산정 방법에는 약간의 차이가 있다. 전자의 경우에 해당하는 연평균 유출량 추정에는 기존 댐 퇴사 자료가 유용하게 이용된다. 芦田(1974)은 일본 주요 하천,

수계에 축조된 댐의 퇴사량으로부터 연평균 비 퇴사량과 유역 면적과의 관계를 구하였으며, 田中(1967)은 연평균 비 퇴사량과 지형과의 관계를 지질별로 구분하여 산정하였다. 江崎(1966)는 토사유출 기구에 착안하여 토사유출 추정식을 제안하였다. 이 식을 이용하여 임의 기간 동안의 토사유출 산정이 가능하다. 즉, 홍수 발생시 또는 1달, 1년 등으로 기간 설정을 자유자재로 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 江崎의 산정식에는 유량 인자가 포함되어 있어 기존 유량 측정 실적이 있어야만 토사유출 추정이 가능하다는 단점도 있다.

후자의 경우에 해당하는 홍수시의 토사 유출 추정에는 武居의 식이 이용된다. 그는 토사유출량을 유역 면적의 함수로 표현하였지만 실제 자료를 적용하여 검토한 결과 많은 오차가 발생하였다. 이후 水原에 의한 유역 면적과 홍수량을 함수로 하는 2 변수식이 제안되어 많이 이용되고 있다. 이 식은 토사 유출에 영향을 미치는 지형 조건과 강우 자료가 포함되어 있어 전자보다 개선된 표현 식이라 할 수 있다.

### 3. 토사 유출량의 산정

#### 3.1 연평균 비유출량 산정

연평균 비유출량은 단위유역 면적에서 발생한 1년 동안의 토사유출량을 말하는 것으로서 단위는  $m^3/year \cdot km^2$ 로 표현한다. 芦田(1974)은 유역 면적과 토사 유출과의 관계를 다음과 같이 구하였다.

$$q_s = \alpha A^{-0.7} \quad (1)$$

여기서  $q_s$ : 연평균 비 유출량 ( $m^3/year \cdot km^2$ ),  $A$ : 유역 면적( $km^2$ )이다.  $\alpha$ 는 토사유출 상황에 따라 결정되는 함수로서 각 수계별로 많은 차이를 나타내고 있다. 일본 하천의 경우  $\alpha$ 는 토사 유출의 많고 적음에 따라 그림 1과 같이 5군으로 구별하였다. 여기서 1군이 가장 큰 토사유출 상태이고 5군은 토사유출이 작은 경우를 나타낸다. 그림 1을 보면 유역면적의 최소 크기는  $10km^2$ 로서 그 이하인 경우 적용 불가능하다.

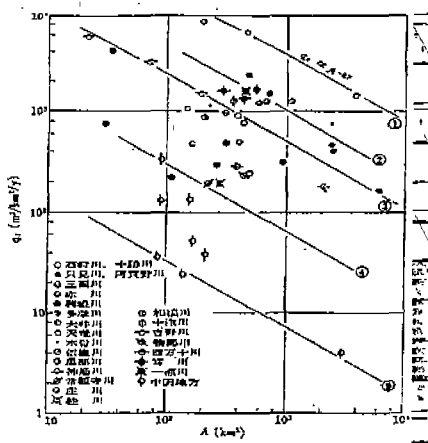


그림 1. 토사유출과 유역면적과의 관계

량을 수리학적 토사유출 기구에 근거를 두어 우량, 하상경사 및 유역면적을 이용하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

한편 토사 유출량이 유역의 지형, 지질조건과 관련된다는 조건 아래 많은 연구가 있었으며 田中(1967)은 토사유출이 유역의 기복량과 높이의 곱으로 표시될 수 있다고 하여 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

- ① 유역이 심성암이나 반심성암 또는 변성암일 경우

$$q_s = 12K_T - 109 \pm 50 \quad (2)$$

- ② 유역이 고기 퇴적암인 경우

$$q_s = 9K_T - 247 \pm 50 \quad (3)$$

여기서는  $K_T$ 는 유역의 평균 기복량과 평균 고도의 곱( $m'$ )으로서 지형도에서 유역을  $16km(4km \times 4km)$ 씩 정사각형 격자를 만들고 각 격자의 기복량(고도차) 및 평균고도를 곱한 후 이를 전 격자에 대해 평균하면 된다. 江崎(1966)는 토사유출

$$q_s = 0.94 I_T \cdot S + 1.33 I_T \frac{A_d}{A} \quad (4)$$

여기서,  $I_T$  : 저수지 종단에서의 홍수량( $m^3$ ),  $S$  : 저수지 종단에서의 하상경사(-)

$A$  : 댐 지점의 유역 면적( $km^2$ ),  $A_d$  : 유역내 붕괴지 면적( $km^2$ )을 나타낸다.

江崎式은 임의 기간에 대한 토사 유출량을 산정할 수 있다는 점에서 다른 식에 비해 개선되었다 할 수 있다. 그러나 상기 식에 의한 토사 유출량을 구하기 위해서는 유량측정 자료가 있어야 한다.

산지하천에 적합한 토사 유출 산정식에는 村野式과 難波式이 있다. 전자는 다음과 같이 표시된다.

$$\log q_s = a + b \log A + c \log R + d \log M_E + e \log R_r \quad (5)$$

여기서  $A$  : 유역면적( $km^2$ ),  $R$  : 장기간의 연평균 강우량( $mm$ ),  $M_E$  : 유역의 평균 고도( $m$ ),

$R_r$  : 유역의 기복량 비로서 유역 내의 주 유로를 따라 최고점과 계곡출구의 고도차를 주유로 연장으로 나눈 값(-),  $a \sim e$  : 중회귀분석으로 구한 각 항의 계수로서 지질에 따라 구분되며 표2에 표시되어 있다.

표 2. 村野式의 계수

지질 \ 계수	a	b	c	d	e
I	-1.8550	-0.3926	1.3380	0.2523	0.0955
II	-1.7844	-0.0618	2.0970	0.1071	0.8900
III	-2.9090	-0.3928	0.9728	0.9631	-0.2270

표 2에서 I : 주로 고기 퇴적암(중생층, 고생층)의 유역

II : 주로 신기 퇴적암(제3기층, 제4기층, 화산분쇄물)으로 구성된 유역

III : 주로 분출암(안산암, 석영조면함)으로 형성된 유역을 나타낸다

難波式은 다음과 같이 표시된다.

$$q_s = 0.112P - 0.474T - 0.118C + 2.452 \quad (6)$$

여기서  $q_s$ 는 다른 식과 달리  $m^3/year \cdot ha$ 로 나타낸다. P는 연 강수량( $mm$ )이며 T는 기복량으로서  $4km \times 4km$ 격자 내의 고저차( $m$ )이고 C는 삼림면적율(%)을 나타낸다.

### 3.2 홍수시 유출량의 산정

홍수가 발생하였을 때 이로 인한 유출량의 산정 방법은 다음과 같은 관계에 의해 결정된다.

- (1) 지질별에 따른 토사 유출량
- (2) 유역 면적과의 관계에 의한 토사 유출량
- (3) 최대 홍수량과의 관계에 의한 토사 유출
- (4) 붕괴 토량과의 관계에 의한 토사 유출

상기 4가지의 관계중 (1),(2),(4)는 토사유출량을 지배하는 여러 인자들 중 각각 한가지만 언급된 것으로 토사 유출을 결정하는 바람직한 식이라 할 수 없다. 반면 (3)은 최대 홍수량을 산정하는 식 속에 지형 인자

와 강우 인자 등이 포함되어 있어 다른 식에 비해 효율적이다. 유역 면적 중 경사가 15° 이상인 경우의 유역 면적은 토사 유출과의 관계에서 비교적 상관성이 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 이들 두 인자, 즉 최대 홍수량과 경사 15° 이상의 유역면적을 토사 유출과 관련을 짓는 식이 나오게 되었으며 다음과 같이 표현된다(水原 邦夫, 1990).

$$V_d = 367(A_{15})^{0.176}(Q_{max})^{0.463} \quad (7)$$

여기서  $V_d$  : 홍수시 토사 유출(m<sup>3</sup>),  $A_{15}$  : 경사 15° 이상의 유역면적(km<sup>2</sup>)

$Q_{max}$  : 침투 홍수량(m/s)을 나타낸다.

#### 4. 사방댐의 규모 결정

홍수시 발생하는 토사유출을 차단함으로써 하류지역의 토사재해를 방지하기 위해 사방댐을 설치하게 된다. 사방댐의 높이와 토사유출량의 관계식은 다음과 같이 표시된다(건설교통부, 1999).

1) 사방댐의 단면을 직사각형으로 할 경우,

$$Q_s = \frac{h^2}{2} B (\tan \alpha - \tan \beta) \quad (8)$$

2) 사방댐의 단면을 사다리꼴로 할 경우,

$$Q_s = \frac{h}{2} b [B + \frac{1}{3} h (\cot \gamma + \cot \sigma)] \quad (9)$$

여기서,  $Q_s$  : 토사유출량(m<sup>3</sup>),  $h$  : 사방댐의 높이(m),  $B$  : 사방댐의 폭(m),  $\alpha$  : 기존 하상경사(-),

$\beta$  : 퇴적된 후 하상경사(-),  $b$  : 기존 하상경사선과 퇴적된 후의 하상경사선과의 교점으로 부터 사방댐까지의 수평거리(m),  $\gamma, \sigma$  : 사다리꼴 사면의 경사각(°)을 나타낸다. 일반적으로 퇴적된 후의 하상경사는 평상시에는 사방댐 건설 이전의 기존 하상경사의 1/2로 하고, 이상 홍수시에는 2/3로 하고 있다.<sup>2)</sup>

#### 5. 대상지역의 토사유출량 산정

본 연구에서 대상지역은 소하천의 상류인 산지 계곡하천이며, 이 지역은 현재 좌우안에 공장 부지가 조성되고 200m 하류 지점에는 도로공사가 진행되어 지표면이 훼손되어 있는 관계로 홍수시 중, 횡 침식이 진행되고 있다. 유역 면적은 공장부지 조성지점까지 0.302km<sup>2</sup>이고 도로공사 지점까지는 0.493km<sup>2</sup>이다. 유역면적의 70~80%가 임야로 구성되어 있으며 지질은 화강암이고 지형 경사는 S=1/10~1/20 정도로서 평균 1/15이다. 林況은 成林地 80%, 稚樹地 20%로 구성되어 있으며 구역의 형상은 종장형이고 홍수시 산지 토사 및 훼손된 지표면으로부터 토사의 유출이 예상되고 있다. 대상지역 하천은 경사가 S=1/12~1/17으로서 급경사에 속하며 하천 폭은 B=2~3m로서 계곡류에 가까우며, 하상 지반 상태는 좌, 우안 공히 자갈 섞인 토사로 구성되어 있다. 자갈의 입경은 D=0.5mm~100mm로서 편차가 심한 편이다.

본 대상지역의 토사유출 산정을 3장에서 언급한 방법 중 본 지역에 적합한 공식에 의해 계산하면 표 3

과 같다.

표 3. 대상지역의 토사유출량 산정

공식	비유출토사량(m <sup>3</sup> /year · km <sup>2</sup> )	유출토사량(m <sup>3</sup> )	비고
村野式	1155.02	342	
難破式	1305.01	394	
水原式	-	488	30년 빈도

상기 3식 중 村野式과 難破式은 연평균 유출량 산정치이며, 水原式은 재현기간 30년을 고려한 산정식이다. 본 지역의 토사 유출량은 연평균 유출토사량을 대상으로 하여  $Q_s = 394(m^3)$ 으로 결정하였다. 한편 芦出式과 田中式을 본 지역에 적용한 결과 유출토사량은 약 298m<sup>3</sup> 정도 산출되었다. 이는 두 공식이 유역면적이 비교적 넓은 산지지역에 적용되기 때문인 것으로 판단된다.

사방댐의 규모결정을 위해서 (8), (9) 공식을 적용하였다. 사방댐을 직사각형으로 할 경우, 사방댐의 폭을 기존 하천의 바닥폭을 정비하여 B=3m로 하고, 퇴적된 후의 하상경사를 기존 하천의 하상경사의 1/2로 할 경우, 사방댐의 높이는 h=1.23m가 된다. 사방댐을 사다리꼴로 할 경우, 사방댐의 폭을 기존 하천의 바닥폭 B=3m로 하여 계산하면, h=1.74m가 된다. 본 연구에서는 대상지역의 특성상 사다리꼴 단면형을 택하고 저폭은 3m, 높이를 1.8m로 하며, 측면 경사는 현지 지형에 맞추어 결정하는 것으로 하였다.

## 5. 맺음말

본 연구에서는 산지 계곡하천을 대상으로 하여 집중호우시 발생한 유송토사의 특성을 분석하였으며, 연평균 비유출량 산정 공식과 홍수시 유출량 산정 공식을 적용하여 토사 유출량을 산정하였다. 본 대상 지역의 토사 유출량은 연평균 유출토사량을 대상으로 하여  $Q_s = 394(m^3)$ 으로 결정하였다. 또한 토사유출은 차단 하되, 홍수량을 안전하게 통수시키기 위한 적정 규모의 사방댐을 결정하였다. 사방댐은 사다리꼴로 하고 저폭은 기존하천의 폭에 맞추어 B=3m로 하며, 높이를 h=1.8m, 측면경사는 현지 지형여건에 맞추도록 하였다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(1999), 하천공사 표준시방서.
2. 芦田和男(1974), ダム 堆砂に 關する 研究, 京都大學 防災研究所 年譜.
3. 田中 明(1967), 貯水池堆砂量の 推算-水理學.水文學における最近の進歩-昭和42年度講習會, 土木學會.
4. 古岡良朗(1980), 新體系土木工學 77.
5. 水原邦夫(1990), 災害資料の 解析.
6. 江崎一博(1966), 貯水池の 堆砂に 關する 研究, 建設省土木研究所 報告 第 129號.
7. 武居有恒(1985), 扇狀地の 土砂災害.