

산림환경 및 하천형태인자에 의한 유역안정성 평가

정원옥¹⁾ · 마호섭²⁾

¹⁾ 경상대학교 농업생명과학연구원 · ²⁾ 경상대학교 산림과학부

Evaluation of Watershed Stability by the Forest Environmental and Stream Morphological Factors

Jung, Won-Ok¹⁾ and Ma, Ho-Seop²⁾

¹⁾ Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University.

²⁾ Division of Forest Science, College of Agriculture, Gyeongsang National University.

ABSTRACT

This study was carried out to analyze the characteristics of forest environmental and stream morphological factors by using the quantification theory(I) for evaluation of the watershed stability. Present annual mean sediment yield of erosion control dams were investigated in 167 sites of erosion control dam constructed during 1986 to 1999 in Gyeongbuk.

The results obtained from this study were summarized as follows; According to the coefficients of partial correlation, each factor affecting to sediment was shown in order of gravel contents, number of first streams order, number of total streams, length of total streams, forest type, length of main stream, parent rock, stand age, soil texture, stream order, slope gradient, soil depth and aspect. Descriptions of class I were as follow; Igneous rock of parent rock, hardwood stands of forest type, less than 20 year of stand age, less than 30cm of soil depth, sandy clay loam of soil texture, more than 41% of gravel contents, south~east of aspect, 2,501~3,500m of length of main stream, 21~25 of number of total streams, 5,501~10,000m of length of total streams, 3 or more than 4 of stream order, more than 16 of number of first stream orders and more than 31° of slope gradient. Descriptions of class II were as follow; Metamorphic rock of parent rock, coniferous stands of forest type, more than 25 year of stand age, 31~40cm of soil depth, silt loam of soil texture, 11~20% of gravel contents, north~west of aspect, 2,501~3,500m of length of main stream, 16~20 of number of total streams, 3,501~5,500m of length of total streams, 3 of stream order, 11~15 of number of first stream orders and more than 31° of slope gradient. Descriptions of class III were as follow; Sedimentary rock of parent rock, mixed stands of forest type, more than 25 year of stand age, more than 51cm of soil depth, silty clay loam of soil texture, less than 10% of gravel contents, south~west of aspect, less than 500m of length of main stream, less than 5 of number of total streams, less than 1,000m of length of total streams, less than 1 of stream order, less than 2 of number of first stream orders

and less than 25° of slope gradient. The prediction method of suitable site for erosion control dam divided into class I, II, and III for the convenience of use. The score of class I evaluated as a very unstable area was more than 8.4494. A score of class II was 8.4493 to 6.0452, it was evaluated as a moderate stable area, and class III was less than 6.0541, it was evaluated as a very stable area.

Key words : *watershed stability, forest environmental factors, stream morphological factors*

I. 緒 論

산지사면의 붕괴는 주로 과도한 강우에 의한 물과 중력의 복합적인 상호작용에 의하여 발생하는 것으로 인식되어 왔으나, 최근에는 산지가 전체면적의 65%(산림청, 2000)를 차지하는 제한된 국토면적에 주택 및 산업단지가 급속히 확대되어 가는 도시화 및 산업화 현상으로 인하여, 경사가 급한 도시주변까지 산지가 이용됨으로서, 그에 따른 산사태 발생과 토사유출에 대한 위험성도 점차 증대되고 있으며, 특히 산지에서 발생한 토사가 계곡을 따라 하천에 퇴적하게 되면 물이 월류하면서 농경지 및 주택을 매몰시키게 된다. 또한 집중호우로 인한 급류가 급경사지의 하천을 따라 일시에 밀려내려 오면 인명 및 재산의 피해는 물론 자연환경의 파괴로 인한 산림생태계의 질서를 훼손할 뿐만 아니라, 국토를 파괴하는 큰 원인 중의 하나이므로 국토환경 보전적인 측면에서 중요하게 다루어져야 할 것이다.

사면붕괴는 하천형태학적인 특성을 표시하는 인자(유역면적, 유역의 경사, 유역의 방향성, 유역의 형상, 유역의 고도 및 수계조직의 구성양상 등), 기후학적 인자(여러 종류의 강수, 증발, 증산 및 차단 등), 산림환경인자(임상, 임종, 임령, 피복율, 경급, 수목근계, 토성, 토양경도 및 석력함량 등)의 상호복합적인 작용에 의하여 발생하고 있으며(안상진, 1980), 사면붕괴에 영향을 미치는 인자들에 대한 연구는 모암 및 지질에 관한 연구(산림청, 1998), 식생에 관한 연구(建設交通部, 1999; Huang, 1983; 淺見, 1996, 1997; 松本 등, 1999; Reddy와 Singh, 1993), 수목근계에 관한 연구(陶山과 玉井, 1999; 이인모

등, 1991), 강우에 관한 연구(海堀 등, 1999; 内田 등, 1999; 大手 등, 1989; Mosely, 1982), 사면경사에 관한 연구(平松 등, 1999; 岡本 등, 1984; Fox와 Bryan, 2000) 등으로 크게 구분되어 진행되었다.

또한 사면안정성 평가에 관한 연구를 보면, 강위평 등(1986)이 수량화이론(II)에 의하여 산사태 발생의 각 요인 및 수준을 예측하였고, 志水(1977, 1978)는 수량화이론을 응용하여 화강암지대의 안정성에 관계하는 인자를 추정하였으며, 최경(1986)은 수량화이론(I)에 의한 산사태 발생 원인을 예지하였다. 마호섭(1994)은 수량화이론(II)을 이용하여 산지사면 붕괴위험을 예지하였고, 西 등(1992), 吉村 등(1995, 1996)은 의사결정을 위한 객관적인 평가자료를 제공할 수 있는 Fuzzy이론을 이용하여 임도사면의 붕괴가능성 및 안정성을 분석하였고, 차두송 등(2000)은 비선형모델인 Fuzzy이론에 의한 임도성토사면 붕괴가능성을 평가하였다.

앞으로 21세기의 임업은 복구차원이 아닌 예방적인 측면에서 재해의 위험성을 예지하고, 효과적인 대책공법을 마련하여, 재해 가능지역에 각종 시설물을 시공함으로써 시설물 자체의 목적과 기능을 극대화시킬 수 있는 기술을 개발하여야 할 것이다.

따라서 본 연구는 경북지역에 건설되어 있는 167개소 사방댐내의 유출토사량을 측정하고, 산림환경 및 하천형태인자의 유출토사량에 대한 기여도를 분석함과 동시에 유역안정성에 대한 평가기준을 정립함으로써 산지사면에서 발생하는 각종 재해에 대한 피해를 최소화할 수 있는 산림유역 관리에 대한 기술적 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 材料 및 方法

1. 조사지의 개황

유역안정성을 평가하기 위하여 1986년부터 1999년 사이에 건설되어진 사방댐을 중심으로 댐내의 유출토사량을 측정하였으며, 조사된 사방댐의 연도별 건설현황은 Table 1과 같다.

2. 조사방법

1) 유출토사량의 측정

각 사방댐의 설계설명서에 기록되어진 건설 당시 사방댐의 저사가능 용적과 실측에 의한 현재의 내용적을 조사·비교하여 그 차이를 유출토사량으로 하였으며, 측정방법은 아래의 Fig. 1과 같다. 측정된 유출토사량은 경과년수

Table 1. General descriptions of investigated erosion control dams

| Study area | Constructed year | | | | | | | | | | | | | Total | |
|------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|
| | '86 | '87 | '88 | '89 | '90 | '91 | '92 | '93 | '94 | '95 | '96 | '97 | '98 | | '99 |
| A | | | | | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | 3 |
| B | | | | | | | 1 | | 2 | 1 | 2 | 1 | | 1 | 8 |
| C | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| D | | | | 1 | 1 | | | | 1 | | | 1 | | | 4 |
| E | | | | | | | | | | | | 1 | | | 1 |
| F | | | | | 1 | | | | | | | 2 | 1 | 1 | 5 |
| G | | | | | 1 | 1 | 2 | | | | | 1 | 1 | 1 | 7 |
| H | | | | | | | | 1 | 1 | | 2 | 1 | 1 | 2 | 8 |
| I | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | 9 |
| J | | | | 1 | | | 1 | | | | | 1 | | | 3 |
| K | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | 2 | | | 1 | 3 | 2 | 12 |
| L | | | | | 2 | 2 | 1 | | | 1 | 2 | 2 | | | 10 |
| M | | | | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | 8 |
| N | | | | | | | | | | 1 | | | | | 1 |
| O | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 7 |
| P | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | | 2 |
| Q | | | | | | | 2 | | 1 | 1 | | 1 | 2 | 1 | 8 |
| R | 2 | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 14 |
| S | | | | | 1 | 1 | | | 2 | | | 2 | | | 6 |
| T | | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 | 2 | 2 | 4 | 3 | 1 | | | 23 |
| U | | | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | 4 |
| V | 1 | | | | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 16 |
| Total | 4 | 3 | 3 | 6 | 15 | 12 | 18 | 11 | 15 | 12 | 14 | 25 | 16 | 13 | 167 |

Note) A : Goryeong, B : Seongju, C : Gimcheon, D : Chilgok, E : Gumi, F : Gunwi, G : Uiseong, H : Sangju, I : Mungyeong, J : Yecheon, K : Andong, L : Yeongju, M : Bonghwa, N : Uljin, O : Yeongyang, P : Yeongdok, Q : Cheongsong, R : Pohang, S : Yeongcheon, T : Gyeongju, U : Gyeongsan, V : Cheongdo

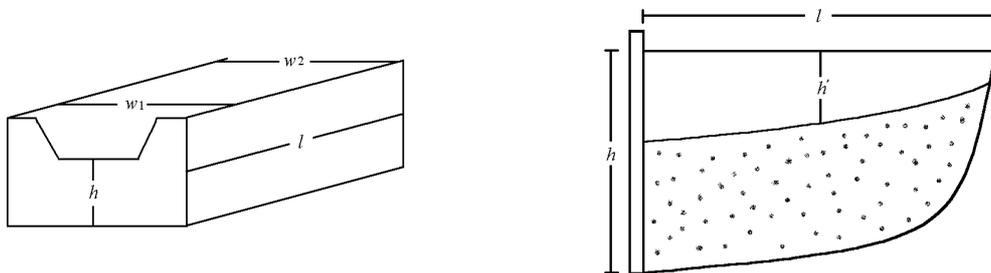


Fig. 1. The measured method of sediment in erosion control dam.

(yr)와 유역면적(ha)을 나눈 연평균 유출토사량($m^3/yr/ha$)을 이용하였다.

$$V(m^3) = \frac{w_1 + w_2}{2} \times h' \times l \dots\dots\dots$$

(1)

단) $V(m^3)$: 내용적, h : 댐 유효고(m),
 h' : 평균 댐 여유고(m), l : 저사거리(m),
 w_1 : 댐 주변 계상폭(m),
 w_2 : 댐 상류 계상폭(m)

유출토사량(m^3) = 건설 당시의 내용적 - (1)식에 의한 내용적

2) 산림환경 및 하천형태인자 조사

(1) 산림환경인자

- ① 모암(X_1 : parent rock): 1/50,000 지질도를 이용하여 조사지 주변유역의 모암을 퇴적암, 화성암, 변성암으로 구분하여 조사하였다.
- ② 임상(X_2 : forest type): 조사지 주변유역의 식생을 임상도 및 현지조사를 통하여 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분하였다.
- ③ 임령(X_3 : stand age): 임상도 및 현지조사를 통하여 주변유역에 우점하고 있는 임목의 임령을 조사하였다.
- ④ 토심(X_4 : soil depth): 토양단면을 통해 유기물층을 제외한 광물토층을 표토(A층)에서 하층토(B층 하단)까지를 나타내는 전토심(cm)을 측정하였다.
- ⑤ 토성(X_5 : soil texture): 미 농무성 토성분류법에 의하여 사질식양토(SCL), 미사질양토(SiL), 미사질식양토(SiCL)로 구분하였다.
- ⑥ 석력함량(X_6 : gravel contents): 표준토색첩(農林水産省農林水産技術會議事務局, 1997)을 이용하여 토양단면의 석력함량(%)을 조사하였다.
- ⑦ 사면방위(X_7 : aspect): 주하천장을 중심으로 현지조사 및 1/25,000 지형도상에서 4개의 방위권역(N~E, N~W, S~E, S~W)으로 구분하였다.

(2) 하천형태인자

- ⑧ 주하천장(X_8 : length of main stream): 본류하천으로 인정되는 유로의 길이(m)를 1/25,000 지형도상에서 curvimeter를 사용하여 측정하였다.
- ⑨ 총하천수(X_9 : number of total streams): 1/25,000 지형도상에서 주하천장을 중심으로 연결되어진 각종 지천과 세천을 조사하여 유역내 총하천수로 하였다.
- ⑩ 총하천길이(X_{10} : length of total streams): 1/25,000 지형도상에서 유역내 총하천수의 길이(m)를 curvimeter를 사용하여 측정하였다.
- ⑪ 하천차수(X_{11} : stream orders): 1/25,000 지형도상에서 Horton-Strahler(1952)의 방식에 의하여 유역내 하천차수를 조사하였다.
- ⑫ 일차하천수(X_{12} : number of first stream orders): 1/25,000 지형도상에서 Horton-Strahler(1952)의 방식에 의하여 유역내 일차하천수를 조사하였다.
- ⑬ 사면경사(X_{13} : slope gradient): 1/25,000 지형도상에서 西島(1955)의 방안법에 의하여 측정된 값($^\circ$)을 사용하였다.

3. 통계적 분석방법

유출토사량에 영향을 미칠 것으로 예상되는 13개의 산림환경 및 하천형태인자를 몇개의 category로 구분하고(Table 2), 외적기준이 양적인 유출토사량(annual mean sediment yield)과 내적기준이 질적인 각종 인자와의 관계를 수량화이론(I류)을 사용하여, 유출토사량에 영향을 미치는 각 인자의 category별 상대점수를 분석함과 동시에 유출토사량에 대한 13개 인자의 기여도를 분석하여 산림유역의 안정성을 평가하였다.

III. 結果 및 考察

1. 토사유출량에 대한 기여도 분석

유출토사량에 영향을 미칠 것으로 예상되는 13개의 산림환경 및 하천형태인자를 수량화이론(I)에 의한 각 인자의 상대점수를 분석하기 위하

여 인자를 category화한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Classification of category for each factor

| Factors | Category | | | | | |
|-----------------|------------------|--------------|------------------|-------------|--------------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| X ₁ | Sedimentary rock | Igneous rock | Metamorphic rock | | | |
| X ₂ | Coniferous | Hardwood | Mixed | | | |
| X ₃ | ≤20year | 21~24 | 25year≤ | | | |
| X ₄ | ≤30cm | 31~40 | 41~50 | 51cm≤ | | |
| X ₅ | SiCL | SiL | SCL | | | |
| X ₆ | ≤10% | 11~20 | 21~30 | 31~40 | 41%≤ | |
| X ₇ | N~E | N~W | S~E | S~W | | |
| X ₈ | ≤500m | 501~1,000 | 1,001~1,500 | 1,501~2,500 | 2,501~3,500 | 3,501m≤ |
| X ₉ | ≤5 | 6~10 | 11~15 | 16~20 | 21~25 | 26≤ |
| X ₁₀ | ≤1,000m | 1,001~2,000 | 2,001~3,500 | 3,501~5,500 | 5,501~10,000 | 10,001m≤ |
| X ₁₁ | ≤1 | 2 | 3 | 4≤ | | |
| X ₁₂ | ≤2 | 3~5 | 6~10 | 11≤ | | |
| X ₁₃ | ≤25° | 26~30 | 31°≤ | | | |

Table 3. Normalized score of each category and range

| Factors | Category | Score | Mean score | Normalized score | Range | |
|----------------|-----------------------|-------|------------|------------------|---------|--------|
| X ₁ | Parent rock | 1 | -0.0431 | 0.1351 | -0.1782 | 0.3887 |
| | | 2 | 0.3456 | | 0.2105 | |
| | | 3 | 0.0000 | | -0.1351 | |
| X ₂ | Forest type | 1 | 0.4909 | 0.4379 | 0.0530 | 0.4991 |
| | | 2 | 0.4991 | | 0.0612 | |
| | | 3 | 0.0000 | | -0.4379 | |
| X ₃ | Stand age | 1 | 0.3044 | 0.0906 | 0.2138 | 0.3044 |
| | | 2 | 0.1434 | | 0.0528 | |
| | | 3 | 0.0000 | | -0.0906 | |
| X ₄ | Soil depth | 1 | 0.4032 | 0.4645 | -0.0613 | 0.5415 |
| | | 2 | 0.4395 | | -0.0250 | |
| | | 3 | 0.5415 | | 0.0770 | |
| | | 4 | 0.0000 | | -0.4645 | |
| X ₅ | Soil texture | 1 | -0.5382 | -0.3075 | -0.2307 | 0.5382 |
| | | 2 | -0.3359 | | -0.0284 | |
| | | 3 | 0.0000 | | 0.3075 | |
| X ₆ | Gravel contents | 1 | -6.8242 | -6.0280 | -0.7962 | 6.8242 |
| | | 2 | -6.5238 | | -0.4958 | |
| | | 3 | -5.8446 | | 0.1834 | |
| | | 4 | -3.9006 | | 2.1274 | |
| | | 5 | 0.0000 | | 6.0280 | |
| X ₇ | Aspect | 1 | 0.0837 | 0.2045 | -0.1208 | 0.4127 |
| | | 2 | 0.2458 | | 0.0413 | |
| | | 3 | 0.4127 | | 0.2082 | |
| | | 4 | 0.0000 | | -0.2045 | |
| X ₈ | Length of main stream | 1 | -0.8845 | -0.1318 | -0.7527 | 1.2858 |
| | | 2 | -0.8174 | | -0.6856 | |
| | | 3 | 0.3380 | | 0.4698 | |
| | | 4 | 0.4013 | | 0.5331 | |
| | | 5 | 0.2976 | | 0.4294 | |
| | | 6 | 0.0000 | | 0.1318 | |

Table 3. Continued

| Factors | Category | Score | Mean score | Normalized score | Range | |
|-----------------|-------------------------------|-------|------------|------------------|---------|--------|
| X ₉ | Number of total streams | 1 | -1.4051 | | -0.5891 | |
| | | 2 | -1.1699 | | -0.3539 | |
| | | 3 | 0.4178 | -0.8160 | 1.2338 | 4.9711 |
| | | 4 | 1.6411 | | 2.4571 | |
| | | 5 | 3.5660 | | 4.3820 | |
| | | 6 | 0.0000 | | 0.8160 | |
| X ₁₀ | Length of total streams | 1 | 2.9279 | | 0.2144 | |
| | | 2 | 3.1344 | | 0.4209 | |
| | | 3 | 3.2791 | 2.7135 | 0.5656 | 3.2791 |
| | | 4 | 2.6840 | | -0.0295 | |
| | | 5 | 1.1930 | | -1.5205 | |
| | | 6 | 0.0000 | | -2.7135 | |
| X ₁₁ | Stream order | 1 | -1.2839 | | -0.2240 | |
| | | 2 | -1.0904 | -1.0599 | -0.0305 | 1.2839 |
| | | 3 | -0.8500 | | 0.2099 | |
| | | 4 | 0.0000 | | 1.0599 | |
| X ₁₂ | Number of first stream orders | 1 | -1.9817 | | | |
| | | 2 | -1.6290 | -1.4817 | -0.1473 | 1.9817 |
| | | 3 | -0.3457 | | 1.1360 | |
| | | 4 | 0.0000 | | 1.4817 | |
| X ₁₃ | Slope gradient | 1 | -0.3191 | | | |
| | | 2 | -0.1101 | -0.1191 | 0.0090 | 0.3191 |
| | | 3 | 0.0000 | | 0.1191 | |

Note) $R^2 = 0.8878$, Prob > F = 11.34 (P=0.0001)

상대점수(Normalized score)는 각 인자별 category의 판별계수에 해당하며, 점수들의 (+) 값은 유출토사량의 발생에 기여하고, (-)값은 사면안정측에 기여하게 되며, 그 크기는 수치 의 大小로 나타낸다. 각 인자의 category별 상대 점수를 분석한 결과(Table 3), 모암은 화성암이 유출토사량의 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었고, 다음으로 변성암, 퇴적암 순으로 나타나 산림청(1998), 최경(1999) 등의 연구보고 와 유사한 경향을 보였다. 임상은 활엽수림, 침엽수림 순으로 유출토사량의 발생에 대한 기여도가 높게 나타났으며, 혼효림은 사면 안정측에 속하는 것으로 분석되어 건설교통부(1999)에서 임상별 사면안정성을 분석한 결과와 동일 하였다. 임령은 수목의 연령이 많을 수록, 토심은 A층과 B층의 깊이를 합한 깊이가 깊을수록 사면안정측에 기여하는 것으로 분석되었다. 梶源(1999)은 사질식양토 지역에서 토사붕괴가 자주 발생하였다고 보고하였는데, 본 연구에서

도 사질식양토(SCL)가 유출토사량에 대한 상대 점수가 미사질양토(SiL), 미사질식양토(SiCL)보다 높게 나타났다.

석력함량은 토양내 석력이 많을수록 유출토사량에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 이러한 결과는 석력함량이 많을수록 뿌리의 생육이 왕성하지 못하여 수목근계에 의한 토사역지효과가 약하고, 또한 강우시 토양입자 사이의 긴박력이 약해져 사면붕괴가 많이 발생하기 때문으로 추정되었다. 사면방위는 남~동(S~E)사면이 유출토사량에 대한 상대점수가 가장 높게 나타났으며, 이러한 결과는 우리나라의 지리적 특성상 여름철에 계절성 호우 및 장마전선의 북상에 따른 영향으로 판단되었다. 주하천장과 총하천길이는 하천 길이가 길수록 유출토사량에 대한 기여도가 지속적으로 증가하는 것이 아니라, 일정한 하천의 길이가 초과되면 기여도는 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 붕괴지역에서 생산된 토사가 계류내에 퇴적과 침식 또는 하류로 이동을 반복

하는 과정에서 하천의 길이가 길수록 댐내에 도달하는 유출토사량보다 계류에 퇴적되는 량이 많이 발생하기 때문인 것으로 분석되어, 거리와 토사유출간에는 반비례의 관계가 성립하고 있는 것으로 추정되었다. 총하천수와 하천차수, 일차하천수는 유역내 하천수가 많을수록 상대점수가 높게 나타나 산림유역의 토사유출에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 사면경사는 경사가 급할수록 유출토사량의 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되어 Fox와 Bryan(2000), Carroll 등(2000)의 보고와 유사한 경향이였다.

유출토사량에 영향을 미칠 것으로 예상되는 13개의 산림환경 및 하천형태인자를 54개의 category로 구분하고, 수량화이론(I)에 의하여 분석된 각 인자의 category별 상대점수로 유출토사량을 추정하였다.

추정식은 $Y = -0.1782 X_{1,1} + 0.0530 X_{2,1} + 0.2138 X_{3,1} - 0.0613 X_{4,1} - 0.2307 X_{5,1} - 0.7962 X_{6,1} - 0.1208 X_{7,1} - 0.7527 X_{8,1} - 0.5891 X_{9,1} + 0.2144 X_{10,1} - 0.2240 X_{11,1} - 0.5000 X_{12,1} - 0.2000 X_{13,1}$ 로 도출되었으며, 이에 대한 설명력은 89% 정도였다.

유출토사량과 각종 인자와의 관계를 편상관계수 분석한 결과(Table 4), 석력함량, 총하천수, 총하천길이, 일차하천수는 1% 수준에서 유의성이

인정되었고, 모암, 임상, 주하천장은 5% 수준에서 유의성이 인정되어 유출토사량을 추정함에 있어서, 이들 인자가 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료되었다.

편상관계수에 의한 각 인자별 유출토사량에 대한 기여도를 분석한 결과(Fig. 3), 석력함량(X₆)이 0.8122로 가장 높게 나타났고, 다음으로 일차하천수(X₁₂;0.3801), 총하천수(X₉;0.3693), 총하천길이(X₁₀;0.2951), 임상(X₂;0.1865), 주하천장(X₈;0.1772), 모암(X₁;0.1764), 임령(X₃;0.1414), 토성(X₅;0.1030), 하천차수(X₁₁;0.0964) 순으로 나타났으며, 사면경사(X₁₃;0.0854), 토심(X₄;0.0693), 사면방위(X₇;0.0200)는 편상관계수가 낮게 나타나, 다른 인자에 비하여 유출토사량에 영향을 미치는 기여도가 낮은 것으로 추정되었다.

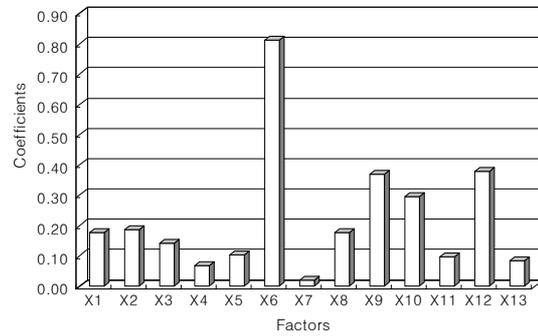


Fig. 3. Partial correlation coefficients of each factor affecting to annual mean sediment yield

Table 4. Partial correlation analysis between each factor and annual mean sediment yield

| Factors | | Partial correlation coefficients | Test of significance | Prob>T |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------|
| X ₁ | Parent rock | 0.1764 | -2.113 | 0.0364* |
| X ₂ | Forest type | 0.1865 | 2.239 | 0.0267* |
| X ₃ | Stand age | 0.1414 | 1.683 | 0.0946 |
| X ₄ | Soil depth | 0.0693 | 0.817 | 0.4155 |
| X ₅ | Soil texture | 0.1030 | 1.218 | 0.2252 |
| X ₆ | Gravel contents | 0.8122 | 16.417 | 0.0001** |
| X ₇ | Aspect | 0.0200 | 0.224 | 0.8228 |
| X ₈ | Length of main stream | 0.1772 | 2.122 | 0.0356* |
| X ₉ | Number of total streams | 0.3693 | -4.686 | 0.0001** |
| X ₁₀ | Length of total streams | 0.2951 | 3.641 | 0.0004** |
| X ₁₁ | Stream orders | 0.0964 | 1.144 | 0.2546 |
| X ₁₂ | Number of first stream orders | 0.3801 | 4.845 | 0.0001** |
| X ₁₃ | Slope gradient | 0.0854 | 1.010 | 0.3142 |

* significant at the 5% level, ** significant at the 1% level

2. 산림유역의 안정성 평가

각 인자의 category별 상대점수(Table 2)를 167개 조사지역의 각종 인자에 반응시켜 합산한 추정치를 이용하여 유역의 안정성을 I, II, III급으로 평가한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Prediction score for evaluation of watershed stability by normalized score

| Class of watershed stability | Prediction score | Number of areas (%) |
|------------------------------|------------------|---------------------|
| Very unstable area(I) | 1.0675 ≤ | 60(36%) |
| Moderate stable area(II) | -1.3367 ~ 1.0674 | 70(42%) |
| Very stable area(III) | ≤ -1.3368 | 37(22%) |

13개의 산림환경 및 하천형태인자의 category별 상대점수를 167개 산림유역의 각종 인자에 반응시켜 계산한 추정치 범위는 -3.7411점에서 3.4717점 사이에 분포하고 있었으며, 중앙값은 -0.1347점이었다.

I 급지는 추정치 1.0675점 이상의 지역으로 167개 조사지역 중 60개소가 포함되어 36%의 분포를 보였고, II 급지는 추정치 1.0674점에서 -1.3367점 사이로 70개소에 42%를 차지하였으며, III급지는 추정치 -1.3368점 이하의 지역으로 37개소에 22%의 분포를 나타내었다.

추정치에 의하여 평가(Table 5)된 I, II, III 급지에 속하는 13개 산림환경 및 하천형태인자

를 각 급지의 category별 출현수에 대한 각 category별 총출현수의 비(%)로 하여 각 급지에 많은 분포를 나타내는 각 인자의 category를 정리한 결과는 Table 6과 같다.

I 급지는 산지사면 침식 및 토사유출과 산사태 발생이 빈번한 화성암지역으로, 임상은 활엽수림이며, 임령은 20년생 이하, 토심은 30cm 이하로, 임령이 낮고, 토심이 깊지 않아 뿌리가 왕성하게 발달하지 못하고, 또한 토양 깊숙이 뿌리가 뻗지 못하여 적은 경우에도 표면침식이 발생하기 쉬운 지역이었다. 토성은 강우시 표면유출수와 함께 하류로 흘러내리기 쉬운 사질식양토(SCL)로 나타났으며, 토양내 석력함량은 41% 이상이며, 사면방위는 여름철에 계절성 강우 및 장마전선의 영향을 받는 남~동(S~E)사면이었다. 주하천장은 2,501~3,500m, 총하천수는 21~25개, 총하천길이는 5,501~10,000m로 상당히 긴 유로와 많은 하천수를 가지고 있었으며, 하천차수는 지천과 세천을 많이 가지고 있는 4차수 또는 3차수였다. 경사가 급한 산정부에 위치하며, 빠른 유속으로 산지사면 침식에 큰 기여도를 가지는 일차하천수는 11개 이상이었으며, 사면경사는 31°이상의 지역으로 나타나, 대체적으로 화성암지역으로, 20년생 이하의 활엽수림이 우점하며, 산림환경인자가 사면 침식에 대해 매우 불안정측에 속하고 있고, 하

Table 6. General condition of each class by the prediction score of watershed stability

| Factors | | Class | | |
|-----------------|--------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| | | I | II | III |
| X ₁ | Parent rock | Igneous rock | Metamorphic rock | Sedimentary rock |
| X ₂ | Forest type | Hardwood | Coniferous | Mixed |
| X ₃ | Stand age | ≤20year | 21~24year | 25year≤ |
| X ₄ | Soil depth | ≤30cm | 31~40cm | 51cm≤ |
| X ₅ | Soil texture | SCL | SiL | SiCL |
| X ₆ | Gravel contents | 41%≤ | 11~20% | ≤10% |
| X ₇ | Aspect | S~E | N~W | S~W |
| X ₈ | Length of main stream | 2,501~3,500m | 3,501m≤ | 501~1,000m |
| X ₉ | Number of total streams | 21~25 | 6~10 | ≤5 |
| X ₁₀ | Length of total streams | 5,501~10,000m | 5,501~10,000m | ≤1,000m |
| X ₁₁ | Stream orders | 4≤ or 3 | 2 | ≤1 |
| X ₁₂ | Number of first streams orders | 11≤ | 3~5 | ≤2 |
| X ₁₃ | Slope gradient | 31°≤ | 31°≤ | ≤25° |

천형태인자 또한 많은 하천과 긴 유로를 가지 는 경사가 급한 산림유역이 I급지로 평가었다.

II급지는 사면 다소 안정되어 있는 변성암지 역으로, 임상은 침엽수림이며, 임령은 21~24년 생이었고, 토심은 31~40cm, 토성은 점토질이 적당하게 함유되어 있는 미사질양토(SiL)로 나 타났으며, 토양내 석력함량은 11~20%정도였 다. 사면방위는 북~서(N~W)사면이었고, 주하 천장은 3,501m 이상, 총하천수는 6~10개, 총하 천길이는 5,501~10,000m로 강우발생시 어느 정도의 유량과 유속에 의하여 산지사면의 토양 침식과 토사유출이 우려되는 지역이었다. 하천 차수는 지천과 세천을 어느 정도 가지는 2차수 였고, 일차하천수는 3~5개였으며, 사면경사는 31°이상의 지역으로 나타나, 대체적으로 변성 암지역으로, 21~24년생의 침엽수림이 우점하 며, 임령과 토심, 토성 등 산림환경인자는 사면 침식에 대해 다소 안정되어 있으나, 하천형태

인자에 의하여 산지사면의 붕괴 및 침식이 우 려되는 산림유역이 II급지로 평가되었다.

III급지는 사면이 가장 안정되어 있는 퇴적암 지역으로, 임상은 혼효림이며, 임령은 25년생 이상, 토심은 51cm 이상으로, 수관에 의한 강우 차단량이 상당히 많고, 임령이 높고, 토심이 깊 게 나타나, 수목근계가 땅속 깊은 곳까지 뿌리 를 뺄 수 있는 지역으로 강우시 표면유출수 및 지중수에 의한 토양침식과 붕괴 및 산사태 발생에 대해 큰 저항력을 가지고 있는 지역이 었다. 토성은 토양내 점토질이 많고, 식생정착 및 생육이 양호한 미사질식양토(SiCL)였으며, 토양내 석력함량은 10% 이하, 사면방위는 남~ 서(SW)사면이었다. 주하천장은 501~1,000m, 총하천수는 5개 이하, 총하천길이는 1,000m 이 하로 산지계류에서 토양침식에 영향을 미치는 유속과 유량이 낮은 곳이었다. 하천차수는 1차 수였고, 일차하천수는 2개 이하, 사면경사는

Table 7. Score table for prediction of watershed stability

| | | Category | | | | | |
|-----------------|-------|------------------|--------------|------------------|-------------|--------------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| X ₁ | Cate. | Sedimentary rock | Igneous rock | Metamorphic rock | | | |
| | Score | 0 | 0.3887 | 0.0431 | | | |
| X ₂ | Cate. | Coniferous | Hardwood | Mixed | | | |
| | Score | 0.4909 | 0.4991 | 0 | | | |
| X ₃ | Cate. | ≤20year | 21~24 | 25year≤ | | | |
| | Score | 0.3044 | 0.1434 | 0 | | | |
| X ₄ | Cate. | ≤30cm | 31~40 | 41~50 | 51cm≤ | | |
| | Score | 0.4032 | 0.4395 | 0.5415 | 0 | | |
| X ₅ | Cate. | SiCL | SiL | SCL | | | |
| | Score | 0 | 0.2023 | 0.5382 | | | |
| X ₆ | Cate. | ≤10% | 11~20 | 21~30 | 31~40 | 41%≤ | |
| | Score | 0 | 0.3004 | 0.9796 | 2.9236 | 6.8242 | |
| X ₇ | Cate. | N~E | N~W | S~E | S~W | | |
| | Score | 0.0837 | 0.2458 | 0.4127 | 0 | | |
| X ₈ | Cate. | ≤500m | 501~1,000 | 1,001~1,500 | 1,501~2,500 | 2,501~3,500 | 3,501m≤ |
| | Score | 0 | 0.0671 | 1.2225 | 1.2858 | 1.1821 | 0.8845 |
| X ₉ | Cate. | ≤5 | 6~10 | 11~15 | 16~20 | 21~25 | 26≤ |
| | Score | 0 | 0.2352 | 1.8229 | 3.0462 | 4.9711 | 1.4051 |
| X ₁₀ | Cate. | ≤1,000m | 1,001~2,000 | 2,001~3,500 | 3,501~5,500 | 5,501~10,000 | 10,001m≤ |
| | Score | 2.9279 | 3.1344 | 3.2791 | 2.6840 | 1.1930 | 0 |
| X ₁₁ | Cate. | ≤1 | 2 | 3 | 4≤ | | |
| | Score | 0 | 0.1935 | 0.4339 | 1.2839 | | |
| X ₁₂ | Cate. | ≤2 | 3~5 | 6~10 | 11≤ | | |
| | Score | 0 | 0.3527 | 1.6360 | 1.9817 | | |
| X ₁₃ | Cate. | ≤25° | 26~30 | 31°≤ | | | |
| | Score | 0 | 0.2090 | 0.3191 | | | |

25°이하의 지역으로 나타나, 대체적으로 퇴적암지역으로 25년생 이상의 침·활 혼효림이 우점하고 있으며, 임령, 토심, 토성 등 산림환경 인자가 사면침식에 대해 매우 안정측에 속하고 있고, 하천형태인자 또한 사면침식 및 붕괴발생에 대한 영향력이 아주 미약한 경사가 완만한 야산지역이 III급지로 평가되었다.

3. 산림유역의 안정성 예측

각 인자의 category별 상대점수(Table 3)는 (+) 및 (-)의 값으로 되어 있기 때문에 이용상 불편한 점이 많다. 따라서 이들 점수 중 (-)의 수치를 (+)의 수치로 변환하여 사용하여도 상대적으로 무관함으로, 각 인자의 category별 상대점수 중 최소값을 0으로 표시하고, 최소값을 각 인자의 category별 상대점수에 가산하여 (+)의 값으로 변환시켰다(Table 7).

13개의 산림환경 및 하천형태인자의 category별 상대점수 중에서 (-)수치를 (+)수치로 변환한 결과, 추정치의 합계가 I급지(Very unstable area)는 8.4494점 이상으로 사면이 매우 불안정한 지역, II급지(Moderate stable area)는 8.4493점에서 6.0452점 사이로 안전한 지역, III급지(Very stable area)는 점수의 합계가 6.0451점 이하의 지역으로 매우 안전한 지역으로 예측되었다.

IV. 結 論

산림환경 및 하천형태인자의 유출토사량에 대한 기여도를 분석하여, 산지사면에서 발생하는 각종 재해를 예측하고, 피해를 최소화할 수 있는 유역안정성에 대한 평가기준을 정립하고자 연구한 결과는 다음과 같다.

유출토사량에 대한 각 인자의 기여도를 분석한 결과, 편상관계수는 석력함량이 0.8122로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 일차하천수(0.3801), 총하천수(0.3693), 총하천길이(0.2951), 임상(0.1865), 주하천장(0.1772), 모암(0.1764), 임령(0.1414), 토성(0.1030), 하천차수(0.0964), 사면경사(0.0854), 토심(0.0693), 사면방위(0.0200) 순으로 나타났으며, 사면안정성을 평가한 결과 I급지는 화성암

지역으로 활엽수림이며, 임령은 20년생 이하, 토심은 30cm 이하, 토성은 사질식양토(SCL), 석력함량은 41% 이상이며, 사면방위는 남~동(S~E) 사면, 주하천장은 2,501~3,500m, 총하천수는 21~25개, 총하천길이는 5,501~10,000m, 하천차수는 4 또는 3차수이며, 일차하천수는 11개 이상, 사면경사는 31°이상의 지역으로 평가되었고, II급지는 변성암지역으로 침엽수림이며, 임령은 21~24년생, 토심은 31~40cm, 토성은 미사질양토(SiL), 석력함량은 11~20%, 사면방위는 북~서(N~W)사면, 주하천장은 3,501m 이상, 총하천수는 6~10개, 총하천길이는 5,501~10,000m, 하천차수는 2차수, 일차하천수는 3~5개, 사면경사는 31°이상의 지역으로 평가되었으며, III급지는 퇴적암지역으로 혼효림이며, 임령은 25년생 이상, 토심은 51cm 이상, 토성은 미사질식양토(SiCL), 석력함량은 10% 이하, 사면방위는 남~서(S~W) 사면, 주하천장은 501~1,000m, 총하천수는 5개 이하, 총하천길이는 1,000m 이하, 하천차수는 1차수, 일차하천수는 2개 이하, 사면경사는 25°이하의 지역으로 평가되었다. 사용이 용이하도록 변환한 category별 점수를 이용하여 사면안정성을 예지한 결과, 점수의 합계가 I급지는 8.4494점 이상으로 매우 불안정한 지역이며, II급지는 8.4493점에서 6.0452점 사이로 안전한 지역, III급지는 6.0451점 이하의 지역으로 매우 안전한 지역으로 예측되었다.

V. 인 용 문 헌

- 姜渭平 · 村井宏 · 大村寬 · 麻鎬燮. 1986. 數量化(II)에 의한 山沙汰斜面的 危險度 判別. 韓國林學會誌 75 : 32-37.
- 建設交通部. 1999. 河川 工事計劃과 砂防計劃과 設計施工. 大建社. 14p.
- 麻鎬燮. 1994. 山地斜面的 崩壞危險度 豫測모델의 開發 및 實用化方案. 韓國林學會誌 83(2) : 175-190.
- 산림청. 1998. 사방기술교본. 17p.
- 산림청. 2000. 임업통계연보. 5p.
- 安相鎭. 1980. 流域의 河川形態學的 特性因子와

- 流出 및 水理幾何間의 相關性. 仁荷大學校 博士學位 論文. 51p.
- 이인모·성상규·임충모. 1991. 뿌리의 強度가 自然斜面 安定에 미치는 影響에 關한 實驗研究. 大韓土質工學會誌 7(2) : 51-66.
- 車斗松·池炳潤·吳宰憲. 2000. Fuzzy理論을 利用한 林道斜面의 崩壞可能性 評價(I)-變成岩地域의 盛土斜面을 中心으로-. 韓國林學會誌 89(1) : 33-40.
- 崔敬. 1986. 韓國의 山沙汰 發生要因과 豫知에 關한 研究. 江原大學校 博士學位論文. 45p.
- 崔敬. 1999. 임도사면에서의 붕괴발생원인과 방지대책. 산림 405 : 50-53.
- 西 邦正·吉川浩平·中川浩二. 1992. Fuzzy理論을 用いたのり面の崩壞要因および崩壞可能性の 評價について. 土木學會論文集 445 : 109-118.
- 海堀正博·石川芳治·牛山素行·久保田哲也·平松晋也·藤田正治·三好岩生·山下祐一. 1999. 1999年6月29日廣島土砂災害に關する緊急 調査報告(速報). 砂防學會誌 52(3) : 34-43.
- 淺見和弘. 1996. 植生からみた急傾斜地表面の安定性とその評價. 應用地質研報. 17 : 13-26.
- 淺見和弘. 1997. 相模川沿い急傾斜地における植物群落から見た表層崩壞の判定. 砂防學會誌 49(5) : 36-41.
- 梶原規弘·塚本次郎·入田愼太郎. 1999. ヒノキ人工林における下層植生のタイプと土壤侵蝕危険度との關係. 日林誌 81(1) : 42-50.
- 松本舞惠·下川悦郎·地頭蘭陸. 1999. 表層崩壞跡地における植生の自然的回復過程. 日林誌 81(1) : 65-73.
- 新版 標準土色帖. 1997. 農林水産省農林水産技術會議事務局. 22p.
- 岡本 隆一·緒方 正度·小島 圭二. 1984. 土木地質. 技報堂出版(株). 214p.
- 大手信人·鈴木雅一·窪田順平. 1989. 森林土壤の土壤水分特性(I). 飽和-不飽和透水特性の鉛直分布の測定法と2, 3の測定結果. 日林誌 71 : 37-147.
- 平松晋也·石川芳治·小山内 信智·三好岩生. 1999. 1999年6月29日德島縣西祖谷山村で發生した土砂災害(速報). 砂防學會誌 52(3) : 44-49.
- 西島 巖. 1955. 地形圖の續み方と圖式の説明. オーム社書店. 106p.
- 陶山正憲·玉井幸治. 1999. 樹木根系の斜面安定化機能の評價方法に關する一考察. 静岡大學農學部附屬演習林報告 23 : 37-44.
- 内田太郎·木本秋津·大手信人·水山高久. 1999. 荒廢山地の土砂生産過程に關する原位置實驗. 砂防學會誌 51(5) : 3-11.
- 吉村哲彦·赤羽 元·神崎康一. 1995. Fuzzy理論を用いた林道のり面の崩壞危険度判定法. 森林學誌 10(3) : 195-204.
- 吉村哲彦·赤羽 元·宮崎裕之·神崎康一. 1996. Fuzzy積分による林道のり面の崩壞危険度判定法. 森林學誌 11(3) : 165-172.
- 志水俊夫. 1977. 花崗岩地帯の斜面の安定性に關する統計的解析. 日林誌 59(5) : 186-190.
- 志水俊夫. 1978. 崩壞の危険がある斜面の判定-その理論と手法-. 林業技術 439 : 23-26.
- Carroll C, L. Merton and P. Burger. 2000. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines. Australian journal of soil research 38(2) : 313-327.
- Fox D. M. and R. B. Bryan. 2000. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. Catena 38(3) : 211-222.
- Huang, Y. H. 1983. Stability Analysis of Earth Slope. Van Norstrand Reinhold Co. 52-67pp.
- Mosely, M. P. 1982. Subsurface flow velocities through selected forest soil, South Island, New Zealand. J. Hydrol. 55 : 65-92.
- Reddy, V. S. and J. S. Singh. 1993. Changes in vegetation and soil during succession following landslide disturbance in the central Himalaya, J. Environ. Manage. 39 : 235-250.
- Strahler, A. N. 1952. Dynamic Basis of Geomorphology. Geological Society of American, Bulletin 63 : 923-938.