

국립공원 지역에 있어서 토석류 재해의 특성 분석*

마호섭¹⁾ · 정원옥²⁾

¹⁾ 경상대학교 환경산림과학부(농업생명과학연구원) · ²⁾ 국립공원관리공단 국립공원연구원

Characteristics Analysis of Debris Flow Disaster in Korean National Parks*

Ma, Ho-Seop¹⁾ and Jeong, Won-Ok²⁾

¹⁾ Division of Forest Science, Gyeongsang Nat'l Univ.,

²⁾ Korea National Park Research Institute.

ABSTRACT

This study was carried out to analyze the occurrence characteristics and the influence of forest environment factors on the debris flow of 3 national parks in Korea. The results obtained from this study were summarized as follows; The total number of debris flow occurrence was 125 areas. The average length of the debris flow scar was 144m, average width was 20m. And the average area and sediment were 2,854m² and 3,959m³ respectively. The factors influencing the debris flow were highly occurred in Metamorphic rock, mixed forest type. And also, slope gradient was 30~35°, aspect was NE, altitude was over 1,000m, vertical and cross slope was concave (凹), soil depth was below 15cm, stream order was 0 order. The variables of cross slope (complex), deciduous tree, soil depth (over 46cm), cross slope (concave), mixed forest type and altitude (801~1200m) in correlation analysis were significant at 1 % level.

The landslide of high mountain area highly tend to change the debris flow in stream bed of torrent. The debris flow in national parks mainly occurred in high mountain area with long ridge and steep slope.

Key Words : *Debris flow, Sediment, National park*

* 본 연구는 2007년 국립공원관리공단의 연구지원비 및 2009년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의해 수행된 결과물의 일부입니다.

Corresponding author : Jeong, Won-Ok, Korea National Park Research Institute, Namwon 590-811, Korea,
Tel : +82-63-630-7654, E-mail : wonokjung@knps.or.kr

Received : 15 May, 2010. **Revised** : 30 June, 2010. **Accepted** : 9 August, 2010.

I. 서 론

국토의 64%를 차지하는 산지는 매년 여름철이면 태풍 및 집중호우 등으로 산지 토사재해가 발생하고 있다. 산사태 발생면적은 1980년대 연평균 154.75ha에서 1990년대 291ha로 188% 이상 증가하여 산지재해가 급증하는 추세에 있다(국립공원관리공단, 2007) 이와 같이 여름철 태풍을 동반한 집중호우는 산사태와 토석류의 발생 확률을 높게 할 뿐만 아니라 인명과 재산손실을 야기하는 직접적 원인이 되고 있다. 지난 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미로 인하여 산불피해를 받은 동해안 일대에서 4,035ha의 산사태가 발생하여 토석류로 발전한 지역에서 45명의 인명피해와 약 3,520억원의 복구비가 투입되었다. 또한, 2006년에는 현재까지 산사태 피해가 없던 설악산 일대와 인제지역에서도 약 1,597ha의 산사태가 토석류로 발전하여 9명의 인명피해와 약 2,750억원의 복구비가 투입되었다. '76년 이후 연평균 피해면적 406ha, 인명피해 40명, 복구비용 191억원의 피해를 받고 있는데 이는 홍수, 산불 등 기타 자연재해로 인한 인명피해 142명의 1/3에 해당하는 것이다. 30년간 총 복구면적은 약 11,591ha에 599,009백만원의 복구비가 투입되었고, 1,113명의 인명피해가 있었다(산림청, 2007).

토석류(Debris flow)는 흙과 암편들이 물과 혼합되어 비탈면과 계곡을 따라 흘러내리는 현상으로 표토층이 강우로 포화되어 빠른 속도로 중력 방향으로 낙하·이동하며, 그 붕괴 토사는 계상 퇴적물과 함께 흘러 내리면서 계곡을 일시적으로 막고 그 뒤에 밀려오는 물에 의해 무너져 순간적으로 하류에 큰 재난을 일으킨다. 토석류는 피해를 예측하기가 매우 힘들며 일단 발생하면 큰 피해를 유발한다는 점에서 많은 관심을 가질 필요가 있다. 이러한 토석류피해가 이슈화 되면서 산림분야 뿐만 아니라 토목분야에서도 적극적으로 토석류 관련연구가 많이 진행되고 있다. 최근 국내 토석류에 관한 연구는 토석류 피해범위 예측

을 위한 Random Walk Model의 적용 및 검토(이창우 등, 2008), 항공사진을 이용한 산지토사재해 영향인자 분석(우충식 등, 2008), 산림의 토사유출 방지기능에 관한 연구(윤호중 등, 2007), 산사태의 확률론적 예측 방법으로 로지스틱 회귀분석을 이용한 연구(김원영 등, 2000; 채병곤 등, 2004a; 채병곤 등, 2004b; 조용찬 등, 2007) 등이 있다. 그러나 토석류 발생은 같은 지역에서 집중적으로 발생하는 특성이 있으나, 토석류 발생원인과 규모, 그리고 그 대처방안에 대해 체계적 연구가 활발하게 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 국립공원지역에서 발생한 토석류의 규모, 인자별 발생빈도 및 발생면적에 영향을 미치는 인자 도출 등 국립공원내 토석류의 특성을 분석하여 향후 국립공원내 토석류 발생 위험지 예측 및 관리방안 수립에 필요한 기초적 자료를 제공하고자 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 조사지역 및 방법

우리나라 국립공원 중 2006년까지 태풍과 집중호우 등으로 인하여 토석류가 발생한 설악산(92개소), 지리산(21개소), 소백산(12개소)의 총 125개소 토석류 발생지를 대상으로 항공사진, 헬리콥터 및 현지조사를 통하여 토석류 규모 및 각종 환경 인자를 다음과 같이 조사하였다.

1) 토석류 구간(m) : 토석류 발생원, 토사유과 구간 및 퇴적중점까지를 토석류 길이로 하여 측정함.

2) 토석류 폭(m) : 토석류 발생원 3지점과 유과구간 3지점에서 폭(너비)을 측정하여 평균함.

3) 토석류 깊이(m) : 토석류 발생원 3지점과 유과구간 3지점에서 깊이를 측정하여 평균함.

4) 토석류 발생면적(m^2) : 토석류 구간×토석류 폭으로 계산함.

5) 퇴적토사량(m^3) : 토석류 발생원 및 토사유과구간까지의 길이×폭×깊이로 계산함.

6) 사면경사(°) : 토석류 구간의 경사를 지형도 및 Clinometer를 이용하여 측정함.

7) 사면방위 : 토석류 구간에서 지형도 및 Compass를 이용하여 N, E, S, W로 구분함.

8) 사면형태 : 토석류 구간의 종단 및 횡단사면을 볼록(凸), 오목(凹), 직선(□), 복합(凹凸) 사면으로 구분함.

9) 표고(m) : 지형도상에서 토석류 구간의 고도를 측정함.

10) 사면위치 : 토석류 발생구간의 위치를 산정, 산북, 산록으로 구분함.

11) 하천차수 : 산사태가 발생하여 토석류로 발전된 지점의 차수로서 1/25,000 지형도상에서 Horton-Strahler(1952)의 방식에 의해 구분함.

12) 임상 : 토석류 발생구간의 임상도 및 현지 조사를 통해 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분함.

13) 모암 : 토석류 발생구간의 지질도와 현지 조사를 통하여 퇴적암, 화성암, 변성암으로 구분함.

14) 토심(cm) : 토심은 토석류 발생원 3지점과 유과구간 3지점에서 측정하여 평균함.

2. 분석방법

토석류 발생구간을 대상으로 퇴적토사량에 영향을 미치는 산림환경 인자를 조사하여 토석류 발생 특성을 분석하고, 또한, 각 인자를 표 1과 같이 카테고리화하여 토석류 발생과 10개 산림환경인자(경사도, 방위, 종단면도, 횡단면도, 표고, 사면위치, 하천차수, 식생(임상), 모암, 토심)와의 관계를 상관분석 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 토석류 발생특성 분석

우리나라 3개 국립공원에서 발생한 토석류 125개소를 대상으로 지형 및 지세에 따른 토석류 발생규모별 발생 빈도를 분석한 결과는 그림 1과 같다.

국립공원 3개 지역에서 발생한 토석류 발생면적은 2,001 ~ 3,000m² 범위에서 34개소가 발생하여 가장 높은 빈도를 보였고, 다음으로 1,001 ~ 2,000m²에서 25개소, 40,000m² 이상규모에서 21개소, 500 ~ 1,000m² 규모에서도 20개소가 나타났으며, 토석류 발생 평균면적은 2,854m²이었다.

Table 1. Classification of category for each factor.

Factors	Category					
	1	2	3	4	5	6
Area	<500m ²	501 ~ 1000m ²	1001 ~ 2000m ²	2001 ~ 3000m ²	3001 ~ 4000m ²	4001m ² <
Sediment	<500m ³	501 ~ 1000m ³	1001 ~ 2000m ³	2001 ~ 3000m ³	3001 ~ 4000m ³	4001m ³ <
Length	<100m	101 ~ 150m	151 ~ 200m	201m<		
Breadth	<5m	6 ~ 10m	11 ~ 20m	21 ~ 30m	31 ~ 40m	41m<
Slope gradient	<10°	11 ~ 20°	21 ~ 30°	31 ~ 40°	41 ~ 50°	51°<
Aspect	N	E	S	W		
Vertical slope	Concave	Straight	Convex	Complex		
Cross slope	Concave	Straight	Convex	Complex		
Altitude	<400m	401 ~ 800m	801 ~ 1,200m	1,201m<		
Position	Upper	Middle	Lower			
Stream order	0	1	2	3<		
Forest type	Coniferous	Deciduous	Mixed			
Parent rock	Igneous	Metamorphic	Sedimentary			
Soil depth	<15cm	16 ~ 30cm	31 ~ 45cm	46cm<		

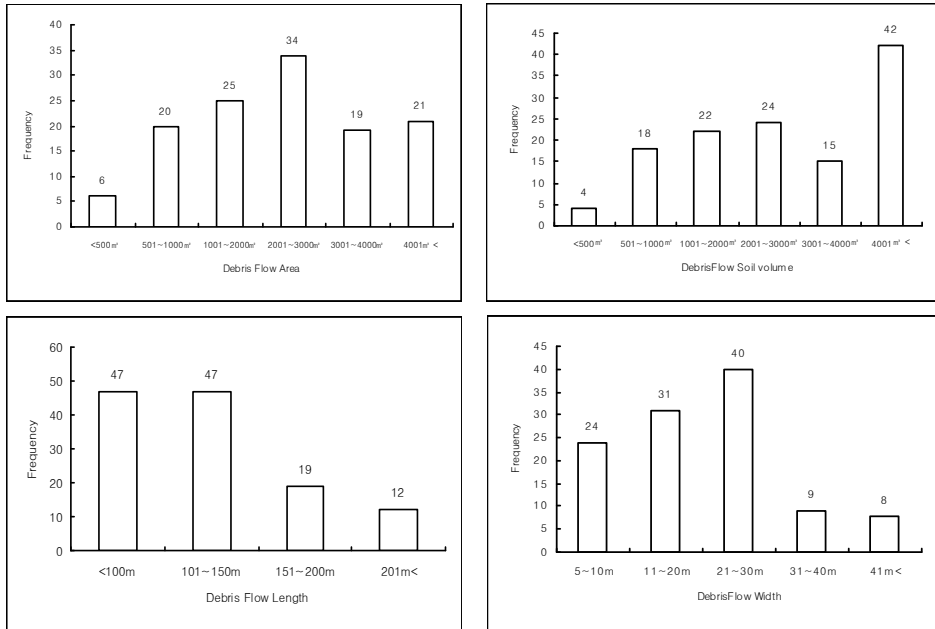


Figure 1. Frequency by area, sediment, length and width of debris flow.

토석류로 인한 퇴적토사량은 40,000m³ 이상규모에서 42개소로 가장 높은 빈도 발생하였으며, 다음으로 2,001~3,000m³ 규모에서 24개소, 2,001~3,000m³에서 22개소가 나타났으며, 토석류의 평균 퇴적토사량은 3,959m³이었다. 토석류 구간은 50m~100m 이하 및 101~150m 범위에서 각각 47개소로 가장 많은 발생빈도를 보였고, 다음으로 151~200m범위에서 19개소가 조사되었으며, 토석류의 평균 구간은 144m로 나타났다. 이는 태풍 ‘루사’로 인한 산사태 평균 발생 길이

21.2m(산림청, 2004)와 강원도 강릉시 양양시 46개소(이수곤, 2002)의 산사태 발생 길이 10~60m의 범위 보다 상당히 큰 차이가 있다. 이러한 결과는 국립공원의 지리적 특성상 산정 꼭두 및 1차 하천 지점의 토심이 얇은 급경사지 상부에서 발생한 산사태가 토석류로 발전하여 하부로 이동하기 때문으로 산사태 길이와 토석류 발생 구간에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 토석류 폭은 21~30m 범위가 40개소, 11~20m범위가 31개소로 나타났고, 5~10m 범위에서도 24개소가

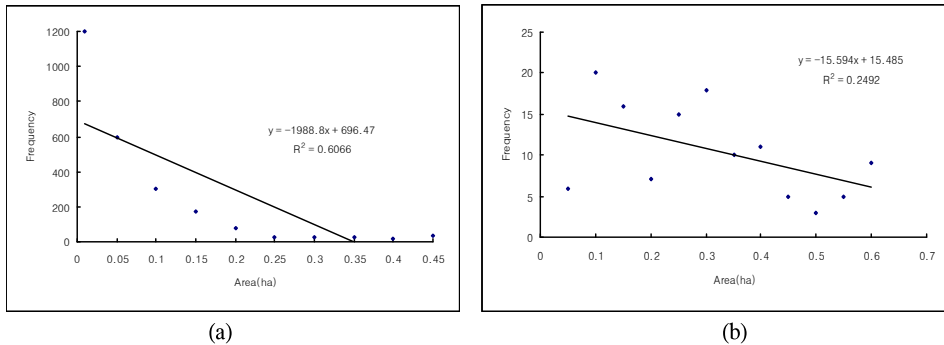


Figure 2. Frequency by occurrence area of landslide (a) and debris flow (b).

조사되어 평균 폭은 20m로 나타났다.

1987년 7월 15일 태풍 5호에 의하여 경남지구인 산청(482개소), 함양(1,148개소), 거창(722개소), 합천(62개소), 하동(48개소), 창녕(28개소)에서 총 2,490개소에서 산사태가 발생하였다(강위평 등, 1988). 이들 자료를 이용하여 붕괴면적과 붕괴 개소 수와의 관계를 분석한 결과는 그림 2의 (a)와 같다. 그림 2의 (a)에서 보면 산사태 개소당 면적이 0.01ha(100m²) 이하는 1,220개소로 전체의 49%를 차지하고 있고 0.1ha(1000m²) 이하는 2,117개소로서 전체의 85%를 차지하고 있다. 붕괴면적은 소규모성으로 규모가 클수록 개소 수는 적어져 반비례하는 경향을 보이고 있다. 이들 결과에 의하면 우리나라의 일반 산지의 산사태 발생 패턴은 알고 좁으며, 짧은 길이의 소규모적이며 다발적이라고 할 수 있다.

국립공원에서 발생한 토석류 자료를 이용하여 발생면적과 개소와의 관계를 분석한 결과는 그림 2의 (b)와 같다. 발생면적과 개소와의 관계를 보면 토석류 개소당 면적이 0.1ha(1,000m²) 이하는 26개소로 전체의 31%를 차지하며, 0.3ha(3,000m²) 이하는 82개소로서 전체의 66%를 차지하고 있다. 발생면적이 작을수록 개소 수는 많고, 발생면적이 클수록 개소 수는 적어 반비례하는 경향을 보였으나, 일반산지의 경우 산사태 규모에 있어서 0.1ha(1,000m²) 이하가 85%이지만, 국립공원지역은 31%로 나타났다. 국립공원 지역은 고산지대이므로 비교적 능선의 길이가 길어 산사태가 발생하면 대규모성의 토석류로 발전하는 경향을 알 수 있다.

특히, 설악산국립공원과 주변지역인 설악산, 오색, 설악동, 미시령, 진부령, 원통 및 인제지역에 설치되어 있는 자동우량측정 장치(AWS)에서 얻은 강우자료를 통하여 토석류 발생 특성을 분석하였다. 토석류 발생에 직접적인 영향을 미친 강우상황은 표 2에서와 같이 2006년 7월 12일부터 7월 20일까지 누계강우량 3,284mm, 토석류가 시작된 7월 15일의 최대시우량은 오색 70.5mm,

설악동 108.5mm, 미시령 26mm, 진부령 44.5mm, 원통 11.5mm, 인제 66mm, 설악산 97mm가 내렸다. 토석류발생 3일전인 7월 12일의 총강우량은 746.5mm였으나, 7월 13일은 44.5mm로 감소하였으며 7월 14일 407.5mm로 증가하였다. 7월 13일은 강우가 거의 없어, 상승되어 있던 지하수위가 급격히 감소하고 있을 무렵 또다시 14일경 호우가 발생하였다. 이와 같이 짧은 시간에 집중적인 강우에 대해 Brand(1985)는 짧은 시간에 내리는 집중강우는 지질조건이나 수문 및 토질조건과 관계없이 대형 산사태를 일으킬 수 있다고 보고하였다. 7월 15일 977.5mm/24hr의 강우량에 의해 풍화토층으로 이루어진 연약지반이 집중 침하되었으며 불어난 계곡물에 의해 계안침식이 발생하였으며, 오색지구와 설악지역은 지표수가 토양 내에 포화되어 표토층이 활락되면서 하부 석력층을 경계로 붕괴하여 계곡을 따라 토석류로 발전하였다. 백담지구는 암반 위의 마사토가 씻겨 내려가면서 토석류가 발생하였으며, 장수대지구는 지표수에 의해 암반위의 나무뿌리와 토양이 유실되면서 토석류로 발전하였다.

오색지구에서 발생한 산사태와 토석류의 진행도를 분석한 결과(그림 3), 표고 1,220m에서 발생한 산사태에서 생산된 토사는 계곡에서부터 다시 물과 함께 토석류로 변화하여 더욱 하류로 진행하면서 계류를 황폐하게 만들었다. 이때 붕괴물질은 산지사면을 순간적으로 소류활동하면서 그 진행로 상에 있는 모든 물체를 쓸고 내려 산복 하부에 도달할 때까지 산사태에서 토석류로 돌변하게 되었다. 특히 순간적으로 내려 밀린 토사와 석력은 계류에 들어와서, 또는 그전부터 토석류로 발전하여 계류의 황폐를 촉진시켰으며, 또 이것은 토석류 구간(B)을 벗어나면서 소류(掃流)구간(C)이 되어 하상에 토사가 퇴적하게 되었다(D). 토석류가 운반하는 최대입경은 계류의 지형, 지질조건, 토사 이동현상의 규모 및 차이 등에 따라 관계되지만 주로 모암의 성질에 따라 많은 영향을 받는 것으로 보인다. 토석류의 유하거

Table 2. Rainfall data in Mt. Seorak (AWS).

단위 : (mm)

Date	Seorak	Ohsaek	Solakdong	Misiryung	Jinburyung	Onetong	Inje	Amount of rainfall	Hourly rainfall
7. 12	93.5	91.5	105.5	70.5	63.5	145.5	176.5	746.5	31.5 (Solak-dong, Inje)
7. 13	11.5	15.5	1	0.5	1	7	8	44.5	4(Oh-Saek)
7. 14	79.5	44	68	67.5	34	51.5	63	407.5	31 (Solak-dong)
7. 15	264.0	90	157.5	123.5	112.5	28	202	977.5	108.5 (Solak-dong)
7. 16	97.0	0	63.5	63	64.5	0	130.5	418.5	16(Inje)
7. 17	11.0	0	30	35	45	0	175	296	3.5(Inje)
7. 18	54.5	0	48.5	52.5	44.5	31.5	52.5	284	20.5(Onetong)
7. 19	2.5	0	3.5	13.5	6.5	0	0	26	1.5(Misiryung)
7. 20	8.5	11.5	14	19	10.5	10.5	10.5	84.5	1.5(Misiryung)
Total	622.0	252.5	491.5	445	382	274	818	3284	

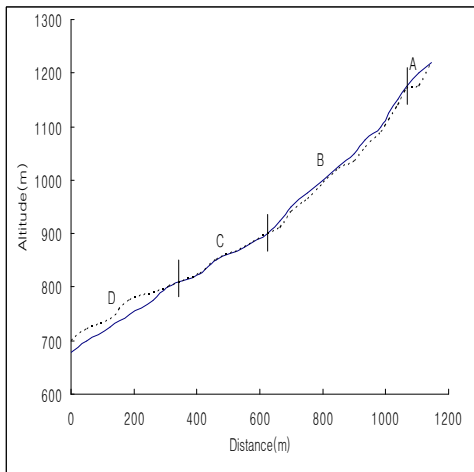


Figure 3. A schematic drawing of longitudinal torrent profile by debris flow.

Note) A : Landslide zone, B : Sediment production zone, C : Gorge zone, D : Sediment deposit zone.

리 및 퇴적구배에는 유량, 농도, 함유석력의 입경 및 지형 등의 인자가 작용하지만, 水源·武居 (1982)는 토석류 유하거리는 주로 1~2km 범위가 많다고 하였다. 이러한 유하거리의 예측은 유

출 토석량의 평가 및 사방계획을 수립하는데 주요한 지표가 될 수 있을 것이다. 계상은 평상시에 안정적인 상태로 되어 있어 하도의 변화는 없으나 호우 때는 유수의 증가로 인하여 토사석력은 운반, 퇴적되기 시작하고 유수는 난류상태로 되어 계류는 더욱 황폐화되기 시작한다(辰野 등, 1974). 특히 산지붕괴가 발생하여 상류유역으로부터 토석류가 되어 하류로 이동하게 되면 더욱 위험하게 된다. 토석류의 발생은 상류 곡두(谷頭) 부위에서 산지붕괴가 중요한 원인이라고 보고되고 있으나, 토석류는 파괴력이 강대하므로 직접 관찰할 기회를 얻는 것은 용이하지도 않고 실험하기도 아주 곤란한 현상이므로 과거부터 많은 추론이 있어 왔다(新谷, 1971; 大同, 1971; 山口 등, 1978; 清水, 1982).

지구온난화 등으로 인한 계절라성 집중호우로 일반 산림지역을 비롯한 국립공원 지역에서도 대규모의 산사태가 발생할 가능성이 점차 높아지고 있는 실정이다. 국립공원지역에서 발생한 산사태는 지형이 험준하고 사면길이가 길어 붕괴발생시

상대적으로 일반산지에 비하여 대규모 토석류로 발전하여 계곡이 암반으로 노출되는 특성을 보이고 있다. 이와 같이 국립공원내의 자연적인 산사태 발생 원인과 함께 국립공원의 특성상 인위적인 탐방에 의해 과거 정상부, 능선부의 야영 및 취사로 인해 발생한 훼손지 주변지역으로도 발생할 가능성이 높다.

그러나 이러한 훼손지내에 산사태가 발생하지 않은 것은 국립공원관리공단의 훼손지에 대한 체계적인 관리와 훼손지 복구 노력 등으로 산사태가 발생하지 않은 것으로 판단되며 향후 정상부, 능선부 및 기타 인위적인 훼손지점에 대한 자연친화적 복구는 지속적으로 필요한 것으로 판단된다.

2. 산림환경인자별 토석류 발생 빈도

국립공원에서 발생한 토석류지 125개소를 대상으로 산림환경인자별 토석류 발생 빈도를 분석한 결과는 그림 4와 같다. 사면경사도는 31~40° 지역에서 55개소(55%), 21~30° 지역에서 34개소(27%), 41~50°에서 18개소(14%), 51° 이상 지역에서 15개소(12%)가 발생하여 대부분 급경사지에서 발생빈도가 높은 것으로 조사되어 마호섭(1994, 2001)과 志水(1978)의 결과와 유사한 경향을 보였고, 동일 환경조건에서는 역학적 균형에 의하여 사면의 경사가 급할수록 위험하다고 하는 것은 자연사면의 특색을 잘 보여준 결과라고 보여 진다. 사면방위는 북쪽사면에서 59개소(47%)로 가장 많은 발생빈도를 보였고, 다음으로 남쪽사면 51개소(40%), 서쪽사면 10개소(8%), 동쪽사면 5개소(4%) 순으로 조사되었다. 마호섭(1994)과 국립공원관리공단(2001)이 산지붕괴 발생면적과 사면방위를 분석한 결과, 남서방향과 북동방향이 불안정하다고 한 보고와는 유사한 결과를 보였으나 Dyrness(1967)는 북서, 서쪽사면이 붕괴위험이 높다고 한 보고와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 강우의 진행 방향, 풍향 등에 따라 붕괴방향은 많이 달라지며,

서 및 남향사면이 붕괴하기 쉽다고 한다.

토석류 발생지점의 종단사면형은 오목사면에서 87개소(69%)로서 가장 높은 발생빈도를 보였고, 다음으로 볼록사면이 33(26%)를 보였다. 복합사면과 직선사면에서는 각각 4개소, 1개소의 발생빈도를 나타내어 비교적 급경사지로 구성되어 있는 산정부위의 토심이 얇은 곡두지점에서 많은 토석류 발생이 있었으며, 또한 산복 계간상의 암반을 기반으로 하여 붕괴발생빈도가 비교적 높게 나타났다. 志水(1977), 建設省土木研究所(1979), 長崎懸斜面對策危險度判定委員會(1985) 등은 평행사면에서도 발생빈도가 높다고 하였으며, 김경수 등(2005)은 평행사면의 산사태는 대체로 평탄사면의 약간 오목한 지형에서 전이형 슬라이드로 시작되어 토석류인 사태물질들이 주위의 계곡으로 흘러내리면서 유동성토석류로 변화되는 양상을 보인다고 보고하였다. 횡단사면형은 강우 발생시 지표에 도달한 유수가 집수되는 오목사면에서 105개소(84%), 볼록사면에서 12개소(10%)의 발생빈도를 보였고 직선사면과 복합사면에서는 각각 6개소와 2개소의 토석류가 발생한 것으로 조사되어 오목사면은 위험하고 직선사면 및 복합사면은 안전한 것으로 나타나 志水(1978) 및 長崎懸斜面對策危險度判定委員會(1985) 등의 결과와 유사한 경향을 보였다. 토석류가 발생한 곳의 표고는 낮은 지역에서부터 아주 높은 지역까지 분포하고 있다. 400m 이하에서는 7개소(5%)의 발생빈도를 보였고, 401~800m에서 32개소(25%), 801~1,200m에서 52개소(41%), 1,201m 이상에서 34개소(27%)의 토석류 발생빈도를 보였다. Dyrness(1967)는 690~780m에서, 細田(1980)는 50~150m에서도 발생빈도가 높았다고 하였는데, 본 조사구역인 국립공원은 비교적 표고가 높은 곳에 위치하고 있으므로 800m 이상의 산복 및 산정부위에서 토석류 발생빈도가 높고, 그 발생면적도 큰 것을 알 수 있다. 사면위치에 있어서는 산정에서 61개소(48%)의 토석류 발생빈도를 보였으며, 산복에서

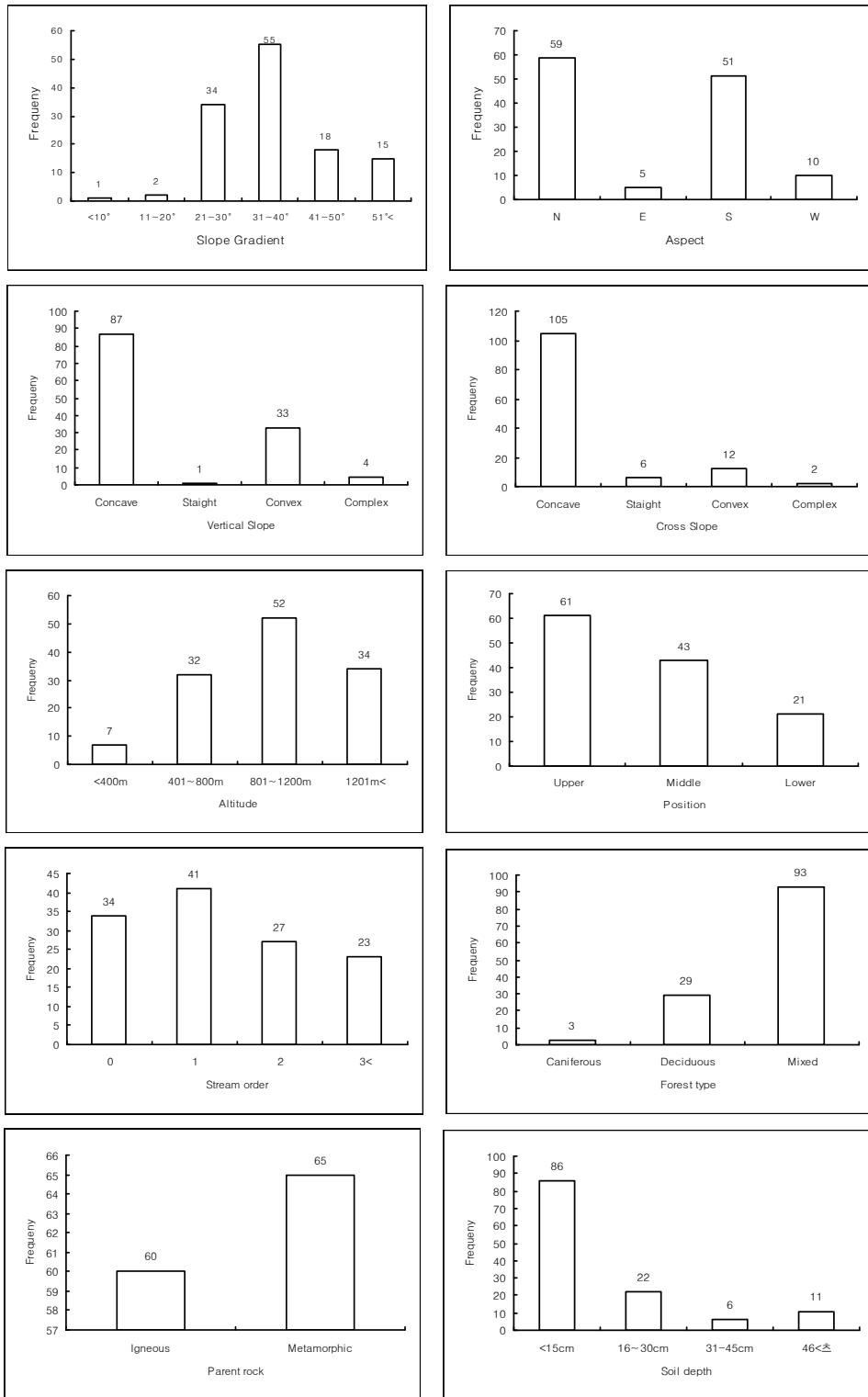


Figure 4. Occurrence frequency of debris flow by each factor in national parks.

는 43개소(34%), 산록은 21개소(17%)의 발생빈도를 보였다. 細田(1980) 및 마호섭과 정원옥(2007, 2008)은 산복, 산정 및 산록의 순으로 붕괴발생 면적 및 빈도가 높다고 하였으며, 국립공원 내에서도 사면 위치별 토석류 발생빈도는 산정 및 산복의 5부 능선 이상에서 주로 발생하고 있는 것으로 나타났다. 토석류 발생지의 하천차수는 산정 꼭두 부위인 1차수에서 41개소(33%)의 빈도를 보였으며, 0차수에서 34개소(27%), 2차 및 3차수는 각각 27개소(22%) 및 23개소(18%)의 발생빈도를 보였다. 1차수에서의 발생빈도가 높은 것은 대부분의 지표유거수가 산정부위의 꼭두에 용이하게 집수되어 하류의 계곡을 따라 빠르게 흘러내려가면서 토석류로 발전하였기 때문이다. 3차의 발생빈도가 낮아지는 것은 경사가 낮은 산복부위의 계안이나 계류의 저지대에 해당되기 때문인 것으로 보인다. 임상은 대부분 토사역지기능이 다른 임상에 비해 높은 혼효림지역에서 93개소(73%), 활엽수지점에서 29개소(23%), 침엽수지점은 3개소(2%) 순으로 나타났다. 이는 국립공원지역은 고산지대이므로 신갈나무 등의 참나무류가 성장하고 있는 활엽수지역과 침엽수 및 활엽수로 이루어진 혼효림지역이 대부분이기 때문에 토석류발생 면적 및 발생빈도가 높은 것으로 나타났다.

국립공원은 고산지역의 분포비율이 높아 모암은 주로 편마암, 화강편마암 및 화강암 등으로 구성되어 있어 토석류 발생지 125개소 중 변성암지역에서 65개소(48%), 화강암지역에서 60개소(52%)가 발생하였다. 일반적으로 화성암과 변성암은 생성시기가 오래 될수록 풍화정도가 깊어 토석류 발생빈도가 크며 반대로 퇴적암은 고화(固화)정도가 커서 토석류 발생빈도가 적으나 이들 암석과의 접촉부분에서 토석류가 많이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 토심과 토석류의 발생빈도는 토심 0~15cm에서 86개소(67%) 가장 많이 발생하였으며 토심이 깊어짐에 따라 발생빈도가 적은 것으로 나타나, 小橋 등(1972), 沖村과

杉本(1979)은 토심이 깊을수록 붕괴발생율이 적어진다는 보고결과와 동일한 결과를 나타내었다. 특히, 長崎縣斜面對策危險度判定委員會(1985)는 토심은 토질에 따라 차이가 나며 일반적으로 퇴적암 및 변성암은 얇고 심성암은 두꺼우며, 화성암은 중간 정도라고 하였는데 붕괴의 발생률이 높은 토심은 0.5~1.0m이고, 다음으로 0.5m 이하, 1.5m 이상 순이며 토심이 얇거나 두꺼워도 발생률은 낮다고 하였다.

이상의 결과를 볼 때 토석류 등 산지재해 발생은 경사, 표고, 방위, 모암, 토심, 사면위치, 사면형태 및 하천차수 등 지형 및 지질요인과 임상과 관련한 식생요인 등이 서로 복합적으로 관여하고 있음을 알 수 있다.

3. 퇴적토사량과 산림환경인자와의 상관성

토석류 발생에 따른 퇴적토사량과 산림환경인자와의 상관성을 분석한 결과(표 3), 퇴적토사량은 종단사면(복합), 활엽수림, 토심(46cm 이상)과는 1% 수준 내에서 정의 상관관계를 보였고, 종단사면(오목), 혼효림, 표고 801~1,200m은 1% 수준 내에서 부의 상관관계를 보였다. 그 외 경사 51° 이상, 사면방위(N, E), 종단사면(직선, 볼록), 횡단사면(직선, 볼록), 표고(400m 이하, 401~800m, 1,201m 이상), 산정, 산복, 하천차수(0차, 2차), 침엽수림, 변성암, 토심(31~45cm)등이 퇴적토사량에 정의 상관관계를 보였으나 상관성은 높지 않은 것으로 나타났다.

이러한 결과는 長崎縣斜面對策危險度判定委員會(1985)에서 산지사면의 붕괴면적 및 붕괴빈도를 조사한 결과, 서 및 남향사면에서 붕괴 발생빈도가 높게 나타났고, 마호섭(1994)은 임상요인에 있어서는 침엽수림과 활엽수림이 혼효림보다 토석류발생 면적 및 발생빈도가 크게 작용한다고 보고하였으며, 建設省土木研究所(1979) 및 志水(1977)는 침엽수림 및 활엽수림이 토석류 발생빈도가 높은 것으로 보고하였으나, 국립공원지역에서는 혼효림과 활엽수림에서 토석류 발생빈도

Table 3. Correlation analysis between sediment (m³) and environment factors.

Factors	Slope gradient(°)						Aspect			
	<10	11~20	21~30	31~40	41~50	51<	N	E	S	W
Sediment	0.053	0.050	0.021	-0.132	-0.014	0.156	0.138	0.013	-0.113	-0.059
Factors	Vertical slope				Cross slope					
	Concave	Straight	Convex	Complex	Concave	Straight	Convex	Complex		
Sediment	-0.251**	0.152	0.140	0.360**	-0.030	0.014	0.079	-0.078		
Factors	Altitude (m)				Position					
	<400	401~800	801~1200	1201<	Upper	Middle	Lower			
Sediment	0.145	0.032	-0.202*	0.118	0.063	0.037	-0.132			
Factors	Stream order				Forest type					
	0	1	2	3	Coniferous	Deciduous	Mixed			
Sediment	0.079	-0.009	0.042	-0.126	0.007	0.247**	-0.241**			
Factors	Parent rock			Soil depth (cm)						
	Igneous	Metamorphic		<15	16~30	31~45	46<			
Sediment	-0.137	0.137		-0.088	-0.108	0.019	0.279**			

가 높았다. 이는 고산지대의 자연식생이 침엽수림보다 혼효림과 활엽수림이 많이 자라고 있기 때문이며, 이들 임상 조건에 따라 토석류가 좌우된다는 것은 아니라 판단되며, 산림과 토석류발생과의 관계에서 遠藤·鶴田(1968), Baily et al.(1969), 駒村·渡邊(1977), Wu et al.(1979), Gray and Megahan(1981), Waldron and Dakessian(1982), O'Loughlin and Ziemer(1983), Trustrum et al.(1984) 및 강위평 등(1986)은 식생은 사면안정에 효과적이라고 하였다. Dyrness(1967)는 북서, 서방향이 붕괴위험이 높으며 일반적으로 사면붕괴는 강우의 진행방향, 풍향 등에 따라 붕괴 방향에 차이가 있다고 하여 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과는 대부분의 국립공원 토석류는 호우에 직접적인 영향을 받고 있는 국립공원의 지리적 특성 때문이라고 추정되었다. 특히, 국립공원 토석류 발생지는 지형이 험준하고 고산지대에서 발생한 산사태가 토석류로 발전하여 계곡으로 이어지는 경우가 많으므로 산지

상류유역 구간은 토석류재해로 인한 피해를 줄일 수 있도록 많은 노력이 필요한 것으로 생각된다.

따라서 토석류 대책으로 국립공원의 특성에 맞는 친환경 자재를 이용하여 자연과의 조화를 이루면서 유역 상류에서부터 버트리스, 슬리트 등 사방댐과 호안 붕괴 및 하상침식 방지를 위하여 야계공사를 계통적으로 실시하고, 인명과 재산상의 손실 등의 중대한 피해를 사전에 예방하기 위하여 토석류 등을 감시하는 카메라와 강수량 정보를 안내해 주는 시스템을 설치하여 운영할 필요성이 있다.

IV. 결 론

국립공원내 토석류 발생지 125개소를 대상으로 각 인자별 발생빈도 및 토석류 발생면적에 영향을 미치는 인자를 분석한 결과, 국립공원내에서 발생한 토석류의 평균 구간은 평균 144m, 평균 폭 20m 정도였으며 평균 발생면적은 2,854m²

로 나타났다. 국립공원지역에서 발생한 토석류는 지형 및 지세가 험준하고, 해발 1,000m 이상의 산정상부 급경사지이므로 비교적 토석류로 발전하는 경향이 높은 것으로 생각된다. 주요 토석류 발생 구간은 사면경사도 31~40°, 북쪽사면, 표고 801m 이상, 종단사면형은 오목사면, 횡단사면형은 오목사면, 임상은 혼효림, 모암은 변성암, 토심은 15cm 이하, 하천차수는 산정 꼭두부위의 1차수 지점에서 많이 발생하는 것으로 조사되었다. 토석류로 인한 퇴적토사량에 영향을 미치는 인자는 종단사면(복합), 활엽수림, 토심(46cm 이상)과는 1% 수준 내에서 정의 상관관계를 보였고, 종단사면(오목), 혼효림, 표고 801~1,200m 은 1% 수준 내에서 부의 상관관계를 보였다. 그 외 경사 51° 이상, 사면방위(N, E), 종단사면(직선, 블록), 횡단사면(직선, 블록), 표고(400m 이하, 401~800m, 1,201m 이상), 산정, 산복, 하천차수(0차, 2차), 침엽수림, 변성암, 토심(31~45cm) 등이 정의 상관관계를 보였으나 상관성은 높지 않은 것으로 나타났다. 국립공원지역도 주로 산정 및 산복이상의 고산지대에서는 토심이 깊어야 0.7m 이하로 표층활락형 및 복합형의 붕괴가 발생하고, 암반사면에서는 주로 절리형의 붕괴가 발생하며, 지형이 험준하고 자연경관이 수려한 고산지대에서 붕괴된 토사석력은 계곡을 따라 흘러 대규모 토석류로 발전하는 특성을 보이고 있다.

따라서 토석류 대책으로 국립공원의 특성에 맞게 자연친화적인 자재를 이용하여 자연과의 조화를 이루면서 유역 상류에서부터 버트리스, 슬리트 등 사방댐과 호안 붕괴 및 하상침식 방지를 위하여 야계공사를 계통적으로 실시하여 하류의 민가 및 농경지의 안전을 확보하여야 할 것이다. 또한 토사 재해 발생 시 인명과 재산상의 손실 등의 중대한 피해를 사전에 예방하기 위하여 토석류 등을 감시하는 카메라와 강수량 정보를 안내해 주는 시스템을 설치하여 운영할 필요성이 있다.

인 용 문 헌

- 국립공원관리공단. 2001. 국립공원 산사태지 복구대책 수립을 위한 조사. p.106.
- 국립공원관리공단. 2007. 호우에 의한 국립공원 산지재해 방지방안 연구. pp.47-96.
- 강위평 · 村井宏 · 大村寛 · 마호섭. 1986. 수량화(II)에 의한 산사태사면의 위험도판별. 한국임학회지 75 : 32-37.
- 강위평 · 마호섭 · 정모근. 1988. '87년 태풍 5호에 의한 경남지구의 산사태에 관한 연구. 한국임학회지 77(3) : 276-282.
- 김경수 · 김원영 · 채병곤 · 송영석 · 조용찬. 2005. 강우에 의해 발생된 자연사면 산사태의 지질공학적 분석. 대한지질공학회 15(2) : 105-121.
- 김원영 · 채병곤 · 김경수 · 기원서 · 조용찬 · 최영섭 · 이사로 · 이봉주. 2000. 산사태 예측 및 방지기술연구. 과학기술부 KR-00(T)-09.
- 마호섭. 1994. 산지사면의 붕괴위험도 예측모델의 개발 및 실용화 방안. 한국임학회지 83(2) : 175-190.
- 마호섭. 2001. 주요 국립공원의 산사태 발생특성과 복구방향. 국립공원 제27호 : 17-21.
- 마호섭 · 정원옥. 2007. 우리나라 국립공원지역의 산사태 발생특성 분석. 한국임학회지 96(6) : 611-619.
- 마호섭 · 정원옥. 2008. 국립공원의 산사태 발생 위험지역 예측기법의 개발. 한국임학회지 97(3) : 326-331.
- 산림청. 2004. 산지재해 원인과 복구대책. 산림청. p.121.
- 산림청. 2007. 산림재해 예방 및 복구대책. 산림청. p.64.
- 우충식 · 윤호중 · 이창우 · 정용호. 2008. 항공사진을 이용한 산지토사재해 영향인자 분석. 한국환경복원녹화기술학회지 11(1) : 14-22.
- 윤호중 · 이창우 · 정용호. 2007. 산림의 토사유

- 출 방지기능에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 10(1) : 36-43.
- 이수곤. 2002. 태풍 루사에 의한 피해현황 및 대책 방안(산사태). 한국수자원학회지 50(10) : 40-49.
- 이창우 · 우충식 · 윤호중 · 이친용 · 정용호. 2008. 토석류 피해범위 예측을 위한 Random Walk Model의 적용 및 검토. 한국임학회 하계학술연구발표회 334-326.
- 조용찬 · 채병곤 · 김원영 · 장태우. 2007년. 화강암질암지역 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모델의 수정 및 적용(강릉지역 대상으로). 자원환경지질 40(1) : 115-128.
- 채병곤 · 김원영 · 나중화 · 조용찬 · 김경수 · 이춘오. 2004a. 제3기 퇴적암 및 화산암 분포지의 산사태예측모델. 대한지질공학 14(4) : 443-450.
- 채병곤 · 김원영 · 조용찬 · 김경수 · 이춘오 · 최영섭. 2004b. 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀 모형 개발. 대한지질공학 14(2) : 211-222.
- 建設省土木研究所. 1979. 自然斜面の崩壊とその対策に關する調査研究報告(その1). 建設省土木研究所. p.136.
- 駒村富士 · 渡邊務夫. 1977. 樹木の斜面安定效果. 日林誌. 59 : 338-340.
- 大同淳之. 1971. 河狀縱斷形の變動 -土石流による變動- 新砂防 78 : 12-18.
- 山口伊佐夫 · 西尾邦彦 · 鈴木勇二. 1978. 土石流の發生機構に關する研究. 新砂防 107 : 18-24.
- 新谷 融. 1971. 荒廢溪流における土石移動に關する基礎的研究. 北大論研究 28(4) : 193-264.
- 細田 豊. 1980. 斜面長と斜面崩壊との關係. 91回日林論 437-438.
- 水原邦夫 · 武居有恒. 1982. 扇狀地における土砂災害の實態に關する研究 -主として土石流による土砂の流出と堆積の特性について- 京都府國立大研報 第34號 : 83-92.
- 小橋藤治 · 今正篤雄 · 久保村圭助 · 中山政一 · 眞砂祥之. 1972. 航空寫眞判讀による斜面的安全度解析-高山線の實施例- 新砂防 84 : 14-23.
- 志水俊夫. 1977. 花崗岩地帶の危險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. 崩壊の危險がある斜面的判定一その理論と手法一. 林業技術 439 : 23-26.
- 遠藤泰造 · 鶴田武雄. 1968. 土の抗張力にあえる根の補強作用ぬついて. 農林省林業試驗場 北海道支場年報 183-189.
- 長崎懸斜面對策危險度判定委員會. 1985. 長崎懸斜面對策危險度判定調査資料. p.75.
- 辰野良秋 · 堀内照夫 · 北澤秋司. 1974. 流域環境の變化と土石流災害について. 新砂防 93 : 13-18.
- 清水 宏. 1982. 溪流における砂防計劃手法に關する研究. 北大論研報 40(1) : 102-195.
- 沖村 孝 · 杉本 博. 1979. 統計的手法にとる自然斜面崩壊の研究. 土木學會論文報告集 290 : 89-97.
- Baily, R. G., and R. M. Rice. 1969. Soil slippage : An indicator of slope instability on chaparral watersheds of southern California. The professional Geographer, 3 : 172-177.
- Brand, E. W. 1985. Predicting the Performance of Residual Soil Slopes, Proc., 11th, ICSMFE, sanfrancisco, 2541-2573.
- Dyrness, C. T. 1967. Mass soil movements in the H. J. Andrews experimental forest. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station U.S. Department of Agriculture U.S. Forest Service. Research Paper. PNW-42 : 1-14.
- Gray, D. H., and W. F. Megahan. 1981. Forest Vegetation Removal and Slope stability in the Idaho Batholith, U. S. D. A. Forest Service Intermountain Forest and Range

- Experiment Station INT-27 : 1-25.
- O'Loughlin, C., and R. R. Ziemer 1983. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep land forest. NZFS reprint, 1570 : 70-78.
- Strahler, A. N. 1952. Dynamic Basis of Geomorphology. Geological Society of America, Bulletin, 63 : 923-938
- Trutrum, N. A., V. J. Thomas and G. B. Douglas. 1984. The impact of forest removal and subsequent mass-wasting on hill land pasture productivity. symposium effects of forest land use on erosion and Policy Institute East-West Center University of Hawaii Honolulu. Hawaii. p.308.
- Waldron, L. J., and S. Dakessian. 1982. Effect of grass, Legume and tree roots on Soil shearing resistance. Soil Sci. Am. J. 46 : 894-899.
- Wu, T. H., W. P. Mckinnell and D. N. Swanston. 1979. Strength of Tree Roots and Landslide on Prince of Wales Island, Alaska. Can. Geotech. J. 16 : 19-33.