

成熟林木伐採地에서 降雨水の 表面流出水量과 山地浸蝕에 미치는 環境要因의 影響¹

禹保命² · 朴在鉉² · 全起成² · 鄭道鉉³

Influences of Environmental Factors on Water Runoff and Hillslope Erosion in Timber Harvested Area¹

Bo - Myeong Woo², Jae - Hyeon Park², Gi - Seong Jeon² and Do - Hyun Jeong³

要 約

이 研究은 大規模 伐採地에서 降雨水の 表面流出水量과 山地浸蝕 및 土砂流出에 미치는 影響인자를 究明하고 이들 影響에 대한 低減 對策을 講究할 目的으로 白雲山 地區(서울대학교 농업생명과학대학 부속 남부연습림 제26임반)의 伐採林地(13ha)와 非伐採林地(13ha)에서 1993년부터 1994년까지 2개년 간 수행한 結果로서 다음과 같이 要約할 수 있다.

1. 降雨水の 表面流出水量은 단위강우량이 많아질수록 증가하였으며, 伐採 當該年度에는 伐採地가 非伐採地보다 28%가, 그 다음 해에는 24.5%가 많았다. 降雨水の 表面流出水量的 설명에 유의한 因子는 單位降雨量, 單位降雨횟수, 山地斜面 浸蝕量, 土壤의 容積密度 등 4個 因子이었으며, 이들 인자의 조합으로 이루어진 多重回歸式의 설명역은 91%이었다.
2. 山地斜面 浸蝕量은 伐採 當該年度에 伐採地에서는 4.77ton/ha/yr로 非伐採地(0.73ton/ha/yr)보다 7배 많았으며, 그 다음 해에는 1.0ton/ha/yr로 非伐採地(0.48ton/ha/yr)보다 2배 많았다.
3. 山地斜面 浸蝕量의 설명에 유의한 因子는 土壤의 容積密度, 降雨水の 表面流出水量, 單位降雨量 등 3個 因子이었으며, 이들 인자의 조합으로 이루어진 多重回歸式의 설명역은 약 74%이었는데 이들 인자는 인위적인 조절이 곤란한 인자로 解析되었다.
4. 山地 流域 밖으로 流出된 土砂量은 伐採 當該年度에 伐採地 流域에서는 山地斜面 浸蝕量의 최대 6.7%, 非伐採地 流域에서는 1%이었으며, 그 다음 해에는 伐採地 流域에서는 山地斜面 浸蝕量의 최대 5.7%, 非伐採地 流域에서는 1.9%이었다.

以上的 結果를 綜合해 볼 때 大規模 伐採計劃時에는 溪谷部 周邊에는 山地浸蝕 및 土砂流出抑止, 溪流水質保全 등을 위하여 樹林帶를 남기고 伐採하여야 할 것이다.

ABSTRACT

This research was conducted to investigate the influential factors of the runoff of water and hillslope erosion caused by the large-scale harvesting operation. It was carried out on harvested sites (13ha) and non-harvested sites (13ha) in Seoul National University Research Forest [(Mt.) Paekun-san], from 1993 to 1994.

1. The amount of runoff of water was increased as the unit of rainfall increases, and the amount of runoff on harvested sites was larger than that of non-harvested sites by 28% in the first year

¹ 接受 1995년 3월 21일 Received on March 20, 1995.

² 서울대학교 山林資源學科 Dept. of Forest Resources, Seoul Nat'l Univ. Suwon, Korea.

³ 林業研究院 Forest Research Institute, Pochon, Korea.

and 24.5% in the second year after harvesting. According to the multiple regression equation for surface runoff, unit and number of rainfall, amount of hillslope erosion and soil bulk density showed statistically significance($R^2=0.91$).

2. The amount of hillslope erosion on harvested sites was larger than that of non-harvested sites by 7 times during the first year of harvesting and 2 times during the second year.
3. The multiple regression equations for hillslope erosion showed that soil bulk density, surface runoff of water and unit of rainfall(these factors were not controllable) had statistically significance($R^2=0.74$).
4. Soil runoff in harvested and non-harvested sites were maximum 6.7% and 1% of the amount of hillslope erosion, respectively during the first year of harvesting. And the second year of harvesting soil runoff in harvested and non-harvested sites were maximum 5.7% and 1.9% of the amount of hillslope erosion.

From the above results, when in planning for timber harvesting, the buffer strip-woods zone must be remained to diminish soil and water runoff and to preserve water quality.

Key words : After harvesting, Soil and water runoff, Hillslope erosion, Buffer strip-woods zone

緒 論

伐期齡에 달한 林木을 伐採하거나 間伐을 통하여 수관층을 소개함으로써 형질이 우수한 임목을 육성할 수 있는 등 최소한의 伐採를 통한 개발과 이용은 지속적인 山林經營을 위하여 필수불가결한 요소이기도 하다. 이에 반하여 大規模 山林伐採는 山林의 各種 公益의 機能을 阻害하는 한 要因으로 作用하고, 土壤條件을 變化시키는 원인이 되고 있으며, 이는 山林生態系에 이익이 되기도 하지만 有害한 조건이 되는 부분이 크게 작용하고 있다. 이러한 伐採作業은 土壤硬化, 土壤攪亂, 土壤浸蝕 및 有機物 損失 등에 영향을 미치고 있을 뿐만 아니라 鳥類, 哺乳類, 土壤微小動物 등 山林構成種을 變化시키는 등 山林生態系에 많은 影響을 미치고 있다.

또한, 大規模 山林을 伐採하면 토양의 浸透率이 크게 변화하고, 일년생 식물 및 다년생 식물의 생육이 불량하게 되는 등 山林環境은 변화하게 되며(龜山章, 1976), 토양을 다져지게 하여 토양공극을 감소시키고 배수를 불량하게 함으로써 土壤表面流出水量과 土壤表面浸蝕을 가속화시킨다(Adams, 1991; Sidle, 1992).

이와 같이 浸蝕된 土砂는 山地 溪谷 周邊에 堆積되거나 계곡하류의 하천으로 流入되어 부영양화를 일으킴으로써 水系生態를 汚染시키고 水質을 악화하며, 나아가서는 溪谷水를 상수원으로 이용하는 주민들에게 有害影響을 미치는 원인이 되

기도 한다.

北田正憲 等(1989)은 대부분의 土壤浸蝕은 自然山地보다 伐採地와 林道, 運材路 등으로부터 발생하는 土砂流出이 심하여 山地保全에 문제가 발생되고 있다고 강조하였다. 특히 伐採地域에서 土壤浸蝕의 원인이 되는 부적당한 集材作業은 林道나 運材路로부터 발생되며(Fredriksen, 1970; Beasley 等, 1986), 이로 인하여 浸蝕된 土砂의 流出·堆積은 水質에 가장 큰 영향요인이라고 보고하였다(Vaughan, 1984).

山林伐採로 인한 流出 및 山地浸蝕에 관한 研究로 中野秀章(1971)는 伐採量에 따라서 流出量의 변화는 개별지역이 가장 크고, 다음으로는 택벌지역(50% 벌채), 소규모 均상개벌 지역의 順이었다고 報告하였으며, Weitzman(1952), Reinhart 等(1965), 谷誠과 阿部敏夫(1987), King(1989), Brown(1991), 金敬鎭과 全槿雨(1994) 등도 成熟林木收穫作業으로 山地에서의 表面流出水量은 增加한다고 報告하였다.

伐採方法에 따라서도 流出量은 變化하게 되는데 中野秀章(1971)는 皆伐에 의하여 년·계절의 유출량 및 저수유량은 증가하며 벌채후 1년차에 流出量이 가장 많이 증가하는데 개벌지에서는 草本植生の 발달로 시간이 경과할수록 流出量은 減少하며, 流出量이 伐採前의 상태로 回復되기 위하여는 약 16년이 경과한다고 報告하였다.

日本에서는 1938년부터 1978년까지의 수문자료를 이용하여 유역내의 山林伐採에 따른 流出量의 變化를 측정하였는데, 벌채 후 유출량은 현저하

게 증가하였으며, 벌채기간에는 무처리기간보다 약 23%의 流出量이 增加하였다(吉野昭一과 菊谷昭雄, 1985). 그리고 대조유역실험을 통하여 토양이 건조할 때에는 伐採前에 비하여 벌채후의 直接流量은 40% 增加하였고, 토양이 습윤할 때에는 伐採後의 流出增加가 소량이지만 벌채직후에는 洪水量이 30~40% 증가한다(Hewlett, 1984)고 報告하였다.

井上章二(1982)은 토양의 구성비에 따라 유출 토사실험을 실행한 결과 점성토가 많이 함유되어 있는 토양은 침식이 적고, 모래나 미사로 구성되어 있는 토양은 침식에 약하며, 마사토는 소립자의 경우가 流出土砂量이 增加한다고 報告하였다.

또한, 村井宏과 岩崎勇作(1975), 岩崎勇作 等(1982)은 流出土砂實驗을 개별로 인한 나지구, 임목구, 목초구로 구분하여 실험하였는데, 地表流量은 전체적으로 감소하였으나, 개별로 인한 나지구에서 流出土砂量이 가장 큰 값을 나타내었다. 그리고 流出土砂量은 매년 감소하는 경향을 보이며, 임목구에서의 表面流出量은 개별로 인한 나지구와 비교하여 현저한 차를 보여 樹林帶의 필요성을 강조하였다.

이와 같이 山林伐採로 인한 環境變化에 대하여 先進外國에서는 山地浸蝕 및 流出量의 變化, 土壤生産性의 變化, 野生動·植物의 變化, 植生の 遷移過程을 통한 將來의 植生構造分析, 土壤有機

物의 流出, 水文現象 等の 長期的이고도 지속적 인 環境모니터링 등의 연구를 통하여 環境을 保全하기 위한 노력이 끊임없이 이루어지고 있다 (Johnson 等, 1991).

그러나 우리나라에서 現在 실시되고 있는 대부분의 山林伐採는 이로 인한 環境影響을 충분히 고려하지 않고 시행하고 있어, 山林環境變化에 커다란 影響을 미치고 있는 실정에 있다. 따라서 이 研究는 大規模 伐採에 따른 環境影響中 降雨水의 表面流出水量과 山地浸蝕 및 土砂流出에 미치는 影響인자를 究明하고, 이들 影響에 대한 저감대책을 강구하는데 그 目的이 있다.

材料 및 方法

1. 降雨水의 表面流出水量

(1) 降雨水의 表面流出水量

降雨量은 研究對象地域인 伐採地에 普通雨量計를 설치하여 測定하였다. 伐採地와 非伐採地에서 降雨水의 表面流出水量은 浸蝕土砂收集裝置(너비 1m×길이 4m=4m²)(그림 1 참조)를 설치하여 강우시마다 집수통에 수집된 降雨水의 表面流出水量을 測定하였으며, 강우가 많아서 집수통의 물이 넘칠 경우를 대비하여 장마기인 6월말에서 8월말까지는 현장에서 1~2인이 거주하면서 降雨量 및 降雨水의 表面流出水量을 測定하였다.

(2) 降雨水의 表面流出水量에 影響을 미치는 要因分析

山地斜面의 表面流出水量에 影響을 미치는 중요한 因子인 토양깊이 0~7.5cm, 7.5~15cm의 土壤의 容積密度, 土壤硬度, 土壤中の 모래含有率, 植生被覆度, 山地斜面 浸蝕量 등 5종의 立地因子 및 單位降雨量, 累加降雨量, 單位降雨횟수, 累加降雨횟수, 土壤水分 등 5종의 環境因子에 대하여 SAS 통계 package를 이용하여 多重回歸分析하였다.

2. 非伐採地와 伐採地의 山地斜面 浸蝕

(1) 山地斜面 浸蝕 調査區의 特性

山地斜面 浸蝕量을 調査하기 위하여 伐採地와 非伐採地의 山地斜面에 各 3개의 浸蝕土砂收集裝置를 設置하였다. 山地斜面 浸蝕 調査區의 特性은 表 1에서와 같다.

山地斜面 浸蝕 調査區의 山地斜面 傾斜度는 非

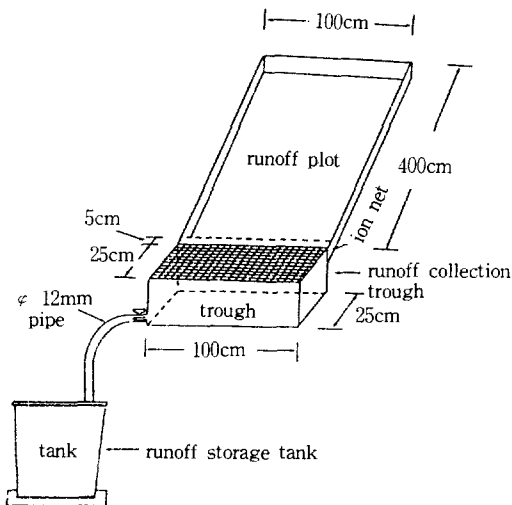


Fig. 1. Water- and -soil runoff collecting plot and trough in slope.

Table 1. Characteristics of the hillslope plots.

Variables	Value	
	Non - Harvested	Harvested
Gradient of hillslope(°)	27.5	27.5
Aspect of hillslope(°)	20.0~35.0	25.0~30.0
	SW 45°	NE 7°, 36°
	NW 5°, 40°	SW 5°
Soil hardness in 1993 (kg/cm ²)	0.50	1.00
	0.08~0.92	0.30~1.70
Soil hardness in 1994 (kg/cm ²)	0.51	0.91
	0.08~0.94	0.28~1.54
Coverage of ground vegetation in 1993(%)	33.2	14.7
	20.5~45.8	0.0~29.3
Coverage of ground vegetation in 1994(%)	35.3	74.9
	22.2~48.3	60.3~89.5
Proportion of sand(%) (0.02~2mm)	38.3	38.1
	29.7~46.9	26.4~49.7
Proportion of clay(%) (<0.002mm)	13.8	10.9
	11.8~15.8	8.4~13.4

伐採地, 伐採地 모두 27.5°(20.0°~35.0°)이었고, 方位는 非伐採地가 남서, 북서사면, 伐採地는 남서, 북동사면이었다.

山地斜面의 土壤硬度는 벌채 당해년도에는 非伐採地가 약 0.5(0.08~0.92)kg/cm², 伐採地가 1.0(0.30~1.70)kg/cm²이었으며, 그 다음 해에는 非伐採地가 0.51(0.08~0.94)kg/cm², 伐採地가 0.91(0.28~1.54)kg/cm²로 伐採地와 非伐採地의 土壤硬度의 變化는 작았다.

地被植生 被覆도는 벌채 당해년도에는 非伐採地가 약 33.2(20.5~45.8)%, 伐採地가 약 14.7(0~29.3)%이었으며, 그 다음 해에는 非伐採地가 35.3(22.2~48.3)%, 伐採地는 74.9(60.3~89.5)%로 伐採後 1年이 經過되면서 地被植生 被覆도는 非伐採地보다 높았다.

山地斜面의 土壤特性을 調査한 結果 非伐採地의 모래含有率은 약 38.3(29.7~46.9)%, 伐採地에서는 약 38.1(26.4~49.7)%이었다. 점토含有率은 非伐採地가 약 13.8(11.8~15.8)%, 伐採地가 10.9(8.4~13.4)%이었다.

(2) 非伐採地와 伐採地의 山地斜面 浸蝕量

山地斜面 浸蝕量은 非伐採地와 伐採地의 山地斜面에 가로×세로×높이(1m×25cm×25cm)의 浸蝕土砂收集裝置를 각기 3개소씩 총 6개소에 설치하였다. 그리고 주위의 산지로부터 침식되어 流入되는 土砂를 방지하는 철관(가로 110cm×세로 40cm×두께 1.5mm)을 山地斜面에 박아 固定 實驗區(가로 1m×세로 4m=4m²)를 設置하였다.

山地斜面 浸蝕土砂는 單位降雨後 收集하여, 수집된 토사는 實驗실에 가져와 3일간 풍건하고 이를 oven에서 48시간 건조한 후 건조량을 조사하여 單位面積當 浸蝕量으로 계산하였다. 降雨水의 表面流出水는 浸蝕土砂收集裝置의 좌측 하부에 호수(지름 12mm)로 연결한 유출수 집수통(20ℓ)에서 수집하였다. 浸蝕土砂收集裝置와 流出水收集桶의 模式圖는 그림 1에서와 같다.

(3) 山地斜面 浸蝕量에 影響을 미치는 要因 分析

山地斜面 浸蝕에 중요한 影響을 미치는 影響因子인 土壤의 容積密度, 土壤硬度, 土壤中の 모래

含有率, 植生被覆度 等 4種의 立地因子 및 降雨
횟수, 累加降雨횟수, 單位降雨量, 累加降雨量,
土壤水分, 降雨水의 表面流出水量 等 6種의 環境
因子에 대하여 SAS 통계 package를 이용하여
多重回歸分析하였다.

(4) 山地 溪流에서의 土砂流出量

土砂流出量은 非伐採地와 伐採地의 山地斜面
浸蝕에 의한 浸蝕土砂가 山地 溪流에 流入되어
山地 流域 밖으로 流出되는 양으로 非降雨時와
降雨時에 各 溪流에서 平常時 깊이가 10cm 이상
되는 各 流域의 5개 지점(총 10개 지점)을 채수
지점으로 선정하였다.

溪流 中心部에서 채수된 부유토사는 무게를 측
정한 거름종이에 걸러 건조시킨 후 전자식 정밀
저울로 무게를 측정하여 單位 當 浮遊土砂量으
로 계산하였다.

結果 및 考察

1. 伐採로 인한 環境變化가 降雨水의 表面流出
水量에 미치는 影響

(1) 降雨量

調査地域인 白雲山에 위치한 서울대학교 농업
생명과학대학 부속 남부연습림 畚谷管理所의 10
年間 月別 降雨量은 表 2에서와 같다.

研究對象地域에서 가까운 畚谷管理所에서 관측

된 10년간 平均降雨量은 우리나라의 年平均降雨
量(1,274mm)보다 약 34%가 많은 1,927.8mm이
었다. 특히, 장마와 태풍이 많은 6월에서 8월
까지의 降雨量은 연평균 강우량의 약 60%가
내려 이 기간동안에 강우가 집중됨을 알 수 있
다.

1993년과 1994년 研究對象地域의 月別 降雨量
은 表 3에서와 같다.

1993년의 總降雨量은 2,012.8mm로 최근 10年
동안의 平均降雨量과 類似한 結果(104.4%)를 나
타내었으며, 장마기간인 6월에서 8월까지의 강우
가 總降雨量의 약 74%로 降雨水의 대부분이 이
기간 중에 집중되었다. 이는 최근 10年 동안의
동기간 강우량의 약 126%로 비교적 많은 양이었
다. 또한, 이 기간 중에는 總 96회의 單位降雨가
있었으며, 降雨強度別 降雨頻度는 表 4에서와 같
다.

1994년에는 總 84회의 單位降雨가 내렸으며,
總降雨量은 1,588.3mm로 1993년에 내린 강우량
의 약 79%이었다. 이는 10년간 畚谷管理所의 平
均降雨量의 약 82%로 적은 강우량이었다. 장마
기간인 6월에서 8월까지 내린 강우는 1993년의
同期間 降雨量의 약 46%로 매우 적은 강우이었
는데 이는 태평양에서 발생한 엘니뇨 현상이 기
인한 가뭄 때문인 것으로 생각된다.

1993년에 내린 96회의 單位降雨中 40mm 이하

Table 2. Total rainfall from 1983 to 1992 at Dapkog of (Mt.) Paekunsan (unit : mm)

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
1983	12.0	24.5	83.3	248.0	83.4	64.0	521.6	117.9	224.5	45.5	35.5	0.3	1460.5
1984	0.0	8.0	5.0	186.0	77.0	179.7	531.5	604.0	247.4	22.4	37.0	18.0	1916.0
1985	0.0	34.0	118.0	60.0	238.0	470.7	250.0	748.0	399.0	203.0	52.0	43.0	2615.7
1986	0.0	3.0	58.0	66.0	122.0	361.0	249.0	333.0	193.0	103.0	11.0	67.0	1566.0
1987	67.0	53.0	36.0	151.6	119.0	241.0	767.0	604.0	77.0	75.5	56.0	0.0	2247.1
1988	15.0	13.5	91.3	189.0	141.0	176.0	387.0	252.0	42.0	2.0	2.0	7.0	1417.8
1989	120.0	60.0	110.0	47.0	98.0	376.0	1171.0	481.0	320.0	7.0	63.0	4.0	2857.0
1990	48.0	154.0	99.0	191.6	201.0	572.0	202.8	259.0	164.0	5.0	77.3	0.0	1973.7
1991	38.1	51.8	80.0	155.3	50.2	277.9	530.8	421.3	179.7	2.0	19.2	79.2	1876.5
1992	36.0	16.0	126.0	163.0	175.0	38.0	274.3	174.2	359.8	22.5	11.5	51.1	1447.4
Mean	33.6	41.8	80.7	145.8	130.5	275.6	488.5	398.5	220.6	48.8	36.5	27.0	1927.8

Table 3. Rainfall at the studied area from 1993 to 1994 (unit : mm)

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total	
Precip-itation	1993	66.3	57.0	64.0	43.0	131.3	392.6	307.8	770.2	132.2	33.5	90.6	24.3	2012.8
	1994	40.7	106.0	29.0	138.8	272.3	80.0	61.5	536.0	39.0	215.5	47.0	22.5	1588.3

Table 4. Frequency of rainfall intensity from 1993 to 1994.

Month	Rainfall(mm)												
	0.0 - 10.0	10.1 - 20.0	20.1 - 30.0	30.1 - 40.0	40.1 - 50.0	50.1 - 60.0	60.1 - 70.0	70.1 - 80.0	80.1 - 90.0	90.1 - 100	100.1 - 150	150.1 - 250	250.1 - 350
1993													
Jan.	5												
Feb.	3		2										
Mar.	2	2	1										
Apr.	2		1										
May	4	3	1		1				1				
Jun.	5	2	2		1				1		1		
Jul.	7	2	1		2	1				1			
Aug.	6	4		3	2	1			2	1			
Sep.	3	2											
Oct.	1			1									
Nov.	6	3		1									
Dec.	4	1											
Total	48	19	8	5	6	2			4	2	1		
%	83.3						16.7						
1994													
Jan.	3	1	1										
Feb.	2	2	1	1									
Mar.	7												
Apr.	10									1	1		
May	6		1	2		3						1	
Jun.	8	1	1										
Jul.	3	2	1									1	
Aug.	3	3	1	1		2						1	1
Sep.	3			1									
Oct.	4	1		1						1			
Nov.	1				1								
Dec.	2		1										
Total	52	10	7	6	1	5				2	4	1	
%	89.3						10.7						

의 강우는 總降雨頻度の 약 83%이었으며, 100 mm 이상의 강우는 약 17%이었다. 그러나, 1994년에는 84회의 단위강우중 40mm 이하의 降雨가 總降雨頻度の 약 89%이었다. 100mm 이상의 降雨는 약 11%이었으며, 이중 8월 10일에는 단위강우 304mm가 내려 조사기간중의 단위강우 중 가장 많은 강우가 내렸다.

또한, 1993년 조사기간중 100mm 이상의 강우는 장대기인 6월에서 8월사이에 集中되어 있는 반면, 1994년의 경우는 6월, 7월을 제외한 5월과 8월에 分布하였다.

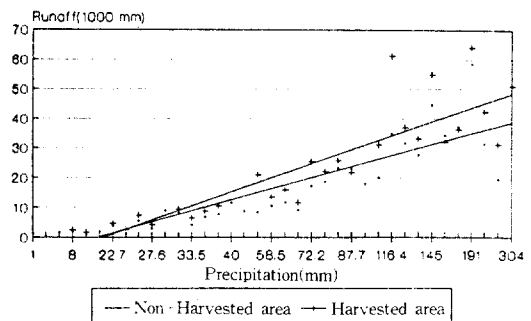


Fig. 2. Variations of runoff of water by unit of rainfall at studied sites

(2) 降雨水의 表面流出水量

① 非伐採地와 伐採地에서 降雨水의 表面流出水量

調査期間中 降雨量의 變化에 대한 降雨水의 表面流出水量의 變化는 그림 2에서와 같다.

降雨水의 表面流出水量은 非伐採地, 伐採地 모두 單位降雨量이 많아질수록 增加하였다. 伐採 當該年度에는 非伐採地와 伐採地에서의 平均 表面流出水量은 非伐採地가 69.041 l/m^2 , 伐採地가 88.394 l/m^2 로 伐採地가 非伐採地보다 28%가 많았다.

이는 植生의 제거로 수관에 의한 차단, 저류, 흡수이용 등에 의한 損失量이 작아 降雨水가 直接 土壤에 到達되고, 이 도달된 降雨水가 浸透·透水되면서 공극이 포화되면 그 이상 내린 降雨水는 대부분 土壤表面으로 流出되기 때문이다.

伐採後 1年 經過後인 1994년에 表面유출수량은 비벌채지에서는 49.798 l/m^2 로 伐採 當該年度보다 감소하였으며, 伐採地에서는 62.048 l/m^2 로 非伐採地보다 24.5%가 많았다.

이와 같이 伐採後 1年 經過後인 1994年の 降雨水의 表面流出水量은 伐採 當該年度보다 3.5%가 감소하였는데 이는 벌채 당해년도인 1993년 강우

보다 1994년의 강우량이 작았고, 벌채후 수목의 맹아생장 및 하층식생의 생장으로 강우가 지표면에 직접 닿아 유출되는 양이 감소하였기 때문이라 생각된다.

表面流出水量은 降雨量에 따라 달라지는데, 降雨量이 작을 경우에는 降雨의 대부분이 山地土壤에 浸透되고, 작은 강우라도 單位降雨가 계속적으로 내려 산지토양의 토양공극이 포화되어 있을 경우에는 강우가 山地土壤에 침투되는 양은 작고 대부분 土壤表面으로 流出되기 때문에 表面流出水量은 增加한다. 그러나 單位降雨가 계속적으로 내린 경우에는 비벌채지나, 벌채지에서는 서로 類似한 表面流出水量을 나타내었다.

이와 같이 單位降雨量의 증가에 따라 表面유출수량은 증가하였는데, 이를 직선회귀분석한 결과 降雨量의 變化에 따른 表面流出水量의 推定式은 非伐採地에서는, $Y=17.9633+176.2866 X(R^2=0.73)$ 이었으며, 벌채지에서는 $Y=27.4940+191.0641 X(R^2=0.64)$ 로 1% 수준에서 고도로 有意하였다. 이는 先行研究(Liberman, 1948; Likens, 1970; Hicks, 1991; Heede, 1991)와 類似한 결과이었다. 이때 Y는 降雨水의 表面流出水量을, X는 單位降雨量을 나타낸다.

Table 5. Correlation coefficients of influence factors affecting water runoff

	Amount of water runoff	Amount of soil runoff	Bulk density	Soil moisture	Soil hardness	Sum of number of rainfall	Unit of rainfall	Ratio of sand	number of rainfall	Sum of precipitation	Coverage
Amount of water runoff	1.0000										
Amount of soil runoff	0.5581*	1.0000									
Bulk density	0.3276	0.7149**	1.0000								
Soil moisture	0.1914	-0.0510	0.0237	1.0000							
Soil hardness	0.2149	0.2051	0.5476*	0.2727	1.0000						
Sum of number of rainfall	0.0531	0.2406	0.3357	0.7241**	0.5608*	1.0000					
Unit of rainfall	0.8925**	0.2584	0.1241	0.2324	-0.4151	-0.0612	1.0000				
Ratio of sand	0.2920	0.6799**	0.9872**	0.0442	0.5626*	0.2302	-0.0925	1.0000			
Number of rainfall	0.0548	0.2650	0.0871	0.2546	0.1325	0.1342	0.3499	0.0923	1.0000		
Sum of precipitation	0.0200	-0.0512	-0.0928	0.8246**	-0.4516*	0.9182*	-0.0902	0.0388	-0.2123	1.0000	
Coverage	-0.5421**	-0.6799**	-0.9872**	-0.0442	-0.5626*	-0.2302	0.0925	-1.0000	-0.0923	-0.0388	1.0000

Note : * means statistically significant at 5% level, ** stands for statistically significant at 1% level

② 降雨水의 表面流出水量에 影響을 미치는 要因 分析

山地斜面에서의 表面流出水量에 影響을 미치는 요인인 土壤의 容積密度, 土壤硬度, 土壤中の 포쇄含有率, 植生被覆度, 山地斜面 浸蝕量 等 5종의 立地因子 및 土壤水分, 單位降雨횟수, 累加降雨횟수, 單位降雨量, 累加降雨量 等 5종의 環境因子 等的 影響을 分析하기 위하여 SAS 통계 package 를 이용한 多重回歸分析結果는 表 5에서와 같다.

降雨水의 表面流出水量的 影響因子間의 多重回歸分析結果 單位降雨量이 增加함에 따라 表面流出水量은 增加하였으며, 이들간의 관계는 1% 수준에서 고도로 有意하였다. 또한, 山地斜面 浸蝕量과는 1% 수준에서 높은 상관을 나타내었다. 이들 각 인자간의 影響을 stepwise를 이용하여 分析한 結果는 表 6에서와 같다.

降雨水의 表面流出水量的 설명에 유의한 因子를 밝히기 위하여 stepwise를 이용한 多重回歸分析結果 表面流出水量에 影響을 미치는 중요한 인자는 單位降雨量, 單位降雨횟수, 山地斜面 浸蝕量, 土壤의 容積密度 等 4個 인자이었으며, 중상관계수는 0.9051로 고도로 有意하였다.

또한, 이들 因子의 설명역은 약 91%로 매우 높은 설명역을 나타내었다. 이를 多重回歸式으로 나타내면, 降雨水의 表面流出水量=5962.9662+23.6583 UR+10.5650 NR+25.1166 RS+5.9644

BD(R²=0.91)이었다. 이때, UR은 單位降雨量, NR은 單位降雨횟수, RS는 山地斜面 浸蝕量, BD는 土壤의 容積密度를 나타낸다.

이와 같이 單位降雨量이 많을수록 降雨水의 表面流出水量이 增加하는 것은 山地土壤에 浸透되어 포화시킬 수 있는 한정된 수분의 양보다 山地 表面을 따라 流出하는 잉여의 수분이 많아지며, 토양이 踏壓되어 경화되면 토양공극이 작아지고, 土壤水分을 함유할 수 있는 양이 작아지므로 상대적으로 土壤表面을 流出하는 降水量은 增加하기 때문인 것으로 생각된다.

③ 總降雨量에 대한 降雨水의 表面流出水量

總降雨量에 대한 降雨水의 表面流出水量은 表 7에서와 같다. 伐採 當該年度에 非伐採地에서의 總降雨量에 대한 降雨水의 表面流出水(地表流出水)는 3.4%이었으며, 伐採地는 4.3%로 非伐採地의 1.3배이었다. 벌채후 1년이 경과된 1994년에 總降雨量에 대한 降雨水의 表面流出水量은 非伐採地에서는 3.1%이었으며, 伐採地에서는 3.9%이었다.

이와 같이 벌채 當해년도보다 그 다음 해에 표면유출수량이 감소하는 것은 伐採後 1년이 경과되면서 최초로 벌채한 임목에서 萌芽 및 하층식생이 성장하여 수관에 의한 차단, 저류, 수목의 흡수이용 등에 의한 지표유출수의 감소에 기인한 결과라 생각된다.

Table 6. Multiple regression equations for water runoff.

Variables	Regression coefficient	Partial R ²	Model R ²	F	Significance
Constant	5962.9692				
Unit of rainfall	23.6583	0.7965	0.7965	74.3653	0.0001**
Number of rainfall	10.5650	0.0755	0.8720	10.6270	0.0043**
Amount of runoff of soil	25.1166	0.1149	0.9114	23.3580	0.0001**
Bulk density	5.9644	0.0330	0.9051	5.9169	0.0263*
Multi-R=0.9051					

Note : * stands for statistically indicates significant at 5% level, and ** means statistically significant at 1% level.

Table 7. Total rainfall and percentage of water runoff from harvested and non-harvested sites.

Year	Total rainfall (mm)	Average of water runoff(//m ²)		Percentage of water runoff(%)	
		N,H	H	N,H	H
1993	2,012.8	69.041	88.394	3.4	4.3
1994	1,588.3	49.798	62.048	3.1	3.9

Note : H means harvested site and N,H stands for non harvested site.

2. 伐採로 인한 環境變化가 山地斜面 浸蝕量에 미치는 影響

(1) 非伐採地와 伐採地의 山地斜面 浸蝕量

山地斜面 浸蝕量은 벌채 당해년도에 非伐採地에서는 0.73ton/ha/yr, 伐採地에서는 4.77ton/ha/yr이었으며, 그 다음 해에 非伐採地에서는 0.48ton/ha/yr, 伐採地에서는 1.0ton/ha/yr로 非伐採地보다 각각 7배, 2배 많았다.

강우기간인 6월에서 8월까지 伐採地에서의 산지사면 침식량은 벌채 당해년도에는 총 산지사면

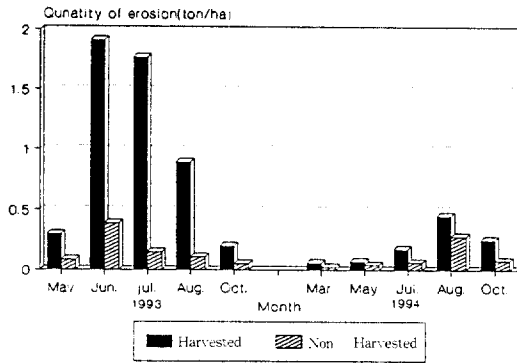


Fig. 3. Hillslope erosion of harvested and non-harvested in studied period

침식량의 90%이었으며, 그 다음 해에는 63%이었다. 비벌채지에서는 벌채 당해년도에 산지사면 침식량은 총 침식량의 83%, 그 다음 해에는 71%로 대부분의 산지사면 침식은 여름 강우기때 발생하였다. 벌채 당해년도와 그 다음 해에 조사된 산지사면 침식량은 그림 3에서와 같다.

이와 같이 伐採地의 山地斜面 浸蝕量은 시간이 경과함에 따라 減少하는 것은 山地表層部에 植生이 被覆됨으로써 植生에 의한 山地斜面 浸蝕을 抑止하였고, 1994년의 降雨量이 1993년에 비하여 적었기 때문이다. 조사기간중 山地斜面 浸蝕量은 伐採地가 非伐採地보다 약 4.3(2.1~6.5)배가 많았는데 이는 伐採作業에 의한 下層植生이 破壞되고 토양이 교란되어 山林의 土壤浸蝕調節作用(Kostadinov와 Mitrovic, 1994)이 阻害되었기 때문인 것으로 思料된다.

(2) 山地斜面 浸蝕量에 影響을 미치는 要因 分析

山地斜面 浸蝕量에 影響을 미치는 중요한 要因인 土壤의 容積密度, 土壤中の 모래含有率, 植生 被覆度, 土壤硬度 等 4종의 立地因子 및 土壤水分, 單位降雨量, 累加降雨量, 降雨횟수, 累加降雨횟수 그리고 降雨水의 表面流出水量 等 6종의

Table 8. Correlation coefficients of influence factors at surface soil runoff.

	Amount of soil runoff	Bulk density	Soil moisture	Soil hardness	Sum of number of rainfall	Unit of rainfall	Ratio of sand	Number of rainfall	Sum of precipitation	Coverage	Amount of water runoff
Amount of soil runoff	1.0000										
Bulk density	0.7149**	1.0000									
Soil moisture	-0.0510	0.0237	1.0000								
Soil hardness	0.2051	0.5476*	0.2727	1.0000							
Sum of number of rainfall	0.2406	0.3357	0.7241**	0.5608*	1.0000						
Unit of rainfall	0.2584	0.1241	0.2324	-0.4151	-0.0612	1.0000					
Ratio of sand	0.6799**	0.9872**	0.0442	0.5626*	0.2902	-0.0925	1.0000				
Number of rainfall	0.2650	0.0871	0.2546	0.1325	0.1342	0.3499	0.0923	1.0000			
Sum of precipitation	-0.0512	-0.0928	0.8246**	-0.4516	0.9182**	-0.0902	0.0388	-0.2123	1.0000		
Coverage	-0.6799**	-0.9872**	-0.0442	-0.5626*	-0.2902	0.0925	-1.0000	-0.0923	-0.0388	1.0000	
Amount of water runoff	0.5581*	0.3276	0.1914	0.2149	0.0531	0.8925**	0.2920	0.0548	0.0200	-0.5421**	1.0000

Note : * means statistically significant at 5% level, ** stands for statistically significant at 1% level

環境因子에 대하여 SAS 통계 package를 이용한 多重回歸分析 結果는 表 8에서와 같다.

各 立地因子 및 環境因子 等の 多重回歸分析 結果 山地斜面 浸蝕量과 土壤의 容積密度, 土壤中의 모래含有率, 調査區의 位置는 1% 수준에서 高도로 有意하였다. 또한, 山地斜面 浸蝕量과 降雨水의 表面流出水量은 1% 수준에서 高도로 有意하였으며, 이는 伏見知道 等(1982), 鋼本皓二(1992) 等の 報告와 類似하였다.

降雨水의 表面流出水量이 增加할수록 山地斜面 浸蝕量은 增加하였는데 이는 伐採作業에 따른 土壤踏壓으로 토양내 공극이 작아지고 견밀화되어, 강우가 토양표면으로 유출됨으로써 토양의 면상 침식이 확대되었기 때문이다.

土壤의 容積密度와 土壤硬度, 모래함유율과 土壤의 容積密度, 非伐採地와 伐採地의 山地斜面

浸蝕量, 累加降雨횟수와 土壤水分, 單位降雨量과 降雨水의 表面流出水量은 相關分析結果 1% 수준에서 高도로 有意하였다. 또한, 降雨水의 表面流出水量과 山地斜面 浸蝕量은 1% 수준에서 高도로 有意하였으며, stepwise 方法을 이용한 多重回歸分析 結果는 表 9에서와 같다.

山地斜面 浸蝕量의 설명에 유의한 因子를 밝히기 위하여 stepwise 方法을 이용한 多重回歸分析 結果 山地斜面 浸蝕量에 영향을 미치는 重要한 인자는 土壤의 容積密度, 降雨水의 表面流出水量, 單位降雨量 等 3個 因子이었으며, 調整판계수는 0.7417로 高도로 有意하였다.

이를 多重回歸式으로 나타내면, 山地斜面 浸蝕量=988.4415+22.0885 BD+14.6914 WR+7.6478 UR($R^2=0.74$)이었다. 이때, BD는 土壤의 容積密度, WR은 降雨水의 表面流出水量, UR은 單

Table 9. Multiple regression equations for hillslope erosion.

Variables	Regression coefficient	Partial R ²	Model R ²	F	Significance
Constant	988.4415				
Bulk density	22.0885	0.5110	0.5110	10.8551	0.0002**
Amount of water runoff	14.6914	0.1176	0.6285	5.6969	0.0282*
Unit of rainfall	7.6478	0.1131	0.7417	7.4458	0.0143*
Multi-R=0.7417					

Note : * means statistically significant at 5% level and ** means statistically significant at 1% level.

Table 10. Amount of soil erosion in hillslope, sediment and soil runoff in the study sites.

[unit : ton/ha/yr(%)]

Year	Distribution		Amount of hill slope erosion	Amount of sediment	Amount of soil runoff
1993	Case of runoff coefficient 1	Harvested	4.77(100)	4.452(93.3)	0.318(6.7)
		Non-Harvested	0.73(100)	0.723(99.0)	0.007(1.0)
	Case of runoff coefficient 0.4	Harvested	4.77(100)	4.643(97.3)	0.127(2.7)
		Non-Harvested	0.73(100)	0.727(99.6)	0.003(0.4)
1994	Case of runoff coefficient 1	Harvested	1.000(100)	0.943(94.3)	0.057(5.7)
		Non-Harvested	0.480(100)	0.471(98.1)	0.009(1.9)
	Case of runoff coefficient 0.4	Harvested	1.000(100)	0.977(97.7)	0.023(2.3)
		Non-Harvested	0.480(100)	0.477(99.4)	0.003(0.6)

位降雨量을 나타낸다.

(3) 成熟林木收穫伐採로 인한 山地 溪流에 서의 流出土砂量

山地斜面에서 降雨에 의하여 浸蝕된 土砂는 山地斜面이나 山地 溪流 부근에 堆積되고, 일부는 山地 流域 밖으로 유출되는데, 流域 밖으로 流出된 流出土砂量은 表 10에서와 같다.

벌채지 유역에서는 벌채 당해년도에 강수량이 모두 유출된다고 가정하였을 때 流出土砂量은 0.318ton/ha/yr이었으며, 이는 山地斜面 浸蝕量의 6.7%이었다. 그러나 流出係數 0.4를 適用하여 算定한 流出土砂量은 0.127ton/ha/yr로 이는 山地斜面 浸蝕量의 2.7%이었다.

강우수가 모두 유출된다고 가정하였을 때와 유출계수 0.4를 適用하였을 경우 山地斜面에서 浸蝕되어 山地 流域 밖으로 流出된 土砂量은 4%의 차가 발생하였다. 非伐採地 流域에서는 강우수가 모두 유출된다고 가정하였을 때 유출된 流出土砂量은 0.007ton/ha/yr로, 이는 山地斜面 浸蝕量의 1.0%이었다. 流出係數를 0.4로 適用하였을 경우 流出土砂量은 0.003ton/ha/yr로, 이 양은 山地斜面 浸蝕量의 0.4%이었다.

이와 같이 伐採當該 伐採地의 山地斜面에서 침식되어 山地 流域 밖으로 流出되는 流出土砂量은 非伐採地보다 약 44(42~45)배로 많았다.

伐採後 1年 經過된 1994년에 流出土砂量은 伐採地 流域에서 강우수가 모두 유출된다고 가정하였을 때는 0.057ton/ha/yr로 이는 山地斜面 浸蝕量의 5.7%이었다. 또한, 流出係數 0.4를 適用하였을 경우에는 0.023ton/ha/yr로 이는 山地斜面 浸蝕量의 2.3%이었다. 非伐採地 流域에서는 강우수가 모두 유출된다고 가정하였을 때 流出土砂量은 0.009ton/ha/yr로 이는 山地斜面 浸蝕量의 1.9%이었으며, 流出係數 0.4를 適用하였을 경우에는 0.003ton/ha/yr로 이는 山地斜面 浸蝕量의 0.6%이었다.

伐採後 1年 經過後에 발생된 流出土砂量은 伐採地가 非伐採地보다 약 7(6~8)배로 많았다. 伐採地에서의 流出土砂量이 非伐採地보다 많은 것은 伐採地에서는 土壤表層을 被覆하는 地被植生 및 上層植生이 제거됨으로써 降雨에 의한 遮斷, 貯留 등의 기작이 파괴되어 山地斜面 浸蝕이 비벌채지보다 增加하였기 때문이다.

또한, 伐採後 1年 經過後에 伐採地에서의 流出

土砂量은 伐採 當該年度보다 감소하였는데 이는 伐採後 1年이 경과되면서 수목의 맹아가 성장하고, 어린 나무나 草本植生 등 下層植生이 발달하여, 이들 식생에 의한 浸蝕土砂의 억지, 그리고 가뭄에 의한 강수량의 감소에 기인한 결과라 생각된다.

結 論

이 研究는 大規模 伐採에 따른 降雨水의 表面流出水量과 山地浸蝕 및 土砂流出에 미치는 영향을 究明할 目的으로 白雲山 地域(서울대학교 농업생명과학대학 부속 남부연습림 제26임탄) 伐採林地(13ha)과 非伐採林地(13ha)에서 1993년부터 1994년까지 2개년간 수행한 결과 降雨水의 表面流出水量은 單位降雨量이 많아질수록 증가하였으며, 降雨水의 表面流出水量的 설명에 유의한 因子는 單位降雨量, 單位降雨횟수, 山地斜面 浸蝕量, 土壤의 容積密度 등 4個 因子이었다.

山地斜面 浸蝕量은 伐採 當該年度에 伐採地에서는 4.77ton/ha/yr로 非伐採地(0.73ton/ha/yr)보다 7배, 그 다음 해에는 1.0ton/ha/yr로 非伐採地(0.48ton/ha/yr)보다 2배 많았으며, 山地斜面 浸蝕量의 說明에 유의한 因子는 土壤의 容積密度, 降雨水의 表面流出水量, 單位降雨量 등 3個 因子이었다.

또한, 土砂流出量은 伐採 當該年度에 伐採地 流域에서는 山地斜面 浸蝕量의 최대 6.7%, 非伐採地 流域에서는 1%이었으며, 그 다음 해에는 伐採地 流域에서는 山地斜面 浸蝕量의 최대 5.7%, 非伐採地 流域에서는 1.9%가 山地 流域 밖으로 流出된 것으로 解析되었다. 따라서 大規模 伐採計劃時 山地斜面에서 침식되어 유출되는 토사를 억지하고, 이로 인한 溪流 水質保全을 위하여는 溪谷部 周邊에 樹林帶를 남기고 伐採하여야 할 것이다.

引用文獻

1. 權台鎬. 1987. 道路構造 및 立地要因이 林道의 路面浸蝕에 미치는 影響에 關한 研究, 서울大學校 博士學位論文. 39p.
2. 金敬鎮·全權雨. 1994. 林道開設에 따른 浮遊土砂量 變化(I) - 對照流域法을 中心으로

- . 江原大 森林科學研報 10:57-65.
3. 中野秀章, 1971. 森林伐採および伐跡地の植被變化が流出に及ぼす影響, 林試研報 240:1-251.
 4. 村井 宏・岩崎勇作, 1975. 林地の水および土壌保全機能に関する研究(第1報)-地床かく亂が土地表流下, 浸透および浸蝕に及ぼす影響と林地の保全策-, 林試研報 274:1-23.
 5. 鋼本皓二・木村正信・永島清・村岡弘章, 1992. 林木の土砂流出防止効果について, 岐阜大學農學部演習林研報 2:42-53.
 6. 吉野昭一・菊谷昭雄, 1985. 高海拔流域における森林伐採と暖候期間の流出量變化-第1報-寶川試験地の本流域について(寶川森林治水試験第4回報告), 林試研報 331:127-145.
 7. 井上章二, 1982. マサ土ノリ面の表面侵食に及ぼす粒度分布の影響について(I)-地表流下水量と流出土砂量の経時變化-, 第93回日林講:419-420.
 8. 岩崎勇作・村井宏・石井正典, 1982. ラインメタによる地被別の水土流出実験(II)-林木・牧草および裸地區の流出量と土壤水分の比較, 第93回日林講:431-434.
 9. 鄭道鉉, 1989. 林道構造 및 立地要因이 側溝浸蝕에 미치는 影響에 關한 研究, 서울大學校 碩士學位論文, 37p.
 10. 鄭道鉉, 1994. 林道構造 및 降雨特性이 土壤浸蝕 및 土砂流出에 미치는 影響 -白雲山地區의 新設林道を 對象으로-, 서울大學校 博士學位論文, 110p.
 11. 伏見知道・藤久正文・尾上清利, 1982. 花崗岩風化土地域の林道土工構造物表面の浸蝕について(II)-モデル路面での雨水流出と浸蝕, 愛媛大演習林報告 19:13-19.
 12. 龜山 章, 1976. 林道建設による周邊植生への影響-總說-, 應用生態學會誌 5:75-93.
 13. 北田正憲・竹内美次・北田健二, 1989. トラクタ集材による攪亂が林地に及ぼす影響, 第100回日林講:653-654.
 14. 谷誠・阿部敏夫, 1987. 森林變化に及ぼす影響の流出モデルによる評價, 林試研報 342:41-60.
 15. Beasley, R.S., A.B. Granillo and V. Zillmer, 1986. Sediment losses from forest management : Mechanical versus chemical site preparation after clearcutting. *Journal of Environmental Quality* 15:413-416.
 16. Brown, G.W. 1991. *Forestry and water quality*, O.S.U. second edition, 142p.
 17. Fredriksen, R.L. 1970. Erosion and sedimentation following road construction and timber harvest on unstable soils in three small Oregon watersheds. USDA Forest Serv. Research Paper PNW 104, 15p.
 18. Heede, B.H. 1991. Response of a stream in disequilibrium to timber harvest. *Environmental management* 15(2):251-255.
 19. Hicks, B.J., R.L. Beschta and R.D. Harr, 1991. Long-term changes in streamflow following logging in Western Oregon and associated fisheries implications. *Water resources bulletin* 27(2):217-226.
 20. Hewlett, J.D. 1984. Forest, flood and erosion - A watershed experiment in the South eastern piedmont -. *Forest Science* 30:424-434.
 21. Johnson, C.E., A.H. Johnson and T.G. Siccama, 1991. Whole-tree clearcutting effects on exchangeable cations and soil acidity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:502-508.
 22. King, J.G. 1989. Streamflow responses to road building and harvesting: A comparison with the equivalent clearcut area procedure. U.S Department of Agriculture Forest service research paper INT-401:1-14.
 23. Kostadinov, S.C. and S.S. Mitrovic, 1994. Effect of forest cover on the stream flow from small watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 49(4):382-386.
 24. Liberman, J.A. and M.D. Hoover, 1948. The effect of uncontrolled logging on stream turbidity. *Water and Sewage Works* 95(7):255-258.
 25. Likens, G.E., F.H. Bormany, N.M. Johnson, D.W. Fishers and R.S. Pierce, 1970. Erosion of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard

- Brook watershed - ecosystem. Ecological Monographs 40(1) : 24 - 46.
26. Reinhart, K.G. and A.R. Eschner. 1965. Effect of streamflow of four different forest practices in Allegheny Mountains. J. Geophys. Res., 67(6) : 2433 - 2445.
27. Sidle, R.C. 1992. A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. Water resources research 28(7) : 1898 - 1910.
28. Vaughan, L. 1984. Logging and the environment. N.Z. Logging Industry Research Association. 73p.
29. Weitzman, S. and G.R. Trimble Jr. 1952. Skid road erosion can be reduced. Journal of Soil and Water Conservation 7 : 122 - 124.