

## 산불 피해지 토양침식량의 장기적인 변화에 관한 연구

마호섭<sup>1</sup> · 정원옥<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 환경산림과학부(농업생명과학연구원),

<sup>2</sup>국립공원관리공단 국립공원연구원

## Long-Term Change of the Amount of Soil Erosion in Forest Fire

Ho-Seop Ma<sup>1</sup> and Won-Ok Jeong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Environment Forest Science, Gyeongsang Nat'l Univ.,  
Jinju 660-701, Korea (Insti. of Agri. Llife Science)

<sup>2</sup>National Park Research Institute, Namwon 590-811, Korea

**요 약:** 산불 발생 후 시간경과에 따른 산불피해지의 토양침식량의 변화과정 및 환경인자와의 관계를 비피해지와 비교분석하였다. 산불발생 후 시간경과에 따른 토양침식량은 산불 당해연도 11.2배, 1년경과 후 8.4배, 5년경과 후 2배, 10년경과 후에는 1.3배 정도 산불피해지가 비피해지 보다 더 많은 침식량을 보였다. 산불피해지의 토양침식량은 10년경과 후 산불 발생 당해연도와 비교하여 98% 정도 감소하여 산불발생 후 10년이 경과하면 산불피해지의 토양침식량은 비피해지와 거의 같은 수준으로 회복이 이루어지는 것으로 조사되었다. 산불피해지 및 비피해지의 토양침식량에 직접적인 영향을 미치는 인자는 단위강우량, 단위강우횟수, 누적강우횟수 등 강우인자가 중요한 영향 인자로 분석되었다.

**Abstract:** The purpose of this study was to evaluate the change of the amount of soil erosion by comparisons between burned and unburned area after forest fire. The amount of soil erosion in burned area was more high 11.2 times in year of fire, 8.4 times in 1 later year, 2 times in 5 later year and 1.3 times in 10 later year than in unburned area. The ratio of soil erosion in burned area was reduced to 98% of 10 later year as compared to the year of fire. Therefore, the soil erosion in the burned area almost tended to stabilization like unburned area passing ten year after forest fire. The most affecting factors on the amount of soil erosion in burned and unburned area were unit rainfall, number of unit rainfall and number of rainfall accumulated.

**Key words :** forest fire, burned area, unburned area, soil erosion

### 서 론

산림면적이 전 국토의 약 64%를 차지하는 우리나라는 여러 가지 교란요인들로 인해 산림생태계가 파괴되어 가고 있다. 특히 산불은 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 산림생태계 교란요인 중의 하나로서 4~5월 사이에 자주 발생하는데 그 원인으로는 봄철 건조한 기후와 사람에게 의한 실화 때문인 것으로 알려져 있다. 산불로 인한 하층식생 및 낙엽층의 소실로 나지화된 산지는 태양의 직사광선과 바람의 영향을 직접 받기 때문에 표토가 건조해져서 단단해지고 강수의 영향으로 입단구조가 파괴되어 토양미생물을 줄이거나 활동을 저해시키는 등 토

양의 물리·화학적 변화를 초래하여 토양의 생산성을 악화시키기도 한다(우보명과 이현호, 1989; Jeong *et al.*, 1992). 또한 중 조성을 변화시켜 임상 자체가 바뀌기도 하고, 복구되지 않는 산불피해지는 산림경관미를 크게 해치기도 한다. 특히 최근 빈번하게 발생하고 있는 산불은 점차 대형화 추세에 있으며, 막대한 재산과 인명에 피해를 줄 뿐만 아니라 수목 고사에 의한 나지화로 인한 수자원 함양기능의 악화와 토사유출의 급격한 증가, 홍수, 산사태 등 2차적인 재해를 유발하는 원인을 제공하고 있다(Adams and Andrus, 1991; 임업연구원, 1996; 恩田 등, 1997; 정원옥과 마호섭, 2001; 박상덕 등, 2002). 이러한 현상은 산불이 산지의 식생을 감소시켜 사면의 토양에 가해지는 강우에너지와 유수의 토양침식에너지를 증가시키기 때문이다(Hibbert, 1985; Andreu

\*Corresponding author  
E-mail: wonokjung@knps.or.kr

et al., 2001) 식생구조의 발달과 밀접한 관련이 있으며 (국립방재연구소, 2002; 2003), 산불피해지의 토사유출량은 산불발생 후 1~2년 사이에 가장 많이 발생하며, 3년 후부터는 안정화되므로 토사유출 방지를 위해서는 조기 복구가 요구된다고 하였다(이창우 등, 2004).

따라서 본 연구는 산불 발생 후 시간경과에 따른 산불 피해지의 토양침식량의 변화과정 및 환경인자와의 관계를 비피해지와 비교분석함으로써 산불피해지역의 토양보전에 관한 기초 자료를 제공하고자 수행하였다.

### 재료 및 방법

#### 1. 조사지 개황

산불피해지는 경남 진주시 명석면 용산리 일대로 1996년도에 지표화 및 수관화가 발생한 표고 20~200 m 이하의 낮은 야산지대이다. 조사대상지는 산불로 인하여 식생이 모두 소실되어 나지화된 상태였으나 10년이 경과한 현재는 초본 및 관목류의 침입으로 식생피복도는 70% 정도이고, 비피해지는 20~25년생의 소나무림과 하층식생에 의해 식생피복도가 90% 이상을 유지하고 있다. 산불피해지와 비피해지는 퇴적암지역으로 A층은 사질양토, B층은 사질식양토로 구성되어 있다(Table 1).

**Table 1. Characteristics of soil erosion plots in the surveyed area.**

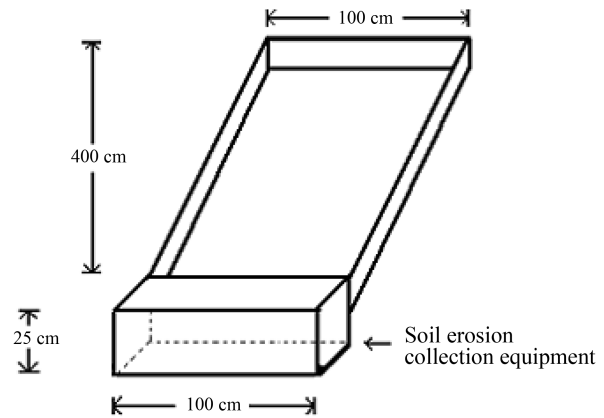
Variables	Burned area	Unburned area
Gradient of hillside (°)	25 21~30	25 22~29
Aspect of hillside (°)	N 6°, 8°, 15°W N 45°, 65°E	N 5°, 19°, 25°E S 40°, 50°E
Soil hardness (kg/cm <sup>2</sup> )	2.34 1.50~2.67	2.40 2.20~2.70

#### 2. 연구방법

##### 1) 토양침식량 측정

산불피해지와 비피해지에 침식토사 수집 장치(가로 100 cm가첩(± 25 cm× 높이 25 cm)를 각각 5개소씩 총 10개소를 설치하고, 주위의 산지로부터 침식에 의해 유입되는 토사를 방지하는 함판(가로 100 cm×세로 400 cm×두께 2.5 mm)을 산지사면에 박아 고정 실험구(4 m<sup>2</sup>)를 설치하였다(Figure 1).

토양침식량은 산불발생 당해연도(1996년), 1년(1997년), 5년(2001년), 10년(2006년) 경과 시점을 대상으로 단위강우 후 침식토사 수집 장치 내에 퇴적된 토사를 수집하여 Dry oven에서 48시간 건조한 후 건조량을 측정하여 단위면적당 토양침식량으로 하였다.



**Figure 1. The equipment collecting the soil in hillside.**

##### 2) 통계분석

산불피해지와 비피해지에서 측정된 토양침식량에 영향을 미치는 인자를 분석하기 위해 상관분석 및 단계별 회귀분석을 실시하였으며, 통계분석은 통계 package SPSS program을 이용하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 토양침식량의 변화

산불발생 후 시간경과(당해년도, 1년, 5년, 10년)에 따른

**Table 2. Amount of soil erosion in the burned and unburned area.**

Year	Month	Total rainfall (mm)	Amount of soil erosion (g/m <sup>2</sup> )	
			Burned	Unburned
1996	May	69.9	334.00	24.75
	June	291.4	241.50	22.40
	July	164.6	74.75	9.50
	August	108.1	58.2	6.50
	Total	634.0	708.50	63.15
1997	May	164.9	397.65	44.50
	June	228.1	178.65	17.75
	July	393.2	172.00	21.75
	August	222.3	67.30	13.00
	Total	1,008.5	815.60	97.00
2001	May	41.8	14.55	6.90
	June	323.5	72.14	33.64
	July	266.6	41.32	21.59
	August	137.1	14.40	8.50
	Total	769	142.41	70.64
2006	May	284.5	85.92	53.20
	June	268.6	27.40	23.10
	July	630.9	61.83	53.00
	August	106.6	6.93	5.97
	Total	1,290.6	182.07	135.27

산불 피해지의 토양침식량에 대한 변화과정을 비피해지와 비교분석한 결과는 Table 2와 같다.

산불 발생 당해연도인 1996년도 5월에 월강우량에 대한 산지사면 토양침식량은 산불피해지가 334.0 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 24.75 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지가 13.5배 정도 많은 양을 보였다. 이는 산불로 인한 토양교란으로 토양 표면이 완전히 굳어지지 않은 상태에서 강우로 인한 토양공극의 포화상태가 비피해지보다 빠르게 진행되어 표면유출수가 증가하면서 산지사면의 토양침식을 가속화 시켰기 때문으로 판단된다. 시간이 경과할수록 조사지역의 토양침식량은 모두 감소하는 경향을 보였으며 4개월 동안의 침식량은 산불피해지가 708.50 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 63.15 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지가 비피해지보다 11.2배 정도 많은 양을 보여 산불이 산림식생을 고사시켜 표토의 수분흡수능을 저하시키고 산지사면 토양에 가해지는 강우에너지와 유수의 토양침식 에너지를 증가시켜 토양침식량이 증가하는 것으로 판단되었다(Hibbert, 1985; 恩田 등, 1997; Andreu *et al.*, 2001). 산불 발생 후 1년이 경과한 1997년도 5월에 발생한 침식량은 산불피해지가 397.65 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 44.50 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지가 9배 정도 많은 양을 보였으나 시간이 경과할수록 두 지역 모두 감소하는 경향을 보였으며 4개월 동안의 토양침식량은 산불피해지가 815.60 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 97.0 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지에서 8.4배 정도 많은 침식량을 보였다. 산불 발생 후 5년이 경과한 2001년 조사에서 총강우량에 대한 토양침식량은 산불피해지가 142.41 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 70.64 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지가 비피해지보다 약 2배 정도 많은 토양침식량을 보였고, 10년이 경과한 2006년도에는 산불피해지에서 182.07 g/m<sup>2</sup>, 비피해지에서 135.27 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지가 비피해지보다 1.3배 정도 많은 토양침식이 발생한 것으로 조사되었다. 특히 산불 발생 당해연도인 1996년도, 1997년도, 2001년도, 2006년도의 각 5월에 산불피해지에서 월강우량에 대한 토양침식량이 다른 조사시점보다 많이 발생한 것은 하층식생의 불완전 조성과 동결융해작용으로 겨울철 지표면의 토양 입자가 동결과 융해를 반복하면서 상호응집력을 상실하고 분리된 상태에서 강우가 직접적으로 지표면에 도달하면서 토양침식을 가속화시킨 것이 주요 원인으로 판단되었다.

산불 발생 당해연도에 산불피해지에서 총강우량에 대한 토양침식률은 산불피해지가 111.8%, 비피해지가 10.0%로 산불피해지가 11.2배 정도 많은 침식률을 보였다(Figure 2).

산불 발생 후 1년이 경과한 1997년도에 산불피해지의 토양침식률은 80.9%, 비피해지는 9.6%로 8.4배 정도, 5년이 경과한 2001년도에는 산불피해지가 18.5%, 비피해지가 9.2%로 2배 정도, 산불 발생 후 10년이 경과한 2006년도의 총강우량에 대한 토양침식률은 산불피해지가 14.1%, 비피해지가 10.5%로 약 1.3배 정도 비피해지보다 산불피해

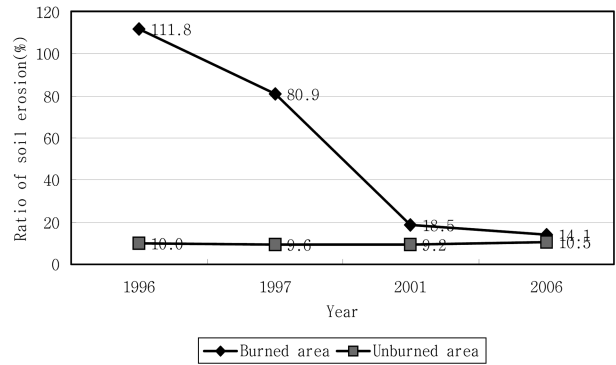


Figure 2. The change of the ratio of soil erosion by site.

지에서 많은 토양이 유출되는 것으로 조사되었다. 그러나 산불피해지의 토양침식률은 산불 당해연도인 1996년도에 111.8%에서 10년이 경과한 2006년도에는 14.1%로 약 98%정도 감소한 것으로 조사되었다. 이는 시간이 경과할수록 하층식생 및 목본류의 성장으로 인한 식생피복도의 증가로 지면에 직접 도달된 강우의 양이 감소하여 토양공극을 포화시키는 속도가 느리고 강우에 의한 토양마찰과 햇볕에 의한 건조로 토양 입자간의 응집력이 증가한 결과로 판단되었다(국립방재연구소, 2002; 2003; 박상덕 등, 2005). 따라서 산불피해지의 토양침식량은 산불 발생 후 10년이 경과하면 하층식생의 성장, 토양환경 조건의 변화 등으로 비피해지와 비슷한 수준의 토양침식량을 보이며 산불 발생 이전의 상태까지 회복이 이루어지는 것으로 판단되었다. 이창우 등(2004)은 토사유출량은 산불 발생 후 1~2년 사이에 많이 발생하며, 3년 후부터는 안정화된다고 하였고, 박상덕 등(2005)은 산불피해의 정도가 클수록 산지사면이 안정화되고 식생이 회복되는데 더 오랜 시일이 필요하고 산불 발생 연도에 따른 토양침식 민감도의 변화에서 산불 발생 후 5년이 경과하면 토양침식민감도의 변화가 적어 안정적인 범위 이내로 접어드는 것이 확인되었다고 하였다.

Table 3. Correlation coefficient of variables on soil erosion in burned and unburned area.

Variables	Soil erosion	
	Burned area	Unburned area
Surface runoff	0.6321**	0.6071**
Bulk density	-0.2102	-0.2453
Soil hardness	-0.1925	-0.2781
Coverage	-0.4068*	-0.3965*
Soil moisture	0.1571	0.2247
Number of unit rainfall	0.5741**	0.6218**
Number of rainfall accumulated	0.2411	0.3797*
Unit rainfall	0.3655*	0.6051**
Accumulated rainfall	0.1609	0.2760
Sand content	0.3733*	0.3876*

**Table 4. Stepwise regression analysis of soil erosion in burned area.**

Variables	Regression coefficient	Partial R <sup>2</sup>	Model R <sup>2</sup>	F	Significance
Constant	-1565.2769				
Unit rainfall	0.0539	0.4311	0.4311	43.67	0.0001
Surface runoff	-35.0075	0.2667	0.6978	9.83	0.0002
Coverage	175.3901	0.1106	0.8084	5.88	0.0187

**Table 5. Stepwise regression analysis of soil erosion in unburned area.**

Variables	Regression coefficient	Partial R <sup>2</sup>	Model R <sup>2</sup>	F	Significance
Constant	176.2390				
Number of unit rainfall	41.9238	0.4341	0.4341	19.01	0.0001
Number of rainfall accumulated	-21.5466	0.1772	0.6113	10.84	0.0062
Unit rainfall	7.3175	0.1309	0.7422	8.53	0.0115
Surface runoff	5.3561	0.1011	0.8433	4.74	0.0354

## 2. 환경인자와의 관계분석

산불피해지와 비피해지에서 발생한 토양침식량에 영향을 미치는 인자를 분석하기 위해 상관분석 및 단계별회귀분석을 실시한 결과는 Table 3, 4 및 5와 같다.

산불피해지 및 비피해지의 토양침식량은 표면유출수량, 단위강우횟수, 누적강우횟수, 단위강우량, 모래함유량과는 정의 상관관계를, 식생피복도와는 부의 상관관계를 보여(Table 3), 산불피해지 및 비피해지에서 발생하는 토양침식량은 강우 인자에 직접적인 영향을 받는 것으로 분석되었다(村井과 岩崎, 1975; 岩崎 등, 1982; 이현호와 주재덕, 2006). 그러나 식생피복도와는 부의 상관관계를 나타내어 지피식생이 강우에 의한 토양침식을 억제하는데 효과가 있는 것으로 분석되었다. 따라서 산불피해지는 산불로 인한 수목 고사로 강우가 지표면에 직접 도달하여 토양침식 현상을 가속화시키므로 토사유출로 인한 피해 방지 및 토양보전을 위해서는 조기 복구를 통한 식생도입이 필요한 것으로 판단된다.

단계별회귀분석 결과(Table 4, 5) 산불피해지 및 비피해지의 토양침식량에 직접적인 영향을 미치는 인자는 단위강우량, 단위강우횟수, 누적강우횟수 등 강우인자가 중요한 영향 인자로 분석되었다(Krag *et al.*, 1986; 박상덕 등, 2005).

산불은 피해정도에 따라 병해충 발생, 산불 재발생 가능성, 산불 피해목의 벌채 및 하류 수생생물의 보호 등에 대한 의사결정에 많은 영향을 미칠 수 있으므로 산불 발생 후 피해지에 대한 산림생태계 관리가 매우 중요하다(Mazza, R., 2007). 특히, 산불발생 후 나지화 된 불안정한 산림토양은 산불발생 초기에는 적은 강우에도 토양의 포화상태가 가속화되어 지표수에 의한 토양침식량이 일반 산림지역에 비해 증가하므로 토사유출량 저감을 위한 사방시설물의 도입과 조기에 식생녹화를 유도하는 등 대책마련이 필요하며, 또한 산불발생 후 시간경과에 따른 산

지사면 토양침식량의 변화과정에 대한 지속적인 모니터링을 수행하여 산불피해지의 토양안정 및 식생성장에 대한 장기적인 연구도 필요할 것으로 생각된다.

## 결론

산불 발생 후 시간경과에 따른 산불피해지의 토양침식량의 변화과정을 비피해지와 비교분석하고 토양침식량에 영향을 미치는 인자를 구명하기 위해 본 연구를 수행하였다.

산불발생 당해연도 총강우량에 대한 토양침식량은 산불피해지가 708.50 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 63.15 g/m<sup>2</sup>으로 산불피해지가 11.2배 정도, 산불발생 1년 후에는 산불피해지가 815.60 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 97.00 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지에서 8.4배 정도, 산불발생 5년 후에는 산불피해지가 142.41 g/m<sup>2</sup>, 비피해지가 70.64g/m<sup>2</sup>로 산불피해지가 2배 정도, 10년 경과한 2006년도에는 산불피해지에서 182.07 g/m<sup>2</sup>, 비피해지에서 135.27 g/m<sup>2</sup>로 산불피해지가 비피해지보다 1.3배 정도 많은 토양침식량을 보였다. 특히 산불발생 당해연도인 1996년도, 1997년도, 2001년도, 2006년도의 각 5월에 산불피해지에서 월강우량에 대한 토양침식량이 다른 조사시점보다 많이 발생하였는데 이는 하층식생의 불완전 조성과 겨울철 지표면의 토양 입자가 동결과 융해를 반복하면서 상호응집력을 상실하고 분리된 상태에서 강우가 직접적으로 지표면에 도달하면서 토양침식을 가속화시킨 것이 주요 원인으로 판단되었다.

산불피해지의 총강우량에 대한 토양침식률은 당해연도인 1996년도에 111.8%에서 2006년도에 14.1%로 98%정도 감소한 것으로 조사되었다. 이는 시간경과에 따른 식생피복도의 증가로 지면에 직접 도달하는 강우량의 감소로 토양공극을 포화시키는 속도가 느리고, 강우에 의한 토양마찰과 햇볕에 의한 건조로 토양 입자간의 응집력이 증가한 결과로, 산불피해지의 토양침식량은 산불발생 후 10

년이 경과하면 하층식생의 성장, 토양환경 조건의 변화 등으로 비피해지와 비슷한 수준의 토양침식량을 보이며 산불발생 이전의 상태까지 회복이 이루어지는 것으로 판단되었다.

통계적 분석 결과, 산불피해지 및 비피해지의 토양침식량에 직접적인 영향을 미치는 인자는 단위강우량, 단위강우횟수, 누적강우횟수 등 강우인자가 중요한 영향 인자로 분석되었고 식생피복도는 토양침식을 억제하는 역할을 하는 것으로 조사되었다.

산불발생 후 나지화된 불안정한 산림토양은 산불발생 초기에는 적은 강우에도 토양의 포화상태가 가속화되어 지표수에 의한 토양침식량이 일반 산림지역에 비해 증가하므로 토사유출량 저감을 위한 사방시설물 도입 및 식생피복 유도 등 대책마련이 필요할 것으로 판단되며, 산불발생 후 시간경과에 따른 산지사면 토양침식량의 변화과정에 대한 지속적인 모니터링은 향후 산불피해지의 토양보전 방안 수립시 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

## 인용문헌

1. 국립방재연구소. 2002. 산불로 가중되는 재해요인 저감 대책. 65-94.
2. 국립방재연구소. 2003. 산지지역 우수 및 토사유출량 관측 및 저감대책 수립. 29-91.
3. 박상덕, 신승숙, 심관섭. 2002. 산불지역 토사유출에 대한 와지의 기능에 관한 연구. 국립방재연구소 4(1): 121-130.
4. 박상덕, 신승숙, 이규송. 2005. 산불지역의 유출 및 토양 침식 민감도. 한국수자원학회지 38(1): 59-71.
5. 李昶雨, 李天龍, 金在憲, 尹豪重, 崔敬. 2004. 高城 산불被害地의 土砂流出 特性. 한국임학회지 93(3): 198-204.
6. 李憲浩, 朱在德. 2006. 인공강우장치를 이용한 산불발생지의 지표유출 특성에 관한 연구. 한국임학회지 95(3): 350-257.
7. 우보명, 이현호. 1989. 황폐산지에서의 산불이 산림식생 및 토양에 미치는 영향에 관한 연구(IV). 한국임학회지 78: 302-313.
8. 임업연구원. 1996. 고성 산불지역 생태조사 결과보고서. 산림청 임업연구원. 169p.
9. 정원옥, 마호섭. 2001. 산불발생지의 표면유출수와 토양 침식량에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 4(3): 1-9.
10. 岩崎勇作, 村井 宏, 石井正典. 1982. ライシメタによる地被別の水土流出試験(II) - 林木 牧草および裸地部の流出量と土壤水分の比較 - 日林構 93: 431-434.
11. 恩田裕一, D. Berkeley and L. Collins. 1997. 山火事後の表面流發生と土壤侵蝕. 平成9年度砂防學會研究發表會概要集 168-169.
12. 村井 宏, 岩崎勇作. 1975. 林地の水および土壤保全機能に関する研究 - 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.
13. Adams, P.W. and C.W. Andrus. 1991. Planning timber harvesting operations to reduce soil water problem in humid tropic steep lands. Proceedings forest harvesting in southern asia. 24-31.
14. Andreu, V., Imeson, A.C. and Rubio, J.L. 2001. Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. CATENA. Elsevier Science B.V. 80-82.
15. Hibbert, A.R. 1985. Storm runoff and sediment production after wildfire in Chaparral. In Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest, AWRA: Las Vegas, NV. 31-42.
16. Jeong, Y.H., Watahiki, S.K. Kim., H. Nakao and K. Takeshita. 1992. Study of the recovery characteristics of vegetation and the effect of topographical and soil factors in devastated forest land. Journal of Faculty Agriculture, Kyushu University. 36: 279-300.
17. Krag, P., K. Higinbotham and R. Rothwell. 1986. Logging and soil disturbance in southeast British Columbia. Canadian Journal of Forestry Research. 16: 1345-1354.
18. Mazza, R. 2007. Managing forest after fire. Science Update 15 USDA Pacific Northwest Research Station. 12p.

(2008년 1월 14일 접수, 2008년 7월 2일 채택)