

지상 LiDAR 공간분석을 통한 산불·산사태 피해 계류의 연간 토사유입량 산정

Estimating of Annual Sediment Yield at Mountain Stream in Fire/landslide Damaged Forest by using Terrestrial LiDAR Spatial Analysis

서준표* · 이창우** · 김동엽*** · 우충식****

Seo, Junpyo*, Lee, Changwoo**, Kim, Dongyeob***, and Woo, Choongshik****

Abstract

This study was conducted to be used as basic data showing the importance of early rehabilitation and management methods in forests devastated by forestfire and landslide. To this end, sediment yield was quantitatively compared in forestfire and landslide-damaged forests and non-damaged forests. We selected a total of four research areas including fire-damaged forest and its undamaged control group I, and landslide-damaged forest and its undamaged control group II. Then, scanned the areas for five years by using terrestrial LiDAR. The result shows fire-damaged forest recorded 5.11m³ of sediment yield per hectare, while its control group(Control I) recording 1.22m³ per hectare. Three years after the fire and after wards, sediment yield started declining. In the landslide-affected area, 8.41m³ of soil was inflow per hectare while its control group(Control II) recorded 4.79m³ of sediment yield per hectare. In other words, sediment yield in fire-hit forest was approximately 4.2 times larger than its control group I and that of landslide-damaged forest around 1.8 times larger than its control group II. In devastated forests, early rehabilitation or management works are crucial to prevent secondary damage which soil erosion may bring about.

Key words : Forestfire-damaged, Landslide-damaged, Sediment yield, Terrestrial LiDAR, Spatial analysis

요 지

본 연구는 지상 LiDAR 측량을 통하여 산불 및 산사태피해지와 일반산지의 연간 토사유입량을 정량적으로 비교하여 산림훼손지의 조기복구 중요성 및 관리방안에 대한 기초자료를 제공하고자 수행하였다. 연구대상지는 산불·산사태피해지 및 각각의 대조구 등 4개소를 선정하여 5년간 지상 LiDAR 촬영을 하였다. 분석결과, 산불피해지에서는 전체 토사유입량 5.11m³/ha, Control I 1.22m³/ha로 나타났고, 산불피해 3년 후부터 토사유입량이 감소하였다. 산사태피해지에서는 전체 토사유입량 8.41m³/ha, Control II 4.79m³/ha로 나타났다. 산불 및 산사태피해지에서는 대조구보다 각각 약 4.2배, 약 1.8배 더 많은 토사가 유입되었다. 산림훼손지에서는 유입토사가 많아짐에 따라 토사유입으로 인한 2차 피해 방지를 위한 조기복구 등의 관리가 중요한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 산불피해지, 산사태피해지, 토사유입량, 지상라이다, 공간분석

*정회원, ¹국립산림과학원 산림방재연구과 석사연구원, ²영남대학교 산림자원학과 박사과정(E-mail: seojunpyo@korea.kr)
Member, ¹Assistant Researcher, Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

²The doctor's course, Yeungnam University, Department of Forest Resources

**정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 임업연구원

Member, Senior Researcher, Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

***정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 임업연구사

Member, Research Scientist, Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

****교신저자, 정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 임업연구사(Tel: +82-2-961-2684, Fax: +82-2-961-2699, E-mail: woocs@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Research Scientist, Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

1. 서 론

산림이 전국토의 60% 이상을 차지하는 우리나라는 매년 산림재해로 인한 피해가 발생하고 있다. 산림에서 발생하는 대규모 피해는 산불과 산사태로 인한 피해가 대표적인데, 특히 계절풍의 영향으로 건조하고 바람이 많이 부는 봄철에는 산불피해가 심각하고, 강우가 집중되는 여름철에는 산지 토사재해가 많이 발생한다.

우리나라 산불피해는 최근 5년간(2011년~2015년) 연평균 274건, 피해면적 429ha이고, 2016년 봄에는 311건, 211ha의 산림피해를 초래했다. 산사태 연평균 피해 면적은 80년대 231ha, 90년대 349ha, 00년대 713ha로 피해 면적이 증가하고 있는 실정이다(Korea Forest Service, 2013). 산림재해는 그 자체로 인한 수목, 식생, 토양, 수질 등의 산림공익기능을 저해할 뿐만 아니라 토사유출로 인한 하류의 농경지 및 민가에 2차 피해를 가중시킬 수 있다(Yuichi, 1997; Johansen *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2004). 이러한 산림 훼손지의 물리적·생태적 상태를 고려하여 종합적인 복구 및 복원 방안의 필요성이 제기되고 있다(Seo *et al.*, 2010).

우리나라에서 산림훼손지에 시행하고 있는 사방사업은 산지사방사업, 계류보전사업, 사방댐 설치사업 등을 실시하여 산지 및 계류에 식생을 도입하고, 구조물 설치로 인한 토사유출 방지 및 녹화를 목적으로 하고 있다. 재해피해를 입은 산지에서는 긴급 복구를 실시하는데 피해지의 유출가능 토석량을 고려하지 않고 있다. 또한 산림재해 피해지의 토사유출량에 대한 장기간의 정량적인 자료가 부족한 실정이다(Lee *et al.*, 2014).

미국의 경우에는 산불피해지 복구를 3가지로 구분하여 관리하는데, 첫째는 긴급안정화 단계, 둘째는 복구단계, 셋째는 복원단계로 구분하고 있다(GAO, 2006; Robichaud *et al.*, 2010). 또한 장소에 따른 산불피해지 복구를 위해 지표, 계류, 임도 등에 적합한 복구공법 매뉴얼이 있어 다양한

산불피해 유형에 활용되고 있다(USDA, 2006). 특히, 산불피해지의 수문 및 토사유출 영향을 고려하여 토양에 대한 발수성과 침투 특성까지 평가하여 복구 계획을 세우고 있다(Robichaud *et al.*, 2008).

우리나라에서도 산림재해 종류별·유형별 등 복구대상지의 다양한 물리적·환경적 영향을 고려한 과학적인 산림재해 복구 매뉴얼이 필요한 실정이다.

산림재해 피해지의 복구계획 등 산지 측량에는 자동레벨, 광파측거의, 토탈스테이션, GPS 등의 측량장비를 주로 이용해 왔지만, 본 연구에서는 정밀한 데이터를 쉽게 획득할 수 있고, 토석류 발생량 및 침식과 퇴적양 등의 해석에 많이 이용되고 있는 지상 LiDAR 장비를 사용하였다(Milan *et al.*, 2007; Jun *et al.*, 2010; Jun *et al.*, 2014). 지상 LiDAR 장비는 사방댐 대수면에 퇴적되는 토사유입량을 정량적으로 산정하는데 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 변위산출을 효율적으로 할 수 있는 지상 LiDAR 장비를 이용하여 산불 및 산사태 피해계류와 일반산지의 사방댐에 퇴적되는 토사유입량을 연단위로 산정하고, 이를 근거로 산림훼손지의 조기복구 및 사방사업의 중요성에 대한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상지

연구대상지는 2009년 407ha 피해를 입은 칠곡 산불피해지와 2008년 102ha 피해를 입은 봉화 산사태피해지내 사방댐 시공 계류로 선정하였다. 또한 일반산지와와의 비교를 위해서 동일한 지역내 재해이력이 없는 일반산지를 대조구역(Control I, II)으로 선정하여 모니터링 하였다(Fig 1). 연구대상지의 기본 유역개황은 Table 1과 같다.

Table 1. A General Situation of Research Site.

	Forestfire-damaged	Control I	Landslide-damaged	Control II
Occurrence year	2009	-	2008	-
Damaged area(ha)	407	-	102	-
Basin area(ha)	112.5	61.4	196.9	112.4
Coordinate	128° 38' 43.1" 35° 59' 3.0"	128° 19' 21.2" 36° 0' 41.6"	128° 51' 29.4" 37° 2' 18.8"	129° 6' 33.4" 37° 3' 52.8"
Country rock	Sedimentary rock	Sedimentary rock	Metamorphic rock	Igneous rock
Forest physiognomy	Decideous forest	Mixed forest	Decideous forest	Coniferous forest
Age class	3	3	4	5
Stand density	High	High	High	High
Diameter class	Smallwood	Medium hard wood	Medium hard wood	Medium hard wood
Flow length	1,423m	891m	1,232m	548m
Average slope of flow	24.8°	28.4°	30.2°	22.6°

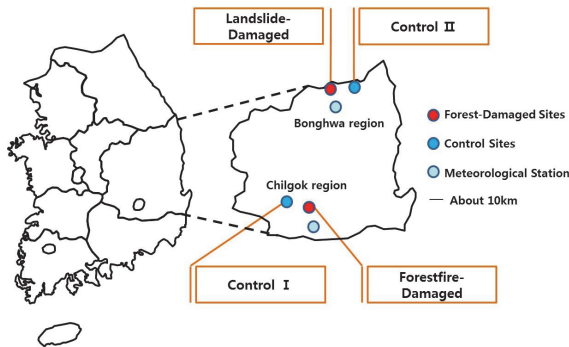


Fig. 1. Geographical Position at Research Site.

2.2 연구대상지 지형 측정

2.2.1 조사 시기

조사 시기는 강우가 집중되는 여름철 토사유출이 많이 발생하는 것으로 판단하여 우기전 봄, 우기후 가을에 각각 모니터링을 실시하여 연 2회 측정하였다. 모니터링은 2010년부터 2014년까지 총 5년간 실시하였다.

2.2.2 조사장비 및 측정방법

모니터링에는 오스트리아 RIEGL社의 LMS-Z210ii 지상 LiDAR 장비를 이용하였다. 이 장비는 국내외의 선행연구에서 토석류 발생량 산정, 침식/퇴적 해석, 사방댐 저수량 산정 등에 활용되고 있다(Milan *et al.*, 2007; Jun *et al.*, 2010; Seo *et al.*, 2014; Jun *et al.*, 2014). 사용된 지상 LiDAR 장비의 구성과 성능은 각각 Fig 2, Table 2와 같다.

사방댐 대수면에 저사되는 퇴적토사량 모니터링을 위해 본 연구에서는 Seo *et al.*(2014)의 방법과 동일하게 사방댐 방수로에서 지상 LiDAR 장비를 3회 이동 시켜 촬영하였다. 촬영위치는 사방댐 방수로 위 좌측에서 1차 측정, 우측에서 2차 측정, 2차 측정 지점에서 Tiltmounts를 통하여 대수면 아래쪽에 3차 측정하였다. 또한 3개 Data를 정합하여 음영지역 발생을 최소화시켰다.

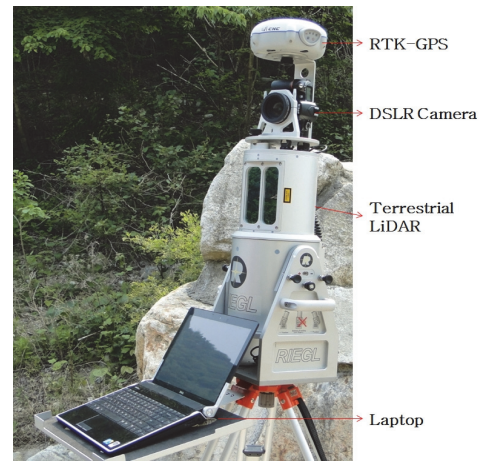


Fig. 2. Equipment Component of Terrestrial LiDAR.

2.2.3 지상 LiDAR 자료 처리

지상 LiDAR 촬영으로 획득된 점군들은 장비 내부를 원점으로 하는 3차원 상대좌표이기 때문에 변위추출을 위해서는 절대좌표로 변환이 필요하다. 본 연구에서는 HUACE社의 X91 Network RTK-GPS를 이용하여 절대좌표로 변환하여 정합하였다.

정확한 지형변화 분석을 위하여 지면점을 추출하는 필터링 작업이 필요하다. 연구에는 Terrasolid社의 TerraScan S/W를 이용하여 경사기반의 지면점 분류기법을 통하여 지면점을 분류하였다. 또한 분류된 지면점 Data는 획득되지 않은 미지점의 값을 예측할 수 있는 보간법을 적용해야 되는데, 본 연구에서는 복잡한 지형을 섬세하게 나타내고, 지형분석에 많이 이용되고 있는 불규칙삼각망(TIN)을 형성하였다(Choi, 2005).

DEM 형성에는 Morgan and Habib(2002)가 제안한 방법으로 점밀도를 고려하여 격자크기를 산정할 수 있지만, 사방댐 계획되사선 범위를 고려하여 격자크기는 가로, 세로 각각 0.5m로 설정하였다. 형성된 DEM은 분석구역과 비(非)분석구역으로 구분하고, 사방댐 계획되사선내의 분석구역만 활용하였다. 지상 LiDAR를 이용한 데이터 획득 과정은 Fig

Table 2. Basic Specification of Terrestrial LiDAR(Riegl, 2009).

Classification	Content
Measurement Range for natural targets, 80% for natural targets, 10%	up to 650m up to 200m
Scanning Range	up to 80° 0° up to max. 360°
Minimum Range	4m
Measurement Accuracy	15mm
Scan speed	0.01°/s to max. 15°/s
Capture	6,000 pts/sec
Angle Measurement Resolution	0.005°
Laser Pulse Repetition Rate	24,000 Hz

3과 같고, 사방댐에 저사된 지상 LiDAR 결과의 예시는 Fig 4와 같다.

2.3 토사유입량 산정 방법

사방댐을 이용한 토사량 산정은 Chun(2011)이 사방공학에 설명한 방법에 의해 간단하게 산정할 수 있다. 사방댐에 유입되는 토사량을 측정하여 유출토사량을 파악할 수 있지만, 큰 규모의 물빼기구멍이 설치되어 있는 경우에는 정밀도가 떨어질 수 있다. 또한 사방댐이 만사상태일 경우에는 댐 퇴사지의 계상변동에 대한 측량 결과를 이용하여 유출토사량을 추정할 수 있다(Chun, 2011).

본 연구에서는 Chun(2011)이 설명한 방법과 유사하게 사방댐에 유입되는 토사량 즉, 사방댐에 퇴적되는 토사량을 산정하여 토사유입량으로 표현하였다.

연간 토사유입량 산정을 위해 우기전과 우기후의 체적차

이를 비교하였다. 산술연산을 이용하여 우기전과 우기후의 DEM을 빼는 방법으로 변위를 추출하였다. 산술연산과정의 수식은 다음과 같고, 각 연구대상지의 DEM 형성결과 예시는 Fig 5와 같다.

$$\Delta z_{ij} = z_{ij}(1) - z_{ij}(2)$$

- 여기서, Δz_{ij} : 개별 격자의 변위량
- $z_{ij}(1)$: 변위전 개별 격자의 높이
- $z_{ij}(2)$: 변위후 개별 격자의 높이
- i : 라인의 수
- j : 행의 수

위 식을 통해 계산된 격자의 변위량과 격자크기를 이용하여 토사유입량을 산정하였다.

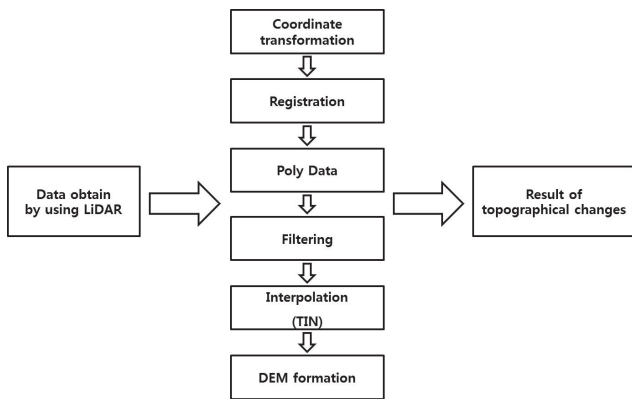
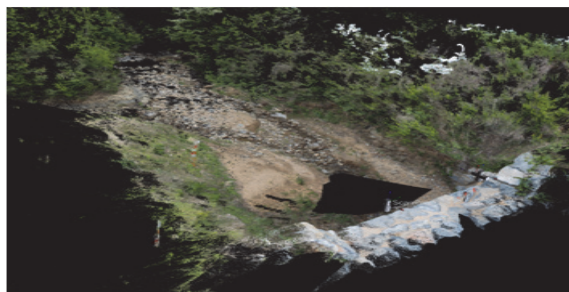


Fig. 3. Processing of Terrestrial LiDAR Research System.

2.4 연구대상지 강우량

우리나라에서 토사유출의 직접적인 원인은 강우로 알려져 있으며, 연평균 강수량의 70% 이상이 6월~9월까지 강우량이 차지하고 있다(Chae et al., 2016). 또한 Shin et al.(2013)은 산불 피해지에 대한 연구에서 연간 총 퇴적량이 강우가 집중되는 6월~9월에 대부분 발생한다고 하였다. 본 연구에서도 연구대상지역의 6월~9월까지 강우량 합을 연도별로 나타내고 이를 비교·분석 하였다.

연구대상지역에 직접적인 강우량 측정 장비가 없기 때문에 각 지역에서 가장 가까운 정규 기상관측소(대구, 봉화) 자료를 검토하였다.

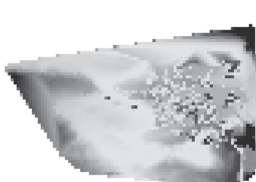


<Before rainy season>



<After rainy season>

Fig. 4. Examples of Terrestrial LiDAR Measurement Results at Forestfire-Damaged.



<Forestfire-Damaged>



<Control I>



<Landslide-Damaged>



<Control II>

Fig. 5. Examples of DEM Formation at Research Site.

두 지역의 강수량 차이는 산불피해지역(대구)에서 산사태 피해지역(봉화) 보다 2010년도에 191mm 더 많은 것으로 나타난 반면, 2011년에는 산사태피해지(봉화)에서 231mm 더 많은 것으로 나타났다(Fig 6). 그러나 2012년~2014년 사이에는 두 지역에 큰 강수량 차이가 없는 것으로 판단하였다.

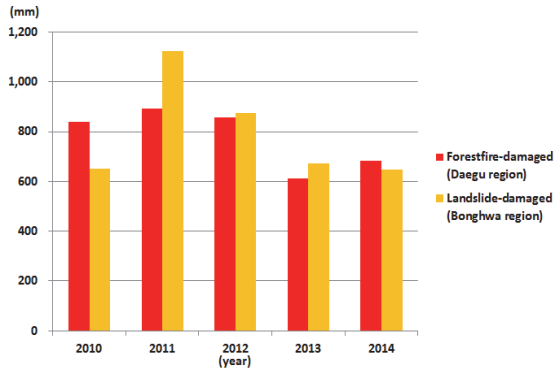


Fig. 6. Rainfall of Research Site during June to September.

3. 결과 및 고찰

산불 및 산사태 피해지와 일반산지(Control I, II)의 유역 조사구역 면적이 서로 다르기 때문에 직접적인 비교는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 사방댐에 저사된 퇴적토사를 이용하여 연간 토사유입량을 산정하였다. 산정된 토사유입량을 유역면적과 비교하여 단위면적당(ha) 토사유입량으로 표현하고, 이를 상대적으로 비교하였다.

3.1 산불피해지의 연간 토사유입량

산불피해 계류에서는 2010년~2014년까지 연간 토사유입량이 각각 1.83m³/ha, 1.64m³/ha, 1.50m³/ha, 0.14m³/ha, 0m³/ha로 나타나 조사기간 동안 매년 토사유출량이 점점 감소하

는 것으로 나타났다(Table 3). 2014년 토사유출량이 0m³/ha 인 이유는 2013년 우기이후 조사 때 사방댐이 만사되어 있었고, 2014년 우기전·후의 조사에서는 Fig 7에서와 같이 사방댐 상·하류에서 식생성장 외에 토사유출 흔적은 발견할 수 없었기 때문에 토사유출량이 0m³/ha이라고 판단하였다.

동일한 지역의 일반산지(Control I)에서는 3년차 조사까지 연간 토사유입량이 각각 0.44m³/ha, 0.09m³/ha, 0.01m³/ha로 산불피해 계류와 유사하게 감소하는 것으로 나타났지만, 4년차(2013년, 0.29m³/ha), 5년차(2014년, 0.39m³/ha)에는 오히려 토사유입량이 증가하여 산불피해 계류보다 더 많은 토사가 유출된 것으로 나타났다(Table 3).

산불피해지와 일반산지 두 계류의 연간 토사유입량을 비교하면 Fig 8과 같다. 산불피해 계류에서는 모니터링 1년 차에 토사유입량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 시간이 지날수록 점점 감소하는 것으로 나타났다. 특히 모니터링 4년차에는 토사유입량이 급감하였다. 이러한 결과는 1996년과 2000년 고성, 삼척 산불피해지에서 토사유출 특성을 연구한 Lee *et al.*(2004)과 Seo *et al.*(2010)의 연구결과와 유사하게 나타났으며, 산불피해지의 토사유출 및 하류의 토사유입 방지를 위해서는 조기복구가 중요하다는 것을 정량적인 결과로 확인할 수 있었다. 특히, 산불피해 사면이 포함된 계류의 경우 토사유입으로 인한 하류의 2차 피해 방지를 위해 사방댐 등의 신속한 구조물 설치와 지속적인 관리가 매우 중요한 것으로 판단된다.

산불피해 계류에서는 강우량의 변화에 따라 토사유입량의 증감이 두드러지게 나타났다(Fig 9). 모니터링 3년차까지 (2010년~2012년)의 연평균 강수량(매년 6월~9월) 863mm, 연평균 토사유입량 1.66m³으로 나타났고, 2013년과 2014년의 연평균 강수량 648mm, 연평균 토사유입량 0.07m³으로 나타났다. 이러한 결과는 강우량이 많을수록 산불피해 계류



Fig. 7. View of Filled Erosion Control Dam in Forestfire-Damaged.

Table 3. Annual Sediment Yield in Forestfire-Damaged and Control I.

	Basin area (ha)	Sediment yield per unit area(ha)				
		2010	2011	2012	2013	2014
Forestfire-damaged	112.5	1.83 (m ³ /ha)	1.64 (m ³ /ha)	1.50 (m ³ /ha)	0.14 (m ³ /ha)	0.00 (m ³ /ha)
Control I	61.4	0.44 (m ³ /ha)	0.09 (m ³ /ha)	0.01 (m ³ /ha)	0.29 (m ³ /ha)	0.39 (m ³ /ha)

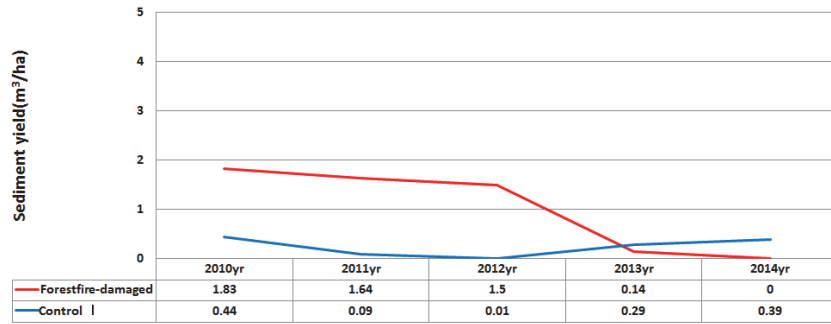


Fig. 8. Comparison of Sediment Yield in Forestfire-Damaged and Control I .

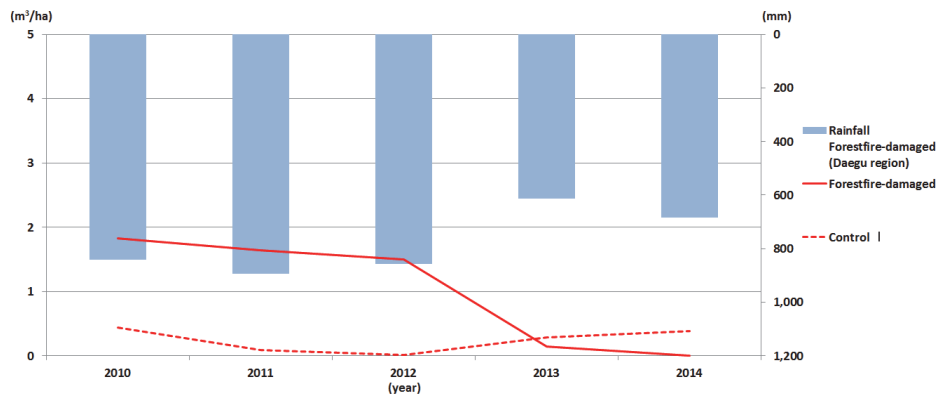


Fig. 9. The Annual Sediment Yield and Rainfall in Forestfire-Damaged and Control I .

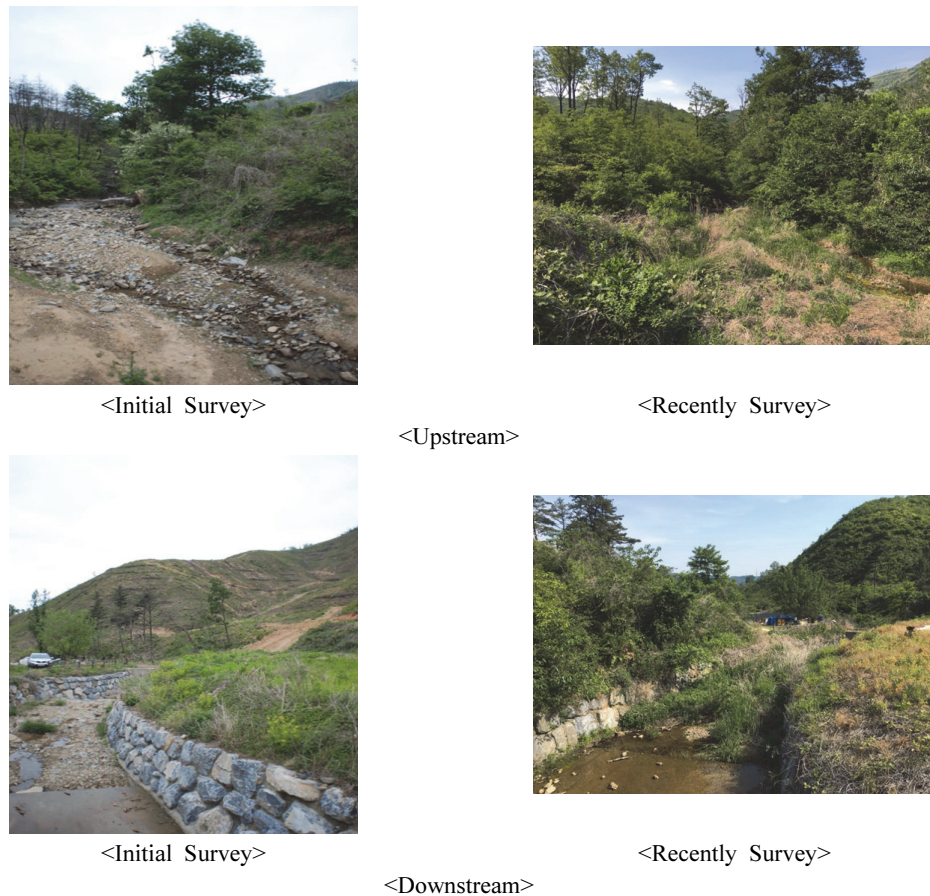


Fig. 10. Comparison of Initial and Recently Survey in forestfire-Damaged.

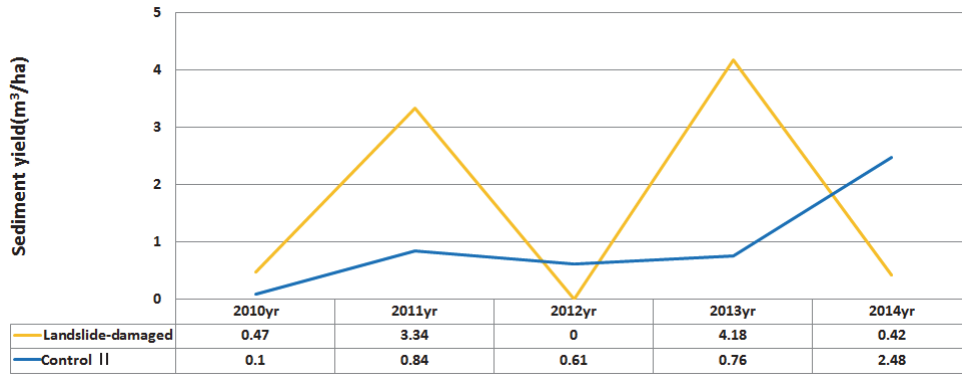


Fig. 11. Comparison of Sediment Yield in Landslide-Damaged and Control II.

에서는 토사유입량이 증가하는 것으로 강우의 영향성이 일반산지 보다 높은 것으로 판단된다.

한편, 대조구의 2013년, 2014년의 토사유입량이 산불피해지보다 더 높게 나타났는데, 이는 Shin *et al.*(2013), Lee *et al.*(2014)의 연구결과에 근거하여 국내 산불 피해지의 식생도입 등의 복구공사 후 활착 등 사면안정이 이루어졌기 때문에 토사유입량이 대조구 보다 작게 나타난 것으로 판단되며, 현장 조사에서도 확인할 수 있었다(Fig 10).

또한, 두 지역에 동일한 강우량이 왔다고 가정한다면, 산불피해 계류에서 훨씬 많은 토사유입이 일어났다고 추정할 수 있다. 이는 산불 발생으로 지표면이 연소되면서 토양내 공극이 줄어들고, 토양의 발수성(Soil Water Repellency)이 증가하여 강우의 토양침투를 어렵게 만들었기 때문으로 판단된다. 이는 DeBano(2000)의 연구에서 발수성이 강우의 침투, 지표유출, 표면침식에 영향을 미친다고 하였으며, Johansen *et al.*(2001)이 인공강우를 이용한 유출특성을 비교한 실험적 연구에서도 산불피해지에서 강우유출이 많다고 밝혔다. 따라서, 본 연구의 산불피해지도 연소로 인해 토양응집력이 약화되고, 연소재 등이 지표면에 축적된 상태에서 지표유출의 증가로 토사유입량이 증가한 것으로 판단된다.

3.2 산사태피해지의 연간 토사유입량

산사태피해 계류에서 2010년~2014년까지 연간 토사유입량이 각각 0.47m³/ha, 3.34m³/ha, 0m³/ha, 4.18m³/ha, 0.42m³/ha로 나타났다(Table 4). 산사태피해 계류에서는 산불피해 계류와는 다르게 연간 토사유입량 변화와 산사태피해와의 관계를 찾을 수 없었다. 2012년 토사유입량이 0m³/ha인 이유

는 우기후에 사방댐 저수량의 변화가 없다고 판단하여 LiDAR 촬영을 실시하지 않았다. 이로 인해 연간 토사유입량 산정을 위한 비교대상이 없어 0m³/ha이라고 가정하였다. 이는 현장 조사자의 주관적인 판단으로 본 연구의 한계점인 동시에 다음연도(2013년)의 토사유입량이 가장 많이 산출된 결과에 영향을 끼쳤을 것으로 사료된다. 그러나 본 연구의 목적에 활용되는 모니터링 Data로는 충분한 가치가 있는 것으로 판단하여 연구결과에 활용하였다.

동일한 지역의 일반산지(Control II)에서의 연간 토사유입량은 각각 0.10m³/ha, 0.84m³/ha, 0.61m³/ha, 0.76m³/ha, 2.48m³/ha로 나타났다(Table 4).

산사태피해지와 일반산지(Control II) 두 계류의 연간 토사유입량을 비교하면 Fig 11과 같다. 산사태피해지의 특징 또는 일반산지와와의 뚜렷한 차이점이 나타나지는 않았다. 그러나 두 계류의 연간 토사유출량 증·감 경향은 격년으로 유사하게 변화하는 것으로 나타났지만, 강우량과의 상관성은 없는 것으로 판단된다(Fig 12).

3.3 산림훼손지와 일반산지의 토사유입량 비교

산림이 산불 및 산사태 등으로 인하여 훼손된 산지와 일반산지와의 전체 토사유입량 차이를 비교하였다(Fig 13).

5년간의 모니터링 기간 동안 산불피해 계류에서는 총 5.11m³/ha, 일반산지(Control I)에서는 총 1.22m³/ha의 토사유입이 발생하여 산불피해 계류에서 약 4.2배 더 많은 토사가 유입되었다. 또한 산사태피해 계류에서는 총 8.41m³/ha, 일반산지(Control II)에서는 총 4.79m³/ha의 토사유입이 발생하여 산사태피해 계류에서 약 1.8배 더 많은 토사가 유입되었

Table 4. Annual Sediment Yield in Landslide-Damaged and Control II.

	Basin area (ha)	Sediment yield inflow per unit area(ha)				
		2010	2011	2012	2013	2014
Landslide-damaged	196.9	0.47 (m ³ /ha)	3.34 (m ³ /ha)	0.00 (m ³ /ha)	4.18 (m ³ /ha)	0.42 (m ³ /ha)
Control II	112.5	0.10 (m ³ /ha)	0.84 (m ³ /ha)	0.61 (m ³ /ha)	0.76 (m ³ /ha)	2.48 (m ³ /ha)

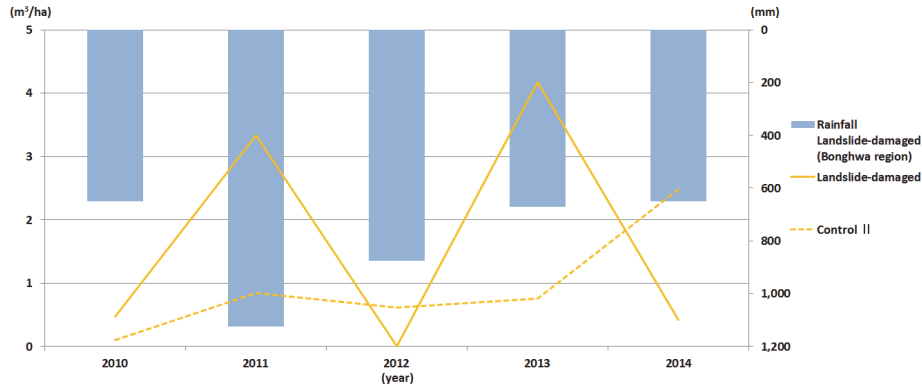


Fig. 12. The Annual Sediment Yield and Rainfall in Landslide-Damaged and Control II.

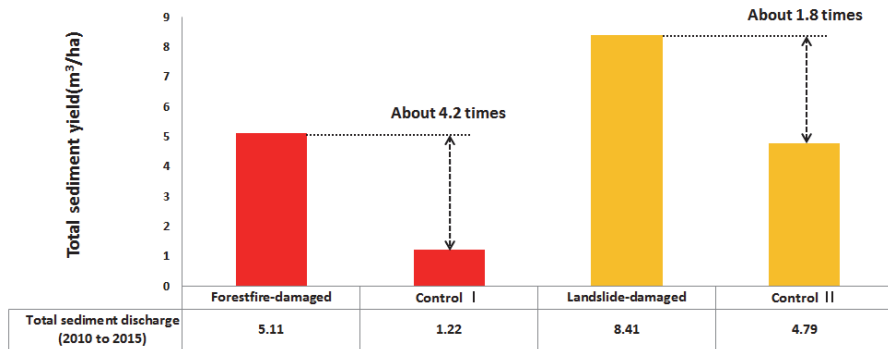


Fig. 13. Comparison of Total Sediment Yield in Damaged and Control Forests.

다. 따라서 산림훼손지에서는 긴급복구 및 항구복원을 위한 사방사업이 적시적소에 이루어져야 될 것으로 판단된다. 또한 효과적인 사방사업을 통하여 하류 농경지 및 민가에 토사유입으로 인한 피해를 사전에 예방할 수 있도록 방재적 측면에서도 강조되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 산불 및 산사태피해 계류와 일반산지의 토사유입량을 정량적으로 비교하고, 사방복구 및 조기복구의 중요성에 대한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

산불피해 계류에서는 연간 토사유입량이 매년 1.83m³/ha, 1.64m³/ha, 1.50m³/ha, 0.14m³/ha, 0m³/ha 유입되어 토사유입량이 점점 감소하였다. 일반산지(Control I)에서는 3년차 조사까지 연간 토사유입량이 감소하는 것으로 나타났지만, 4년차, 5년차에는 토사유입량이 증가하여 산불피해 계류보다 더 많은 토사가 유입되었다. 산불피해 계류에서는 모니터링 1년차에 토사유입량이 가장 많았으며, 시간이 지날수록 점점 감소하였고, 4년차에는 토사유입량이 급감하였다.

산사태피해 계류에서 연간 토사유입량이 매년 0.47m³/ha, 3.34m³/ha, 0m³/ha, 4.18m³/ha, 0.42m³/ha로 나타났다. 산불피해 계류와는 다르게 연간 토사유입량 변화와 산사태피해와의 관계는 찾을 수 없었다. 그러나 산불 및 산사태 등으로 인하여

훼손된 산지와 일반산지와와의 전체 토사유입량 차이를 비교한 결과, 산불피해 계류 5.11m³/ha, 일반산지(Control I) 1.22m³/ha 토사유입이 발생하여 산불피해 계류에서 약 4.2배 더 많은 토사가 유입되었다. 또한 산사태피해 계류 8.41m³/ha, 일반산지(Control II) 4.79m³/ha의 토사유입이 발생하여 산사태피해 계류에서 약 1.8배 더 많은 토사가 유입되었다.

이러한 결과는 산불 및 산사태 등으로 훼손된 산지에서는 일반산지보다 더 많은 토사가 유출되어 하류로 유입된다는 정량적인 결과이다. 또한 이들 훼손지에서는 산불 및 산사태 자체로 인한 1차 피해뿐만 아니라 강우가 집중되는 여름철에는 토사유입으로 인한 2차 피해방지를 위해 산림훼손지의 조기 복구 중요성에 대한 기초자료의 가치는 충분하다고 판단된다.

본 연구에 활용된 지상 LiDAR 장비는 산지계류에 시공되어 있는 사방댐의 퇴적토사량을 산정하여 토사유입량을 추정하는데 있어 기존의 측량장비에 비해 간편하고 정밀하게 측정할 수 있는 장점이 있었다.

또한 산림훼손지의 사방댐 및 사방사업 규모를 결정할 때 연도별 사방댐 토사유입량이 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 연구에 사용된 강우량 자료는 산림훼손지와 일반산지에서 동일하게 적용되었고, 또한 계류의 사방댐 저사 범위내의 관측 자료이므로 실제 유역 전체의 사면과 계류 침식, 유출과는 시간적 오차가 있을 수 있다.

향후에는 산림훼손유형, 유역크기, 모암, 임상, 복구방법 등을 모두 고려하여 체계적인 산림훼손지의 토사유입량에 대한 장기적인 모니터링이 이루어져 종합적인 사방사업 및 방재대책에 활용될 필요가 있다.

References

- Chae, B.G., Choi, J.H. and Jeong, H.K. 2016. A Feasibility Study of a Rainfall Triggering Index Model to Warn Landslides in Korea. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 26, No. 2, pp. 235-250.
- Choi, H. 2005. Evaluation of the Optimum Interpolation for Creating Hydraulic Model from Close Range Digital Photogrammetry. *Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 23, No. 3, pp. 251-260.
- Chun, K.W. 2011. *Erosion control engineering*, pp. 426. [in Korean]
- DeBano, L.F. 2000. Fire-Induced Water Repellency: An Erosional Factor in Wildland Environments. *USDA Forest Service Proceedings, RMRS-P-13*: 307-310.
- Government Accountability Office (GAO). 2006. Wildland fire rehabilitation and restoration: Forest Service and BLM could benefit from improved information on status of needed work. Report to the Chairman, Subcommittee on Forest and Forest Health, Committee on Resources, House of Representatives GAO-06-670, Washington, DC., pp. 43.
- Johansen, M.P., Hakonson, T.E. and Breshears, D.D. 2001. Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands. *Hydrological Processes*, 15: 2953-2965.
- Jun, B.H., Jun, K.W. and Lee, S.C. 2014. Analysis of the Erosion/Deposition in Debris Flow Using Terrestrial LiDAR Data. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*, Vol. 10, No. 3, pp. 61-71.
- Jun, K.W., Jun, B.H., Ahn, K.K., Jang, C.D. and Kim, N.G. 2010. A Study on Estimation of Amount of Debris-Flow using Terrestrial LiDAR. *Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 11, No. 3, pp. 63-68.
- Korea Forest Service. 2013. 2013 Main Business Plan Details.
- Lee, C.W., Lee, C.Y., Kim, J.H., Youn, H.J. and Choi, K. 2004. Characteristics of Soil Erosion in Forest Fire Area at Kosung, Kangwondo. *Jour. Korean For. Soc., Korean Forest Society*, Vol. 93, No. 3, pp. 198-204.
- Lee, C.W., Seo, J.I., Youn, H.J. and Kim, K.H. 2014. Effectiveness of rehabilitation treatments in a slowly revegetating hillslope in a recently burned coastal forest, Republic of Korea. *Landscape Ecol Eng*, 10: 249-260.
- Milan, D.J., Heritage, G.L. and Hetherington, D. 2007. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. *Earth Surf. Process, Landforms* 32: 1657-1674.
- Morgan, M. and Habib, A. 2002. Interpolation of LiDAR data and automatic building extraction. In: *ACSM – ASPRS 2002 Annual Conference Proceedings*. Washington, D.C., USA, April 19-26 2002.
- RIEGL. 2009. *Terrestrial Laser Scanner LMS-Z210ii Technical Documentation Users Instructions*. pp. 347.
- Robichaud, P.R., Ashmun, L.E. and Sims, B.D. 2010. Post-Fire Treatment Effectiveness for Hillslope Stabilization. *General Technical Report RMRS(Rocky Mountain Research Station)-GTR-240*, pp. 62.
- Robichaud, P.R., Lewis S.A. and Ashmun, L.E. 2008. New Procedure for Sampling Infiltration to Assess Post-fire Soil Water Repellency. *USDA Forest Service Research Note RMRS-RN-33*: 1-14.
- Seo, J.I., Chun, K.W., Kim, S.W. and Kim, M.S. 2010. Rainfall Pattern Regulating Surface Erosion and Its Effect on Variation in Sediment Yield in Post-wildfire Area. *Jour. Korean For. Soc., Korean Forest Society*, Vol. 99, No. 4, pp. 534-545.
- Seo, J.P., Woo, C.S., Lee, C.W., Kim, K.H. and Lee, H.H. 2014. Topographical Changes in Torrential Stream After Dredging in Erosion Control Dam(Using Terrestrial LiDAR Data). *Jour. Korean For. Soc., Korean Forest Society*, Vol. 103, No. 3, pp. 392-401.
- Shin, S.S., Park, S.D. and Lee, K.S. 2013. Sediment and hydrological response to vegetation recovery following wildfire on hillslopes and the hollow of a small watershed. *Journal of Hydrology*, 499: 154-166.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2006. *BAER(Burned Area Emergency Response Treatments Catalog)*. pp. 254.
- Yuichi, O. 1997. Surface runoff and soil erosion after forestfire. *Proceedings of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, pp. 168-169. [in Japanese]

<i>Received</i>	August 16, 2016
<i>Revised</i>	August 19, 2016
<i>Accepted</i>	October 21, 2016