

LiDAR 자료를 이용한 유역의 퇴적물 모니터링

The Monitoring of Sediments on the Basin Using LiDAR Data

강영미¹⁾ · 강준목²⁾

Kang, Young Mi · Kang, Joon Mook

Abstract

Most of domestic multipurpose dams were basin area to be large, therefore, soil loss were occurred by downpour in the rainy season, They have caused to accumulate sediments on the river and dam reservoir that brought the decrease of storage volume and difficulties of the quality management of water. Until now, the measurement cycle of sediments surveying was long and it was designed to use surveying the degree of sediments, Thus there were many difficult things to secure accuracy. In this study, it was intended to analyze the origin position tracing of sediments and the movement route, for this purpose, aerial LiDAR technology was applied to precise sediments surveying. The amount and location of soil loss were evaluated by classified properties of soil, land-cover, and topographical conditions in detail. Therefore, the reliance could be maintained in analyzing the route of soil loss by extracting the flow within a watercourse and using the advanced accurate DEM.

Keywords : LiDAR, Sediment, Soil Loss, DEM, Movement Route

초 록

대부분의 국내 다목적 댐은 유역면적이 넓고 강우기 집중강우로 인하여 토양의 상당량이 유실되며, 유실된 토양입자는 하천이나 댐 저수지에 장기간 축적되어 저수용량의 감소와 수질관리에 어려움을 야기한다. 지금까지의 퇴적물 조사방법은 관측주기가 길고 측선법에 의한 퇴적정도를 관측하여 정확성 확보에 어려움이 많았다. 본 연구에서는 댐 저수지 퇴적물에 대한 정밀 관측을 위해 항공 LiDAR 기술을 활용하였으며, 퇴적물의 근원지를 추적하고 그 이동경로를 연구하였다. 토양유실에 영향을 주는 토양, 피복, 지형특성을 보다 세밀하게 분류함으로써 유실되는 퇴적물의 정확한 분포량과 유실 위치를 파악할 수 있었으며, 정확도가 향상된 고정밀 DEM을 이용하여 수로화된 흐름을 추적함으로써 퇴적물의 유실경로 분석에 신뢰성을 유지할 수 있었다.

핵심어 : 라이다, 퇴적물, 토양유실, 수치표고모형, 이동경로

1. 서 론

하상퇴적물은 일반적으로 주변의 암석 혹은 토양으로부터 형성되어 여러 가지 분급작용(sorting)을 거친 후 현재의 위치에 쌓인 것이며, 이는 하천의 흐름과 함께 계속해서 이동해 간다. 따라서 현재의 위치에 놓여있는 하상퇴적물이 최초 어디로부터 온 것인가를 판단하는 것은 매우 어려운 일이다.

수목이 울창한 산림지역일 경우에 사진측량은 수목이나 다른 장애물로 가려진 지표면은 도화가 부정확하다. 이러한 사진측량의 문제점을 보완하고 보다 정확한 수치

표고자료를 제작하려는 많은 노력이 있었으며, 그 대표적인 성과가 LiDAR(Light Detection and Ranging) 시스템의 개발이다. 항공 LiDAR 측량은 GPS의 기술이 도입된 1980년대 후반부터 본격적인 개발이 시작되어 1990년대 중반에 상용화 된 제품이 출시되었다. 그 후 장비성능과 측량정확도의 향상, 자료처리 등을 위한 꾸준한 기술개발로 인하여 현재 고밀도/고정확도의 수치표고자료 획득에 항공 LiDAR 측량 기술이 활용되고 있다(Wehr 등, 1999). 많은 분야에서 응용되고 있는 LiDAR는 최근 10년 동안에 DEM(Digital Elevation Model) /DSM(Digital Surface

1) 연결저자 · 정회원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 공학박사(E-mail:ladykym@empal.com)

2) 정회원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail:jmkang@cnu.ac.kr)

Model)을 생성하는 알고리즘이 개발되었으며(Vincent 등, 2001; Sithole 등, 2003), 단일 또는 다중 LiDAR 데이터로부터 DEM을 생성하기 위한 계층적 지형복원(hierarchical terrain recovery)에 관한 연구를 수행한 바 있다(Yong 등, 2004). 국내연구로는 서정현 등이 기존 수치표고자료 제작기술을 비교분석하여 LiDAR의 활용가능성을 입증하였으며(서정현 등, 2000), 강준목 등은 LiDAR와 고해상 영상을 융합함으로써 도심지역에 대한 정밀 모니터링에 관한 연구를 수행하였다(강준목 등, 2004). 한편, 유역 산사면에서의 침식과 하천으로의 퇴적물 이동에 관한 연구는 Wischmeier and Smith에 의해 제안된 범용토양유실 공식을 근간으로 하여 이루어져 왔으며(Wischmeier 등, 1978), 이 이론은 강우, 토양특성, 지형특성, 식생피복 등 인자값으로 하여 유역 내에서 단위면적당 발생하는 토양 유실량을 산정해내는 방법으로, 최근에는 GIS를 이용하여 해당 인자값을 적용하고 계산하는 모델들이 개발되고 있으며, 유역 및 지형에 알맞게 수정한 연구들이 다양하게 진행되고 있다(Moore 등, 1986; Renard 등, 1993). 국내연구로 USLE(Universal Soil Loss Equation)에 GIS 기법을 적용한 평창강 유역의 토양유실량의 평가(신계중, 1999)와 김양수 등이 토사유출량 산정기법의 적용성 분석을 수행한바 있다(김양수 등, 1998). 그러나 이러한 연구들은 아직까지 실제 지형을 정확하게 추출하지 못하고 있으며 이로 인한 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 높은 정확도를 유지하면서 넓은 지역 3차원 공간 데이터 획득이 가능한 항공 LiDAR 시스템을 이용하여 유역에 대한 DEM/DSM을 생성하고, 유역내 토양 유실에 영향을 주는 인자 및 유실량을 산정하였다. 또한 정확도가 향상된 고정밀 DEM을 이용하여 유실위치 및 경로를 분석함으로써 댐저수지 퇴적물을 모니터링 하였다.

2. 유역의 DEM/DSM 생성

2.1 항공 LiDAR 자료 획득

2.1.1 취득 점밀도, 지상GPS 기준국 선정

목적에 적합한 격자크기와 DEM과 DSM을 작성하기 위해서는 항공 LiDAR 측량점의 취득 점밀도를 결정해야 한다. 격자크기와 취득 점밀도와의 관계는 격자크기보다 조밀한 밀도의 데이터를 취득하여 격자위치의 표고정보를 보간하는 과정을 거치도록 한다. 본 연구에서는 스캔 각도, 스캔폭, 비행코스간격을 조정하여 연구지역 전체에 대해 점밀도 2~3/m²로 취득하였다.

또한, 이동국(항공기상의 레이저)의 정확한 위치파악을 위해 항공 LiDAR 측량 계획시 측량지역의 상황에 따른 지상 GPS 기준국을 선정해야한다. 본 연구에서는 촬영지역 30km 내에 기준점을 선정하여 위치정확도를 높였다.

2.1.2 대상지역 및 장비구성

대상지역은 충청북도 청원군 대청댐 일대로 포함 면적이 18.526km²인 청주취수탑 부근의 품곡천 유역(그림 1)이다.

데이터 획득에 사용된 장비는 캐나다 Optech 사의 ALTM (Airborne Laser Terrain Mapper) 3070이며 Cessna 208 항공기에 탑재하여 항공 LiDAR 측량을 수행하였다. 이 장비의 스캐닝 메카니즘은 Oscillating mirror를 사용하므로 스캔 패턴은 지그재그 라인(두 방향 스캔)이다. 따라서 대상지역의 LiDAR 데이터 분포도 지그재그 형태를 띄게

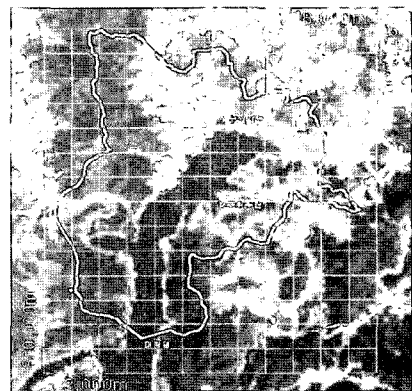


그림 1. 연구 대상지역

표 1. 레이저 스캐닝 데이터의 제원

항 목	제 원
비행 고도	200~3,000m
평면 정확도	1/2000×고도(1σ)
높이정확도	< 15cm at 1,200m(1σ) < 25cm at 2,000m(1σ) < 35cm at 3,000m(1σ)
반사 해상력	1cm 이상의 객체
반사파 감지력	last pulse를 포함한 4개의 반사파
반사 분해력	12bit
스캔 주기	최고 70kHz
스캔각	0~±25°, ±1°씩 증감
주사폭	(0-0.93)×비행고도
레이저 주사율	33kHz(최고 비행고도가 3km 이내) 50kHz(최고 비행고도가 2km 이내) 70kHz(최고 비행고도가 1.5km 이내)

된다. 표 1은 ALTM 3070 항공 LiDAR 시스템의 장비 사양을 간략하게 표시한 것이다.

2.1.3 LiDAR 데이터 획득

정확도 점검이 끝난 ALTM 3070 시스템을 이용하여 촬영 고도 1,270m에서 1,340m로 항공 LiDAR 측량을 하였다. 촬영 당시 수평·수직정확도는 그림 2와 같이 5cm 미만이었으며, GPS 신호 수신 상태 지수인 PDOP이 최고 4 미만, 평균 위성수는 5개로 양호하였다. 그림 3, 그림 4는 각각 LiDAR 촬영당시 PDOP과 위성수를 나타낸 것이다.

본 연구에서 획득한 LiDAR 데이터는 공간객체의 3차원 위치정보와 레이저파가 반사된 반사강도를 함께 포함한다.

레이저스캐닝 데이터의 표현 및 처리결과를 육안으로 용이하게 판단하기 위하여 고도채색도를 이용하였다.

그림 5는 반사강도 데이터이며 높이값에 따른 고도채색이 되는 그림 6과 같다.

2.2 DEM/DSM 생성

종래의 사진측량에 비해 항공 LiDAR 측량에서는 광범위

한 지역에서 고밀도의 수치지형모형을 획득할 수 있기 때문에 상세한 지형해석이 가능하다. 수치지형모형은 지물을 포함한 지표면데이터인 DSM과 지물을 제거한 지형데이터인 DEM의 두 가지로 구분된다. DSM에서 건물과 수목 등의 지물을 제거한 것이 DEM이기 때문에 DSM에서 필터링 처리에 의해 얻어진 것이 DEM이라고 달리 말할 수 있다.

본 연구에서는 LiDAR 데이터로부터 가상격자(Pseudo-Grid) 제작후 DEM/DSM을 생성하여 처리하는 알고리즘을 수행하였다. 그림 7은 LiDAR 자료로부터 DEM/DSM을 생

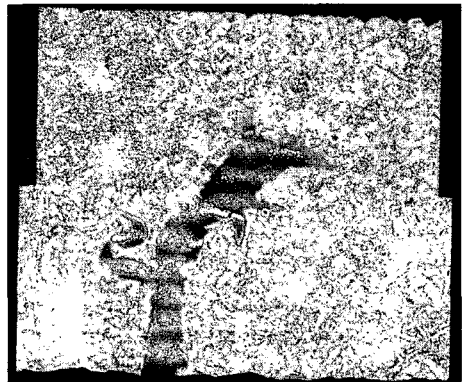


그림 5. 반사강도에 따른 LiDAR 원영상

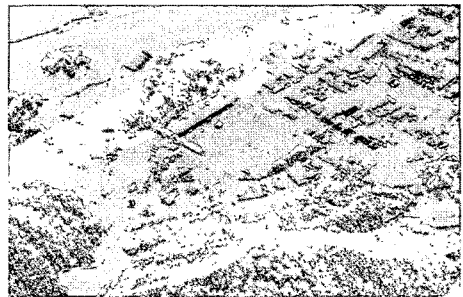


그림 6. 높이값에 따른 LiDAR 원영상

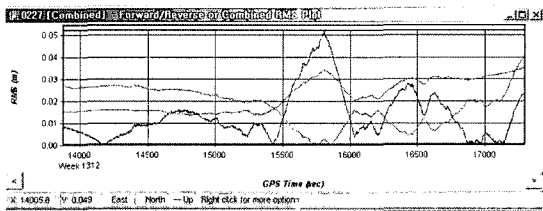


그림 2. 항공 LiDAR 데이터의 정확도 분포

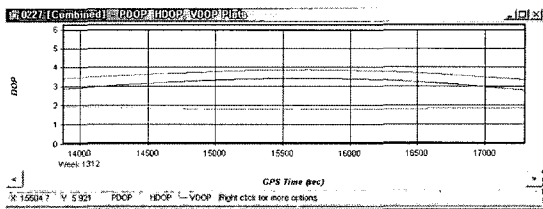


그림 3. GPS신호의 PDOP

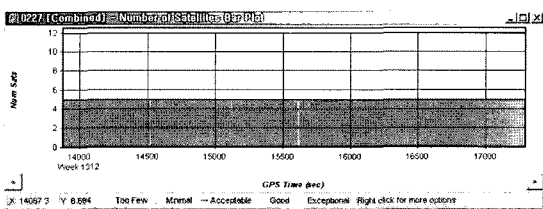


그림 4. GPS 위성수

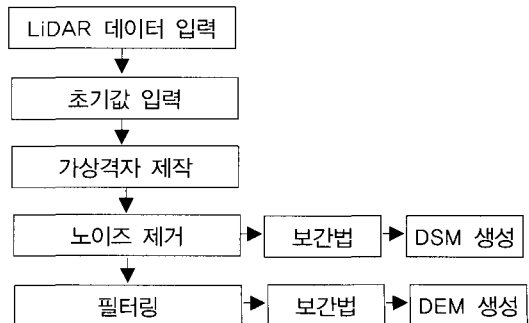


그림 7. DEM/DSM 생성 흐름도

성하기 위한 흐름도이다.

2.2.1 가상격자 제작

불규칙한 형태로 얻어지는 레이저스캐닝 데이터를 정규 격자의 형태로 제작하기 위해서는 보간이 이루어져야 하며 최적의 격자크기를 결정해야 한다. 기존 연구에서 레이저스캐닝 데이터의 점밀도가 “n”(n/m²)이라면 가로와 세로의 격자 폭은 각각 $1/\sqrt{n}$ m로 선정하는 것이 적당하다고 발표되었다(Morgan 등, 2002). 본 연구에서 이용한 가상격자는 레이저 스캐닝 된 대상지역을 정규격자 형태의 가상격자로 구분하고 가상격자내부에 존재하는 레이저스캐닝 데이터들을 해당위치에 있는 가상격자로 할당하였다.

가상격자를 위해 사용되는 점밀도는 대상지역의 면적과 데이터수를 이용하여 대략적으로 계산된 평균점밀도를 사용한다. 결국, 가상격자를 제작하면 그림 8과 같이 가상격자내부에 레이저 스캐닝된 원 데이터들이 분포된다(조우석, 2003).

가상격자를 이용하므로 레이저스캐닝 데이터를 처리하는 과정에서 데이터를 빠르게 접근하여 처리할 수 있고 데이터의 보간과 같은 처리과정 없이 가상으로 격자를 생성하여 점도메인에서 데이터를 처리하므로 데이터 처리 과정에서 발생하는 오차를 줄일 수 있게 된다. 결국 데이터 처리속도와 레이저 스캐닝 데이터간의 인접성을 향상시키기 위해 가상 격자를 생성한다.

가상격자 크기는 평균점밀도에 의해 계산된 평균점간격의 크기이며, $1/\sqrt{2} = 0.707 \approx 1\text{m}$ 과 같이 계산되었다.

이와 같이 생성된 가상격자는 DEM/DSM을 제작하는데 이용된다.

2.2.2 노이즈 제거

항공 LiDAR 측량에서 장비 자체의 오차원인, 지표면의 상태에 의한 오차원인 등을 각각 계통적 오차와 우연오차로 분

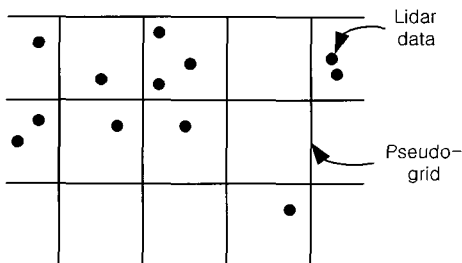


그림 8. Pseudo-grid 생성

류하고, 지표파복과 경사도에 따라 오차요인 별 오차의 크기를 정량화하기 위한 연구에서 수직위치에 대한 계통적 오차에는 식생(vegetation)의 유무가 우연오차에는 지표면의 경사도와 거칠기가 오차에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다(Maas 등, 1998). 따라서 적당한 탐색영역을 설정하여 탐색조건에 따라 과대우연오차가 포함된 LiDAR 데이터를 탐색해서 노이즈로 간주하고 제거하게 된다. 불규칙적인 과대우연오차 중 높이에 따른 과대우연오차만을 대상으로 해당되는 레이저스캐닝 데이터를 제거하므로 높이값을 이용한 데이터 처리시 오차를 줄일 수 있으며 다음과 같은 단계를 거친다.

- ① 대상지역을 정규분포라고 가정하고 노이즈를 제거하기 위한 탐색영역을 99% 신뢰구간을 벗어나는 데이터로 한정한다.
- ② 노이즈 후보데이터를 기준으로 수평은 가상격자간격과 수평오차 등을 고려하여 가상격자간격의 3배 크기, 수직은 최소빌딩높이를 고려하여 탐색영역을 설정한다.
- ③ 만약 탐색영역내부의 검색위치에 존재하는 노이즈 후보데이터를 제외한 다른 데이터가 주변에서 탐색되지 않을 경우에 그 데이터는 과대 우연오차에 해당하므로 제거하게 된다.

연구대상지역에 분포된 총 LiDAR 데이터 수가 노이즈 제거 후 대상지역에 분포된 데이터 중 최소 고도값은 변화가 없는 반면, 최대 고도값이 변화가 있기 때문에 제거된 노이즈가 포함된 데이터는 높은 고도에 분포되어 있는 것으로 판단된다.

2.2.3 DSM 제작

레이저스캐닝 데이터를 이용하여 대상지역에 존재하는 높이값에 대한 과대우연오차만을 제거한 후 IDW(Inverse Distance Weight) 혹은 크리깅(Kriging) 보간법을 이용하여



그림 9. 항공 LiDAR 자료에서 생성한 DSM

DSM을 생성한다. 본 연구에서는 IDW 보간법을 이용하였으며 그림 9는 1m 간격으로 IDW 보간법으로 제작된 DSM을 나타낸 것이다. 여기서 사용된 무게함수는 $1/D^2$ 이다.

2.2.4 DEM 제작

DSM으로부터 DEM을 획득하는 필터링에 관한 많은 알고리즘이 개발되어 왔으며 아직도 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방법으로는 Morphological Operation, Linear Prediction, Slope-based Filtering 등이 있다.

본 연구에서는 레이저 스캐닝 데이터에서 비지형(non-terrain ; 수목, 건물, 농작물 등) 데이터를 Linear Prediction 기법을 이용하여 제거하고 보간하여 DEM을 생성하였다. 즉, 비지형이라고 판단되는 데이터를 제거하고 지표면부분의 데이터만을 이용하여 보간을 수행하였다.

그림 10은 Linear Prediction 기법과 IDW 보간법으로 생성한 1m DEM이다. 여기서 무게함수는 $1/D^2$ 을 사용하였다.

3. 퇴적물 모니터링 분석

3.1 유역의 유실량 산정

토양침식으로 포장 또는 지표에서부터 유실된 유사의 총량을 토양유실량이라 하며, 이는 이탈, 이동, 퇴적 등에 의한 토립자의 실제 이동량에 해당한다.

GIS를 이용한 토양유실량 산정에 관하여 다양한 연구들이 진행되고 있으나 아직까지 실제 지형을 정확하게 표현하는 방법은 없으며 토양유실량의 정량화 역시 강우로 인한 토양침식량을 유역전체에 대해 실험하기에는 너무 많은 비용과 시간이 소요되므로 어려운 상태이다.

따라서 본 연구에서는 항공 LiDAR 데이터를 이용하여 실

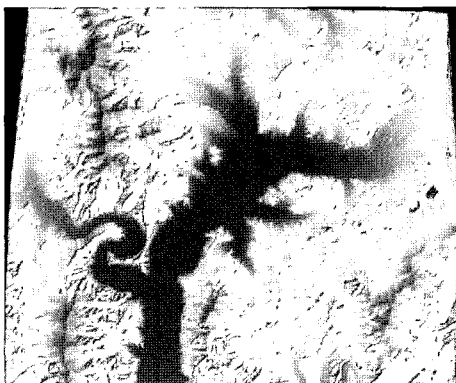


그림 10. 항공 LiDAR 자료에서 생성한 DEM

제지형을 정확하게 표현하며 우리나라 지역 관측소별로 약 10년에 걸쳐 구축된 R값(대상지역의 경우 400)을 연구지역에 동일하게 적용하였다. 또한 토양의 유실량을 정량화하기 보다는 유역전체에 걸쳐서 분산형으로 산정하여 유역 내에서 상대적으로 토양유출 발생이 많은 위치를 제시하고자 하였다.

토양의 유실량의 계산은 USLE에 의하여 요소별 값들의 승법(곱셈)연산을 통하여 계산되며, 그 값이 높을수록 토양의 유실이 많은 지역으로 분석된다. 토양의 유실에 영향을 미치는 요소를 정리한 USLE의 구성은 기본적으로 토양의 유실이 일어나는 각 구성요소를 정량화하여 특성 값을 제시하는데 효율적으로 사용 할 수 있다.

본 연구에서는 연구지역내 USLE 공식을 이용하여 토양의 유실량을 산정하고 결과로 산출된 평균값을 기준으로 퇴적물의 유입 가능성이 큰 위치를 파악하는데 목적이 있다. 따라서 산술적인 수치로서 토양 유실량을 산정할 뿐만 아니라 연구지역 전반에 걸친 토양유실 가능성을 판별해 보고자 하였다.

3.1.1 토양침식인자 산정

토양의 유실과 관계가 깊은 토양의 특성은 두 가지로 생각할 수 있는데 그 하나는 강우에 대한 토양의 투수성이며 다른 하나는 강우나 유거수에 대해 분산되는 성질이다. 강우가 토양에 침투되는 능력은 토양의 공극상태, 강우시 토양 수분 함량, 토양의 배수성 등에 따라 다르다.

우리나라는 포장실험을 통해 Wischmeier의 공식과의 유의성이 검증되었고 이 Wischmeier의 공식을 이용하여 주로 경사지에 분포하며 침식의 우려가 되는 83개 토양통에 대한 K값을 계산하였다. 표 2는 토양별 토양침식인자

표 2. 토양별 토양침식인자

토양통명	K값	토양통명	K값	토양통명	K값
수암	0.22	상주	0.21	마지	0.32
덕산	0.29	임동	0.48	봉계	0.31
관악	0.11	반호	0.42	달천	0.39
낙서	0.31	백산	0.27	각하	0.18
행산	0.30	장원	0.37	광주	0.21
장성	0.21	신불	0.15	곽산	0.31
정자	0.33	월정	0.05	정남	0.38
도산	0.06	장항	0.10	진곡	0.31
도계	0.14	오대	0.07	신혜	0.36
입석	0.11	안룡	0.37	송정	0.13
오산	0.24	부여	0.31	태화	0.40
울산	0.51	반천	0.31	대흥	0.30
성산	0.28	장평	0.35	논산	0.30
이산	0.20	평안	0.34	완산	0.20

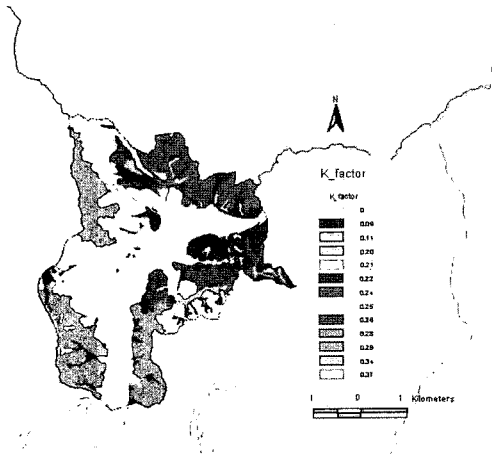


그림 11. 대상유역의 K값 분포

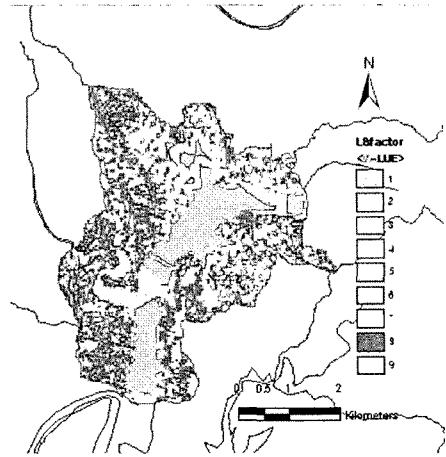


그림 12. 대상유역의 LS값 분포

자에 대한 일부분이다.

토양침식인자 K값의 분포를 알아보기 위해 농어촌연구원에서 만든 축척 1:25,000 정밀 토양도를 이용하였으며 분석결과 연구지역의 K값은 0.06~0.37의 범위를 보이며 평균값은 0.188이었다. 표준편차는 0.103으로서 그다지 크지 않으며 이는 연구지역내 K값의 분포가 대체로 큰 차이를 보이지 않음을 의미한다. 그림 11에 나타난 바와 같이 하천주변의 산지에서 K값이 크게 나타나고 지표면으로 암반이 노출되어 있거나 토양층이 얇게 피복된 일부 능선과 그 사면에서 매우 낮은 값을 보인다.

3.1.2 지형인자 산정

지형인자(LS factor)는 경사도(S)와 경사길이(L)가 토양유실에 미치는 영향을 설명하는 인자로서 경사도와 경사길이가 클수록 큰 값을 가진다. LS값은 Foster and Wischmeier에 의해 제안된 산정공식이 주로 사용되어왔으나 이 공식은 평탄 경사의 조건하에서 유도되었고, 이 조건하에서도 상당한 변동이 존재하는 모순을 갖는다. 위와 같은 문제점을 개선하고 ESRI사의 GIS용 프로그램인 ArcView로 LS값을 산정할 수 있도록 1999년 Bernie Engel은 Moore and Burch의 방법을 구현하였으며 본 연구의 LS값 계산에 식 (1)을 사용하였다.

$$LS = (\text{flowaccumulation} \times \text{cellsize} / 22.13)^{0.3} \times (\sin \text{slope} / 0.0896)^{1.3} \quad (1)$$

토양유실에서 사면길이 및 지형경사는 항공 LiDAR 시스템에서 획득한 포인터 데이터를 이용하여 지형분석을

통해 이루어졌으며, 격자구조의 cell 크기는 1m로 하여 사용하였다. 이를 기본도로 Moore and Burch 방법을 적용하여 분포형태를 파악하였다.

분석결과 지형인자 LS값은 0.152~12.9의 범위에 분포하며 평균값은 1.895이었다. LS값의 표준편차는 2.41로서, K, P, C의 표준편차와 비교할 때 현저히 높은 값을 나타내었다. LS값을 분석한 결과 그림 12와 같은 분포를 보였으며, 고도가 높고 경사가 급한 산사면에서 높게 분포하며 대부분은 평균값과 근사한 수치로 나타났다.

3.1.3 식생피복인자 산정

토지피복인자(C factor)는 경사지의 피복상태, 식생종류, 식생상태, 생육정도 등의 복합적인 조건에 대한 토양유실량의 영향을 나타낸 것으로, 본 연구에서는 미국지질조사국(USGS: U. S. Geological Survey)의 연구 내용(Anderson, 1976)을 기초로 분류된 대분류(논경작지, 식생지, 초지, 거주지, 물)의 토지이용현황을 토대로 미국농무성에서 산출한 C값을 연구지역의 토지이용에 맞도록 일부 수정하여 각각의 식생피복요소에 대한 값을 설정하였다. 또한 대상지역의 식생피복을 결정하기 위해 항공 LiDAR 시스템에서 획득한 반사강도를 이용하여 논, 밭, 산림, 도심, 나지, 물 항목으로 분류하였다. 표 3은 피복분류에 따른 C값을 나타낸 것이다.

분석결과 식생피복인자 C값은 0~0.4의 분포를 보이며 평균값은 0.115, 표준편차는 0.174로 나타났다. 최대값 0.4에 대해 평균값이 다소 높게 분포하며 하천주변의 평지뿐만 아니라 유역 산사면에서도 높은 값을 보이는 경향

표 3. 분류항목에 따른 식생피복인자

Land-use condition	C factor (USDA)
Field	0.4
Rice field	0.3
City	0
Bear Soil	0.1
Loose Forest	0.1
Dense Forest	0
Water	0

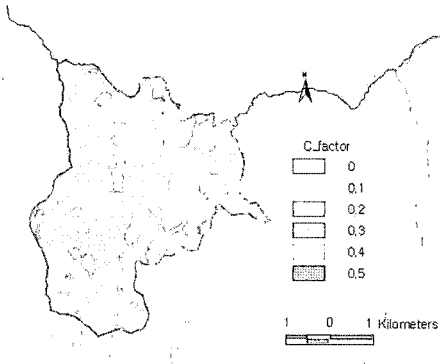


그림 13. 대상지역의 C값 분포

이 있었다. 특히 하천주변의 경작지에서 높은 값을 나타내었다. 그 분포는 그림 13과 같다.

3.1.4 토양보존인자 산정

토양보존인자(P factor)는 지표면상의 경작지 형태에 따른 토양침식의 비율이다. 경사면에서 등고선 경작(Contouring planting), 등고선 대상 경작(Strip cropping), 계단 경작(Terracing) 및 그들의 복합적 형태 등이 토양유실에 미치는 영향을 고려한 인자이다. 본 연구지역의 경작형태는 일부지역을 제외하면 대부분 평지보다는 다소 경사가 있는 지역이 많으며 밭으로 사용되는 면적이 넓다고 할 수 있다.

토양보존인자는 지형경사가 고려될 때 의미를 갖게 되는데 P값의 경사 분포에 따라 미국 농무성(USDA, 1978)의 연구에 의하여 경험적으로 개발된 값으로 토양보존에 대한 P값은 표 4와 같으며, 적용결과 0.4~0.9의 범위의 분포와 0.72의 평균값을 나타내었으며 하천 주변의 평지에서는 평균값 이하의 분포를 보였다. 그림 14는 토양보존인자의 분포를 나타낸 것이다.

3.1.5 토양유실량 산정

연구지역에서 R, K, LS, C, P 인자에 대한 값을 산정하고

표 4. 지형경사에 따른 토양보존인자

Slope (%)	Contour factor (USDA)	Strip crop factor (USDA)
1~2	0.4	0.30
3~8	0.5	0.25
9~12	0.6	0.30
13~16	0.7	0.35
17~20	0.8	0.40
21~25	0.9	0.45

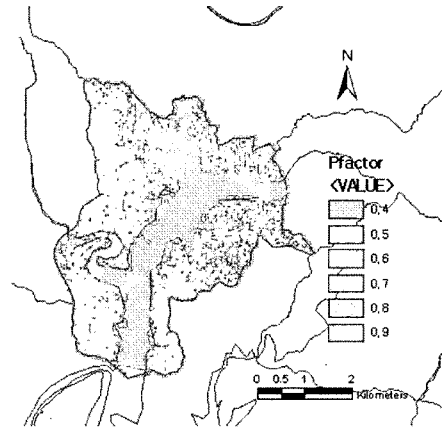


그림 14. 대상지역의 P값 분포

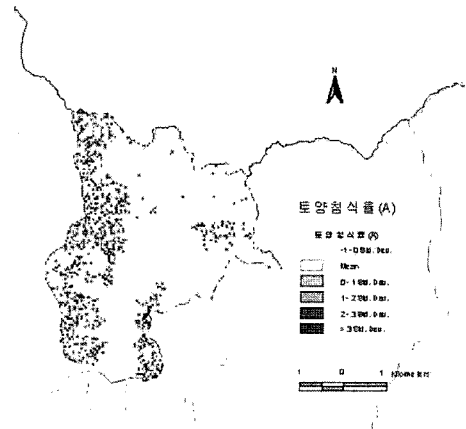


그림 15. 대상지역의 A값 분포

USLE 공식을 이용하여 계산한 결과, 토양유실량(A)은 0~25kg/m²/year의 값 분포를 보이고 평균값은 0.46kg/m²/year로 나타났다. 표준편차는 1.548으로서 각 인자값을 이용하여 계산한 토양유실량 결과가 지역에 따라 매우 상이하게 평가되었다. 토양유실량 산정결과를 유입가능성 위치로 비교해 본 결과 퇴적물 유입이 주로 이루어지는 위치

는 서쪽 산사면으로 이 부근에서 침식이 가속화 되는 것으로 평가되었다. 그림 15는 품곡천 유역에 대한 A값의 분포상황을 나타낸 것이다.

3.2 퇴적물의 유입경로 분석

퇴적물은 주로 토양에 대한 강우 및 바람의 작용에 의해 유입되는데, 우리나라의 하천에서는 여름의 홍수기에 많은 토량이 집중적으로 유입되므로 강우에 의한 유입 메커니즘을 알아보았다.

강우에 따라 발생하는 토양유실은 농경지의 비옥한 표토를 유실시켜 생산성의 저하와 농경지의 황폐화를 초래하고, 유실된 토양입자는 하천이나 호수, 댐 등에 퇴적되어 저수용량의 감소와 수리구조물의 기능을 저하시킨다. 또한 토지 개발시에는 지형특성 및 토지이용의 변화에 따른 유입 경로의 변화가 예상되므로 사전에 이에 대한 대비를 해 둘 필요가 있다.

퇴적물의 유입은 토립자의 이탈, 유사이동 그리고 퇴적의 기본적 과정의 결과이다. 이들 과정은 많은 인자에 의하여 지배된다. 특히 지형적인 특성은 토양 유입경로를 예측하는데 매우 중요한 인자이다. 경사가 전혀 없는 평지에서는 침식은 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 토양이 약간의 경사만 있어도 토양유실량은 심각하다. 경사가 급한 곳에서는 유거수의 속도가 증대되기 때문에 유입량은 매우 많아지며 또한 경사장이 길거나 경사폭이 넓은 곳은 유거수의 집중으로 역시 심한 토양유실이 일어나게 된다. 그림 16에서 보면 경사장이 5m, 10m, 및 15m로 증가함에 따라 토양유실량은 경사도 10%와 20%에서는 완만하게 증가하였으나 30% 경사에서는 그 폭이 급증하였다. 그러나 경사도가 10%, 20% 및 30%로 증가함에 따라 토양유실량은 증가하였으나 경사장간의 토양유실량의 폭은 경사도의 경우보다 적었다(신방웅 등, 2001).

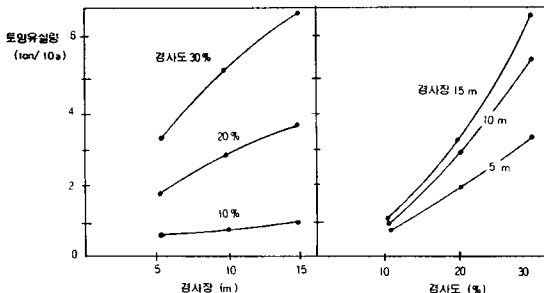


그림 16. 경사도 및 경사장별 토양유실량

또한 우리나라 하천에서는 여름의 홍수기에 단기간에 많은 토량이 집중적으로 유출되는 것으로 알려져 있기 때문에 수로화된 흐름의 발생으로 심각한 자연재해로까지 발전할 가능성이 높다. 또한, 신방웅 등이 연구한 결과로는 수로화된 흐름형성은 주로 경사가 10%이상인 사면이 75m이상인 경우 시작될 수 있었다. 표 5는 유역조건에 따른 퇴적물의 발생정도를 추정한 것이다. 사면 길이, 경사, 흐름상태, 피복상태 등은 집중된 흐름 가능성을 결정하는 인자이다.

수로화된 흐름은 강우에 의해 토립이 분리되어 면상침식(sheet erosion), 세류침식(rill erosion), 그리고 협곡침식(gully erosion)의 단계를 거쳐 일어나는 것이 보통이다.

면상침식은 일반적으로 강우의 강도가 약한 조건하에서 토양표면이 평탄해야 되므로 수로가 없는 흐름으로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 세류침식은 일반적으로 강우강도가 강한 조건하에서 유출수가 증가함에 따라 표토에 작은 골짜기를 만들며 침식되는 것이다. 세류침식에 의한 토양의 이동 속도는 30cm/sec 이상이며, 경사장 및 경사도가 증가할수록 그리고 강우속도가 증가할수록 그 속도가 빨라진다. 협곡침식은 토양침식정도가 세류침식보다 크게 나타나는 것으로 강우침식, 수로침식, 결빙과 해빙의 상호작용에 의한 침식 등 3가지 작용 가운데 한가지 이상의 침식작용에 의해 협곡이 이루어지며 골짜기는 깊이에 따라 대(5m), 중(1~5m), 소(1m 이하)로 분류된다. 협곡침식은 완경사지에서 크게 문제되지 않으나 우리나라에서는 하기집중강우와 급경사지가 많으므로 사전 방지대책이 요구된다.

따라서 이러한 인자를 광범위한 지역에 대해 정확하게 산출할 수 있다면 유입되는 퇴적물의 경로분석에 신뢰성을 기할 수 있다.

본 연구에서는 정확한 지형을 표현하는 항공 LiDAR

표 5. 유역조건에 따른 퇴적물 발생 정도

유역 조건	낮은 유입량	중간 유입량	높은 유입량
퇴적 유입량	< 1,000 kg/ha	1,000 ~ 10,000 kg/ha	> 10,000 kg/ha
사면 길이	< 50m	50 ~ 100m	> 100m
사면 경사	1 ~ 5%	5 ~ 15%	> 15%
토지 관리	경작하지 않음	띠, 등고선 경작	등고선을 따르지 않는 전통 경작
흐름 상태	면상 침식	작은 세류	세류와 협곡

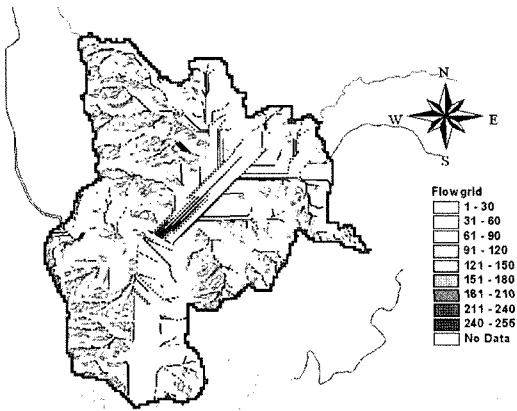


그림 17. 대상유역의 수로망

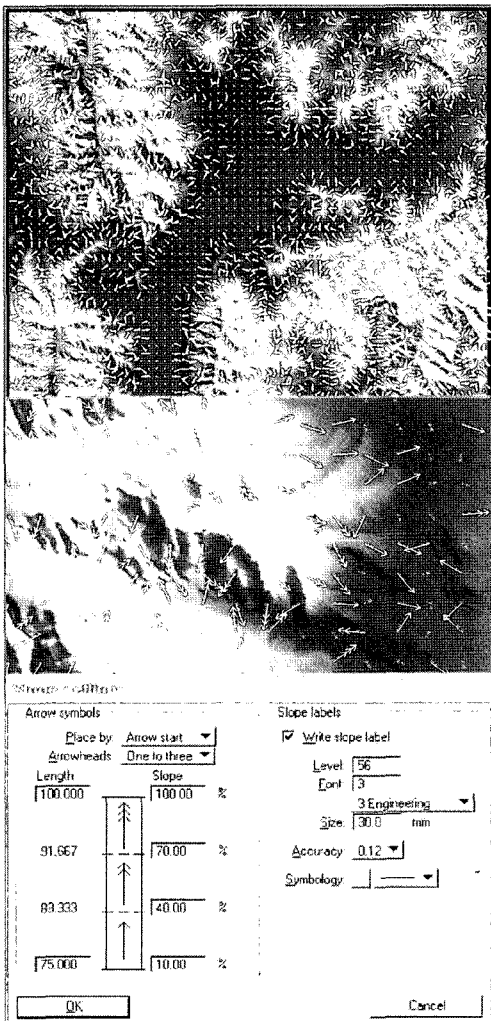


그림 18. 퇴적물의 유입 경로

기술을 활용한 것으로 지형적인 특성과 흐름 상태를 종합 분석하여 강우에 의한 퇴적물의 유입경로를 추적 하였다.

항공 LiDAR 측량에서 획득한 3차원 공간정보를 퇴적물이 유입되는 근원지 및 경로 추적에 이용하기 위해 본 연구에서는 DSM과 이를 필터링후 3차원 객체를 제거하고 생성한 DEM을 ArcGIS 프로그램(3D and Basin Analyst)에 입력하여 수로화된 흐름의 유로 추적에 대한 공간분석을 하였다. 세류와 협곡에 의해 발생한 수로 추적에 대한 분석 결과는 그림 17과 같다.

정밀한 고도 데이터를 이용한 유입 경로 분석은 유역의 전체적인 흐름경향을 계산한 다음 누적흐름의 방향을 검색하여 수로를 추적하게 된다. 이 누적 흐름 중 저차수의 유로를 Map Calculator를 이용하여 제거하고 나머지 수로를 차수별로 분석하면 세류와 협곡침식에 의한 수로망을 추출할 수 있다. 10%이상의 경사와 75m이상의 사면길이를 추출하여 유입 방향과 크기를 표시하면 그림 18과 같다.

4. 결 론

유역의 퇴적물 유실 메커니즘을 알아보기 위해 항공 LiDAR 기술을 이용하여 정밀 DEM을 생성하고 퇴적물 거동을 모니터링한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 퇴적물의 외부 유입이 많은 지형을 대상으로 높은 점밀도를 유지하면서 항공 LiDAR 측량을 수행하고, 기존의 TIN모델의 단점을 보완하는 Pseudo- Grid 알고리즘을 적용함으로써 데이터 처리 속도와 정확도가 향상된 신뢰성 있는 고정밀 DEM/DSM을 얻을 수 있었다.

2. 토양유실인자 K, LS, C, P값을 산정하고 USLE에 적용하여 토양유실량을 분석한 결과 대상지역의 연평균 유실량은 $0.46\text{kg/m}^2/\text{year}$ 임을 알 수 있었다. 또한 GIS 기술을 이용하여 토양유실에 영향을 주는 토양, 피복, 지형 특성을 보다 세밀하게 분류함으로써 유실되는 퇴적물의 정확한 분포량과 유입 위치를 파악할 수 있었다.

3. 정확도가 향상된 고정밀 DEM을 이용하여 수로화된 흐름을 추적함으로써 퇴적물의 유입경로 분석에 신뢰성을 유지할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 한국환경기술진흥원의 차세대핵심 환경기술개발사업(과제번호: 103-041-014) 성과의 일부로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 강준목, 강영미, 이형석 (2004), 도심의 정밀 모니터링을 위한 LiDAR 자료와 고해상영상의 융합, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 한국측량학회, pp. 383-388.
- 김양수, 박무중, 박덕근 (1998), 토사유출량 산정기법의 적용성 분석, IHP 연구보고서, 1998.
- 서정현, 조우석, 박홍기, 임삼성 (2000), 항공레이저측량을 이용한 지형정보 제작에 관한 연구, 국토지리정보원.
- 신계중 (1999), 지형공간정보체계를 이용한 지역의 토양유실분석, 강원대학교 박사학위논문.
- 신방용, 김홍택 (2001), 표토보전 및 침식(유실)방지대책에 관한 연구, pp. 29-59.
- 조우석(2003), 레이저 스캐닝 데이터를 이용한 수치표고모델 생성, 인하대학교.
- Hans-Gerd Maas and George Vosselman (1998), Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 153-163.
- Michel Morgan and Ayman Habib (2002), Interpolation of lidar data and automatic building extraction, 2002, *ACMS-ASPRS 2002 annual conference proceedings*.
- Moore and Burch (1986), Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 50, pp. 1294-1298.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Wessies, G.A., McCool, D.A. and Yoder, D.C. (1993), Predicting soil erosion by water; A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), U.S. *ARS Publication*.
- Sithole, G., Vosselman, G. (2003), test on extracting DEMs from point clouds: a comparison of existing automatic filters, *ISPRS Technical Report*, pp. 93-99.
- Vincent Tao, C., Yong Hu (2001), A review of post-processing algorithms for airborne LiDAR data, *Proceedings of the ASPRS Annual Conference*, April, pp. 23-27.
- Wehr, A. and Lohr, U. (1999), Airborne Laser Scanning - an introduction and overview. *ISPRS Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 54 (NOS. 2-3), pp. 68-82.
- Wischmeier, W.H. and D. D. Smith (1978), *Predicting rainfall erosion losses, Agricultural Handbook 537*, U.S. Depart. of Agric.
- Yong Hu, C. Vincent Tao (2004), hierarchical recovery of DTM from single and multiple returns LiDARdata, *Proceedings of the ASPRS Annual Conference*, April.

(접수일 2005. 12. 8, 심사일 2005. 12. 20, 심사완료일 2006. 2. 20)