

토석류 산사태 피해지의 규모에 관한 연구

A Study on Scale at a Debris Flow Landslide Damaged Area

신 성 식* 최 영 남** 유 남 재***
Sin, Sung-Sick Choi, Young-Nam Yoo, Nam-Jae

Abstract

In this study characteristics of debris flow landslide were investigated on the focus of debris flow disaster occurred by heavy rainfall in 2013 at Goeun-ri around Kaeryoung Mt. in Chuncheon-si.

Appropriate method for estimating scale of debris flow was investigated by comparing those values from soil loss by Universal Soil Loss Equation, debris flow yield rate obtained by field survey of investigating debris flow path from initiation and erosion to deposition and other methods. As results of this study, it might be an opportunity of contributing to construct the data base for determining the size of erosion control facilities in future.

키워드 : 토석류 산사태, 범용토양손실공식, 토석류 유출량, 토석류 발생량 산정식
Keywords : *debris flow landslide, Universal Soil Loss Equation, magnitude of debris flow, equation for estimating scale of debris flow*

1. 서론

우리나라 연평균강우량의 2/3이상이 여름철에 집중되며, 국토 전체의 70%이상이 산지로 구성되어 여름철 집중호우에 의한 산사태 및 토석류에 매우 취약하며, 이에 대한 피해가 증가하고 있다.

소방방재청의 재해연보 자료에 나타난 것처럼 2008년~2011년까지 우리나라에서 발생한 자연재해와 사면재해로 인한 인명 및 재산피해 현황을 비교한 결과, 자연재해 복구금액은 해마다 증가하여 2008년 대비 2011년도의 복구 금액은 약 12.5배로 크게 증가한 것으로 나타났으며, 사면재해로 인

한 복구금액도 전체 자연재해 복구금액 대비 연평균 약 21.3%로 매년 증가하고 있는 것으로 나타났다. 또한 자연재해 사상자 수는 매년 증가추세에 있으며 특히 2011년에는 2008년 대비 약 7배(총 78명)의 많은 사상자 수를 기록하였다(황현근 등, 2013). 이처럼 자연재해의 증가로 인해 자연재해에 대한 예측 및 예방에 대한 관심이 높아지고 있다.

산사태 재해방지기술에 있어서 발생 규모에 대한 예측은 매우 중요한 사항이며, 발생규모는 구성토질, 강우강도, 사면길이, 경사, 침식깊이와 관련이 있다. 이러한 여러 인자들과 규모의 상관성을 정량적으로 나타내어 고려할 수 있다면 실제 규모를 예측하는데 있어 좀 더 정확한 값을 유추해 낼 수 있을 것이다.

발생규모에 대한 예측 즉, 토사량 산정과 관련하여서는 범용토양손실공식과 침식율에 의한 토석류 유출량 산정 방법이 있으며, 현장조사를 통한 토석류 발생지와 퇴적지간의 토석류 이동경로를

* 유성환경건설 대표이사
** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자

조사한 결과를 바탕으로 침식율에 의한 토석류 유출량 산정 방법이 있다. 따라서, 본 연구에서는 2013년 강원도 춘천시 고은지구에서 발생한 산사태 피해를 대상으로 토사유출량을 분석하여 토석류 발생 규모예측에 관한 비교 분석을 실시하였다.



그림 1 대동산 일대 산사태 발생 현황 및 조사경로

2. 이론적 배경

2.1 토석류 침식량 산정식(토사유출량 방법)

토사유출량이나 토양유실을 예측하거나 산정하기 위해서는 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE: Wischmeier and Smith, 1978), USLE 기반 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control(SATEEC: 임경재 등, 2007)이나 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE; Renard et al., 1997)이 전 세계적으로 널리 이용되어 왔다. USLE는 연간 침식과 토사유출량을 강우의 함수로 예측한다. 반면, MUSLE에서는 유출량의 함수로 사용하며 이는 토사유출량 산정을 개선하고 개개의 강우사상에 적용이 가능하게 한다. 토양에서 유출되는 토사유출량은 하천으로 유입하여 하천에 퇴적이 되거나 유역출구를 통하여 유역에서 빠져나가게 된다. 퇴적 및 침식은 하천에서의 토사물질의 이송을 조절한다. 또한, SWAT 모형의 경우 SWAT ArcView GIS Interface는 경사가 급한지형에 적합하지 않은 것으로 알려져 있어서 경사가 급한 유역에 기존의 SWAT을 적용할 경우 예측 토양유실량이 적게 모의되는 경향이 있다(박윤식 등, 2008). 따라서 USLE 기반의 SATEEC(임경재 등, 2007)을 이용하여 지형여건에 맞는 토양 유실량(토사발생량)을 결정하였다.

SATEEC 시스템은 그림 2에서 보이는 바와 같이 USLE 모형의 입력자료와 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 통해 경사장·경사도인자만을 이용하여 대상 지역에서의 토양 유실 및 유사량을 모의할 수 있다.

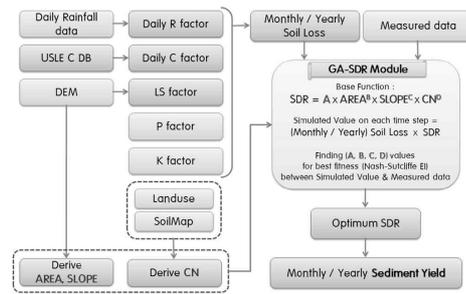


그림 2 SATEEC 시스템 개요도

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

여기서, A : average annual soil loss
(ton/ha/year)

R : rainfall/runoff erosivity

K : soil erodibility

LS : slope length and steepness

C : cover management

P : support practice

2.2 경험식에 의한 토석류 유출량 산정

토양유실에 의한 토사량 산정방법은 면상침식 및 세류침식에 의한 장기간의 연평균 토양유실량을 예측하기 위한 것으로 실제로 토석류가 발생하였을 경우 유역면적의 전체적인 토양유실이 아닌 토석류 발생지와 침식이 되어 이동되는 경로까지의 토양유실량이 실제 토사량이기 때문에 위의 식들과는 차이점이 있다. 따라서, 토양유실량을 통한 산정방법(SATEEC모형)이 아닌 선행 연구자들은 토석류 산정을 위한 식을 제안하고 있다.

먼저 강우인자 경사, 배수면적, 산불지수를 이용한 MSDPM, 토사유출 예측모형으로서 경험적 회귀모형인 SEMMA, 홍수시 토사유출량 산정법, Marc i L. and D'Agostino V.(2004)의 토석류 침식량 산정식, Rickenmann and Koschni(2010)등 여러 가지 토석류 산정식들이 있다.

토사유발강우, 배후유역, 지형조건 등을 고려한 MSDPM(Multi-Sequence Debris Prediction Model)은 박윤식(2008)의 USCDPM(University of Southern California Debris Prediction Method)법과 박윤식과 임경재(2008)의 수정 보완 방법 등이 있다. 수정된 MSDPM은 상대적으로 소규모 산지 유역(약 25~250 ha)을 위한 토석류 침식량 예측모형으로 개발되어졌다. MSDPM(박윤식 등, 2008)은 산불데이터, 강우데이터, 그리고 채취한 토석류 침식량 데이터 등을 이용하고 통계적 기법을 사용하여 경험식 식 (2)를 아래와 같이 개발하였다.

$$\sum_{i=1}^N (D_y)_i = \lambda 0.25 \sum_{i=1}^N \left[1 + \frac{|(I_m)_i - I_c|}{((I_m)_i - I_c)} \right] 1 + \frac{|(P)_i - P_c|}{((P)_i - P_c)} \quad (2)$$

$$(I_m)_i^{0.541} S^{0.134} A^{1.023} e^{0.29F}$$

여기서, D_y 는 토사량(m^3), I_m 은 최대 1시간 강우강도(Maximum 1-hr rainfall intensity, mm/hr), I_c 는 토사 유발 강우강도(Threshold maximum 1-hr rainfall intensity, mm/hr), P 는 총 강우량(mm), P_c 는 토사 유발 강우량(Total minimum rainfall amount, mm), S 는 지형기복비(Relief ratio, m/km), A 는 배수면적(ha), λ 는 본 연구에서 추가한 보정계수 (correctional coefficient)이다. 그리고 F 는 무차원 산불지수 (Non-dimensional fire factor)이다.

유역면적, 유역경사, 경사길이 인자와 토석류 침식량의 관계를 이용한 Marchi(2004)는 이탈리아 북부 알프스에서 발생한 127개의 토석류데이터를 중심으로 토석류 침식량 회귀식을 개발하였다. 이탈리아 북부 알프스의 연평균강수량은 500~600mm로서 적은 양의 강우가 내리는데 비해 토석류 발생년도에 연평균강수량은 1500~2000 mm, 많은 곳은 3000 mm 강우량이 넘게 내려 많은 토석류가 발생하였다. Marchi(2004)의 토석류 침식량 회귀식은 식 (3)과 같다.

$$M = 65000A^{1.35}S^{1.7} \quad (3)$$

여기서, M 은 총 토석류 침식량이며, A 는 유역면적(km^2) 그리고 S 는 유로평균경사(m/m)이다.

또한, Marchi(2004)는 유출량 부피와 유로평균경사의 관계를 이용한 토석류 침식량 회귀식을 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$M = V_r(\alpha S^\beta) \quad (4)$$

여기서, V_r 는 유출량의 부피이며 α 는 1.6~2.9 사이의 값, β 는 2값을 사용한다.

Rickenmann and Koschni(2010)는 2005년 8월 21~23일 동안 스위스 북부알프스지역에서 발생한 70개의 토석류 데이터를 중심으로 경험적인 토석류 침식량 산정식을 개발하였다. 이 기간 동안 내린 3일선행강우량은 200 mm 이상이 왔으며 이는 강우 재현빈도 100년이 넘는 것으로 조사되었다.

Rickenmann and Koschni(2010)은 토석류 침식량 산정식을 두 개의 식으로 제안하였다. 한 가지는 유역면적과 유로평균경사와의 관계를 이용하여 산정식을 제안하였고 또 다른 식은 유역면적, 유로평균경사, 암석 및 지질과의 관계를 이용하였다. 다음 식 (5)는 유역면적과 유로평균경사의 관계를 이용한 산정식이다.

$$M = 16378 \times A_c^{1.35} \times S_c^{1.7} \quad (5)$$

여기서, A_c 는 유역면적(km^2)이고 S_c 는 유로경사

평균(%)이다.

식 (5)는 Marchi(2004)와 비교하였을 때 앞의 계수값의 차이뿐 다른 차이점은 없었다. 이는 Marchi(2004)의 경험식을 스위스 토석류 발생지역에 맞는 경험식을 개발한 것으로 판단된다.

또한, 유역면적, 유로평균경사, 암석 및 지질과의 관계를 이용한 산정식 식(6)을 제안하였다.

$$M = 5107 A_c^{1.16} S_c^{1.3} I_{gv} \quad (6)$$

여기서, A_c 는 유역면적(km^2)이고 S_c 는 유역경사 평균(%), I_{gv} 는 암석 및 지질을 나타내고 있다.

3. 연구 대상지 현황

대룡산 일대는 2013년 7월 그림 3과 같이 토석류가 발생하였으며, 계곡부를 따라 토사가 침식 및 퇴적하며 이동하였다. 현장 조사는 침식이나 퇴적이 발생한 계곡부를 따라 이동하면서 스태프(STAFF), 클리노미터(Clinometer), 거리측정기, GPS 등을 이용하여 발생사면의 GPS좌표, 경사, 폭, 길이, 방위, 지형형상 등에 대해 실제 발생지의 제원을 측정하였다.

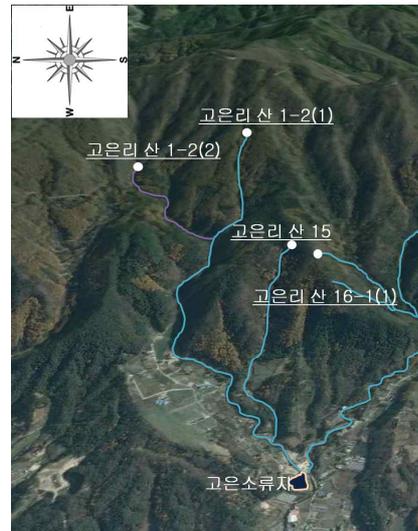


그림 3 대룡산 일대 산사태 발생 현황 및 조사경로

고은리 산 1-2(1), (2)와 고은리 산 15, 고은리 산 16(1)~(3)에서 발생한 토석류는 계곡부를 따라 침식 및 퇴적을 하며 흘러 내려와 고은소류지에 최종 퇴적된 것으로 보인다. 또한, 상대적으로 계곡부 보다 경사가 완만한 하천에도 토석이 퇴적된

것이 관찰되었다.

1호지의 경우 산사태가 시작된 발생부는 대룡산(해발 895 m) 기준 7부 능선에 해당되는 해발 670 m 계곡부에서 발생된 것으로 확인되었다. 발생부 주변은 상부에서 유입된 것으로 추정되는 자갈 섞인 실트질 모래가 선상지 형태로 퇴적되어 있으며, 퇴적층 경사는 10~20° 자연비탈면 구간 경사는 30~40°, 퇴적층의 최대폭은 30 m로 측정되었다. 발생부의 파괴형상은 집중호우에 의해 포화상태에 도달한 지층내 토석류 자체가 흘러내린 형태를 보이며 지층의 경사는 30°, 발생규모는 폭 15 m, 높이 10 m로 측정되었다.

이와 같이 고은 1호지는 국내에서 발생한 산사태의 발생위치 현황(6~7부능선, 30~45°경사)과 유사한 조건에서 발생된 것으로 평가된다. 또한 발생부를 시점으로 하류방향 퇴적층 구간에서 광범위하게 세류침식이 진행되며, 특히 사면부와 퇴적층 양측 경계를 따라 구곡침식(Gully erosion)이 두드러진 것으로 나타났다.

발생부로부터 200 m 하류지점에서 양안의 구곡침식이 합류되면서 기반암까지 침식이 진행되는 실질적인 토석류 거동을 보이며, 침식규모는 폭 5.0 m, 깊이 1.8 m로 점진적으로 침식이 확대되는 것으로 나타난다. 이후 수리적 거동에 의해 이송된 토석류는 발생부로부터 800 m지점에서 퇴적되며, 본 지점은 지형적으로 완만하며 주변에 수 m 이상 입경을 지닌 거석들이 분포하고 있어 지형적인 영향이 큰 것으로 나타난다.

하류 구간의 경우 주변 계곡부에서 합류된 유량 증가로 인해 홍수 또는 수리적 거동에 의한 하상 세굴이 발생되어 토석류 이송이 발생된 것으로 추정된다.

2호지의 경우 계곡부 상류에서 일반적인 토석류의 발생부 형상은 확인할 수 없었으나, 계곡부에서 구곡침식이 진행된 이래 계곡주변의 사면이 유실된 후 사태물질이 계곡부로 유입되어 2차적으로 계곡부의 벽과 바닥을 침식시키면서 계곡을 따라 이동하는 형태의 수로형 토석류(Channelized debris flow) 형태와 유사한 형태를 보이고 있다. 시점부에서 930 m 하부에 위치한 지점에서는 침식이 가속화되어 기반암이 노출되었으며, 누적된 토석류는 어느 지점에서 하천방향이 변경되면서 가옥주변 부지로 다량의 토석류가 유입 퇴적되었다.

이후 하류구간의 경우 수리적 거동에 의한 세굴 침식이 진행되며, 하천 중심부에서는 세굴이 발생하였으며, 세굴이 발생한 단면폭은 평균 5 m로 나타났으며, 외측으로 수로내 부분 퇴적인 발생되었다. 하천 폭, 방향, 거석의 위치에 따라 하천의 흐름이 변화되며 불규칙적인 세굴특성을 보이며, 최종적으로 1호지와 합류되어 하류에 위치한 고은리 소류지에 퇴적되는 형태를 보이고 있다.

4. 토사유출량 산정결과

4.1 유출량 산정

USLE법의 SATEEC 모형을 이용한 토사유출량은 표 1과 같으며, 1호지는 14,729 m³/year/st. 2호지는 2,392 m³/year/st.로 나타났으며, 그 외에 원단위법 및 수정범용토양손실량공식(RUSLE)의 연평균 토사량과 단일호우에 의한 토사량을 추가로 산정해 보았다.

표 1 유출량 산정 비교

구분	1호지	2호지
유역면적(km ²)	1.45	0.28
원단위법(m ³ /year/st.)	15,150	3,110
연평균(m ³ /year/st.)	4,449	705
단일호우(m ³ /storm/st.)	10,158	1,609
USLE의 SATEEC모형(m ³ /year/st.)	14,729	2,392

4.2 경험식에 의한 토사유출량 산정 결과

MSDPM, Marchi(2004)의 토석류 침식량 산정식, Rickenmann and Koschni(2010)을 이용하여 토사유출량을 계산한 결과는 표 2와 같이 나타났다.

1호지는 Marchi(2004)_1의 산정식이 다른 산정식들 보다 약 3.5~4배 많은 양이 산정되었으며, 2호지의 경우 Marchi(2004)의 식들이 비슷하게 나타났으며, 다른 식들보다 1.5~4.5배 많은 것으로 나타났다.

표 2 침식율에 의한 토사량 값 (단위:m³)

구분	MSDPM	Marchi		Rickenmann and Koschni	
		1	2	1	2
1호지	4,207	14,732	3,644	3,712	3,521
2호지	657	1,040	1,174	262	367

4.3 현장조사를 통한 침식량 산정

그림 5는 토사유출량을 통해 산정한 1, 2호지의 위치와 현장조사를 통해 토사침식량을 산정하기 위한 조사 구간을 나타낸 것이다. 1호지에 해당하는 부분은 고은리 산 1-2(1), (2)이고, 2호지는 고은리 산 15이다.

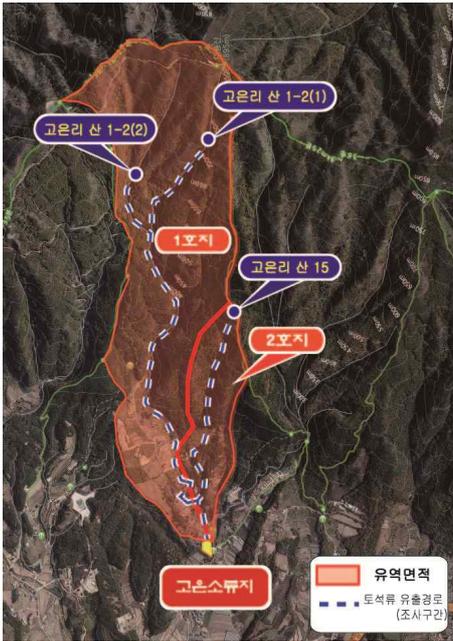


그림 4 1, 2호지와 유출량 조사 구간 비교

현장조사 구간의 전체 경로는 그림 5와 같이 3가지 경로이며, 고은리 산1-2(1) 경로와 고은리 산 1-2(2) 그리고 고은리 산 15가 토사가 침식된 계곡 구간이다.



그림 5 현장 조사 구간 개요도

조사 당시 527 point부터 고은소류지의 구간은 공사가 진행 중에 있어 조사가 되지 못하였다. 그

러나 공사구간은 개천으로 경사가 완만하고 토사의 침식 보다는 퇴적된 구간으로 침식량 산정에는 고려하지 않아도 될 것으로 판단되어 침식량 산정시 고려되지 않았다.

고은리 산 1-2(2)구간의 시작점(415 point)으로부터 합류점인 480 point의 경사는 4~19°로 전체적으로 완만한 경사를 보였으며, 퇴적이 발생하여 실제 합류점(415 point)이후로 유하된 토사량은 미미할 것으로 사료된다. 따라서 고은리 산1-2(1)인 1차 합류점(440 point)까지와 공사구간 전인 527point까지의 침식된 양으로 토사유출량을 산정하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

1호지에 해당하는 고은리 산 1-2(1)에서 시작된 토석류의 양은 14,485 m³으로 조사되어 USLE의 SATEEC모형에서 산출한 토사유출량과 비슷한 값이 나타났다. 2호지에 해당하는 고은리 산 15의 토사침식량은 3534 m³으로 조사되어, USLE의 SATEEC모형보다 약 30%정도 높게 나타났다.

표 3 토사유출량 결과 비교

구분	단위	1호지	2호지	합계
유역면적	km ²	1.45	0.28	1.73
USLE의 SATEEC모형	m ³ /year/st.	14,729	2,392	17,121
현장 조사결과	m ³	14,485	3,534	18,019

4.4 토사침식량 산정결과에 대한 검증

앞서 산출한 토사침식량과 USLE의 SATEEC모형에서 산출한 토사유출량과는 다소 차이를 보인다. 따라서 현장조사에서 산출한 토사침식량의 적정성에 대한 검증을 수행하였다. 토사침식량은 고은소류지에 퇴적된 토사의 양, 그리고 계곡~하천 구간에 퇴적된 양을 이용하여 검증이 가능할 것으로 예상되었다.

고은소류지는 그림 6과 같으며, 고은소류지의 면적과 수심은 GPS와 스타프를 이용하여 측정하여 체적을 산출하였다. 그 결과, 고은소류지의 저수 용량은 약 25,000 m³(면적 5,000 m², 높이 5 m) 정도 되는 것으로 조사되어 약 25,000 m³정도의 토사가 고은소류지에 최종 퇴적된 것으로 추측된다. 하지만 하천구간의 경우 현장조사시 하천을 준설하고 있어 퇴적된 토사량을 산정할 수 없어 토사침식량에 대한 검증은 이루어지지 못하였다. 그러나 향후 현장조사시 퇴적된 구간에 대한 조사가 실시되면 토사침식량에 대한 타당성을 검증할 수 있을 것이다. 따라서, 측량자료를 이용하여 하천면적을 구하고, 하천면적과 조사된 자료를 이용하여 하천과

고은소류지에 퇴적된 토사량을 추정해 보았다.

고은소류지에 퇴적된 약 25,000 m³의 토석류는 1, 2호지 그리고 산 16-1(1)~(4)에서 발생한 토석류이다. 따라서 고은소류지에 퇴적된 토석류 중에서 16-1(1)~(4)의 토석류를 제외하였다. 현장조사 결과처럼 1호지와 2호지에서 발생한 토사침식량은 18,020 m³이며, 추가조사지 산 16-1(1)~(4)의 토사침식량은 10,880 m³으로 나타났다. 이 두지역의 발생량은 표 4처럼 28,900 m³으로 두 지역에서 퇴적된 침식량은 25,000 m³(고은소류지)으로 추측된다. 1, 2호지의 하천 길이는 1.2 km이고, 추가조사지의 하천길이는 1.1 km로 이며, 1, 2호지의 하천면적은 5,616 m²으로 나타나 이 지역에 퇴적된 토사의 두께는 0.36 m인 것으로 추측되며, 산 16-1(1)~(4) 지역의 하천면적은 5,148 m²으로 퇴적된 토사의 두께는 0.36 m로 추측된다. 이러한 결과를 종합해 보면 1, 2호지에서 발생한 토석류는 고은소류지에 15,985 m³ 퇴적된 것으로 추정된다.



그림 6 고은소류지 전경 및 담수용량 조사

표 4 고은소류지 및 하천에 퇴적된 침식량 추정(m³)

구분	1,2호지	산 16-1(1)~(4)	계
토사침식량(m ³)	18,020	10,880	28,900
퇴적량 추정(m ³)	고은소류지	9,015	25,000
	하천	1,865	3,900
하천 면적(m ²)	5,616	5,148	10,746
하천 길이(km)	1.2	1.1	2.3
퇴적된 토사 두께 추정(m)	0.36	0.36	-

4.5 산정량 비교

현장조사 및 USLE 그리고 여러 식들을 이용하여 토사유출량 산정결과는 표 5와 같으며, 현장조사와 USLE의 SATEEC모형 그리고 Marchi_1의 공식을 이용한 토사유출량은 비슷한 경향을 보이고 있다. 또한, MSDPM, Marchi_2, Rickenmann and

Koschni_1, Rickenmann and Koschni_2을 이용한 식에서 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

Marchi(2004)의 식과 Rickenmann and Koschni의 식은 유역면적과 유역경사를 곱하는 것이 같지만, 앞에 곱해지는 계수의 차이가 커서 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

어떠한 식이 국내의 상황에 더 적합한지에 대해서는 향후 현장자료 조사 및 연구가 더 필요할 것이다.

표 5 토사유출량 결과 비교

구분	단위	1호지	2호지	합계	비고
유역면적	km ²	1.45	0.28	1.73	
USLE의 SATEEC 모형	m ³ /year/st.	14,729	2,392	17,121	100년 빈도
현장 조사결과	m ³	14,485	3,534	18,019	
MSDPM	m ³	4,208	657	4,865	
Marchi_1	m ³	14,732	1,040	15,773	
Marchi_2	m ³	3,645	1,175	4,820	
Rickenmann and Koschni_1	m ³	3,712	262	3,974	
Rickenmann and Koschni_2	m ³	3,521	367	3,889	

5. 결론

본 연구에서는 2013년 집중호우로 인하여 춘천시 대룡산 일원 고은리 지역에서 발생한 토석류 재해를 중심으로 토석류 산사태 특성에 대한 조사를 수행하였으며, 범용토양손실공식에 의한 토양유실량과 현장에서 토석류 발생지와 침식 및 퇴적된 이동경로 조사 결과에 의한 토석류 유출량을 산정한 결과와 그 외의 토석류 발생량 산정식에 의한 토석류 규모 산정에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 본 지역의 토석류는 계곡부에서 구곡침식이 진행된 이래 계곡주변의 사면이 유실된 후 사태물질이 계곡부로 유입되어 2차적으로 계곡부의 벽과 바닥을 침식시키면서 계곡을 따라 이동하는 수로형 토석류의 보였으며, 퇴적층 경사는 10~20°, 발생 및 유하부 구간 경사는 30~40°로 측정되어, 국내에서 발생한 산사태 발생지 6~7부 능선, 30~45°경사 조건과 유사한 것으로 평가되었다.

둘째, 현장조사를 통해 산출한 토석류 발생량은 18,019 m³ 이고 100년 빈도 강우사상에 의한 범용

토양유실량(USLE)은 17,121 m^3 로 매우 유사한 결과를 보였으나 산정결과에 대하여 보다 정확한 이론적 접근을 통한 상세 분석이 요구된다.

셋째, Marchi(2004)의 토석류 산정식은 15,773 m^3 로 현장조사 결과와 유사한 값을 나타냈으나 그 외의 MSDPM, Marchi_2, Rickenmann and Koschni_1, Rickenmann and Koschni_2 식에 의한 산정결과와 상당한 차이를 나타내고 있다.

넷째, 제시된 경험식들이 각 나라의 토석류 발생 지역에서 수집된 자료를 이용하여 경험식 및 계수를 제안했음을 고려할 때 국내에도 향후 토석류 발생지역의 자료 수집과 연구를 통해 국내에 적합한 토사유출량 산정방법 및 계수를 산정해야 할 것이다.

erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)", Washington, DC: United States Department of Agriculture, 1997.

참 고 문 헌

- [1] 강원도, "2013년 호우피해지 수리·수문 분석 및 사면안정성 검토 [춘천 고은지구]", 2013.
- [2] 국립방재연구소, "사면붕괴 감지 및 관측에 관한 연구(II) - 강우량 자료 활용 방안을 중심으로", 2005.
- [3] 박윤식, 김종건, 허성구, 김남원, 안재훈, 김기성, 임경재, "SWAT과 SATEEC 모형을 이용한 토양유실량 비교" *한국농공학회*, 50권 1호, pp. 3-12, 2008.
- [4] 임경재, 박윤식, 김종건, 김남원, 김기성, 최중대, "SATEEC 시스템을 이용한 면적경사도에 의한 유달률 산정 방법에 따른 유사량 분석", *한국물환경학회*, 23권, 5호, pp.650-658, 2007.
- [5] 황현근, 이승우, 김기홍, 최병구, 윤찬영, "2011년과 2012년의 사면재해 유발강우 및 지질특성분석", *한국방재학회지*, 제13권, 제1호, 179-189, 2013.
- [7] D'Agostino V. and Marchi L., "Debris Flow Magnitude in the Eastern Italian Alps: Data Collection and Analysis", *Physics and Chemistry of the Earth, Part C*, 26(9): 657-663, 2001.
- [8] Marchi L. and D'Agostino V., "Estimation of Debris Flow Magnitude in the Eastern Italian Alps", *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(2): 207-220, 2004.
- [9] Rickenmann D. and Koschni A., "Sediment Loads due to Fluvial Transport and Debris Flows during the 2005 Flood Events in Switzerland. Hydrological Processes", 24: 993-1007, 2010.
- [10] KG Renard, GR Foster, GA Weesies, DK McCool and DC Yoder, "Predicting soil