

토석류의 토사체적농도에 따른 퇴적 특성 변화에 관한 실험 연구

최영도¹ · 김성덕² · 이호진^{3*}

¹충북대학교 토목공학과 대학원생, ²청주대학교 휴먼환경디자인학부 강사, ³충북대학교 토목공학부 교수

The Experimental Study for Variance of Deposition Due to Sediment Volume Concentration of Debris Flow

Youngdo Choi¹, Sungduk Kim², and Hojin Lee^{3*}

¹Graduated Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

²Instructor, Division of Human&Environmental Design, Cheongju University

³Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

요약

본 연구의 목적은 산지 사면에서 토석류가 발생했을 때, 하류에서 토사퇴적면적과 도달거리를 실험을 통해 조사한 것이다. 하류에 퇴적하는 토사의 특성을 분석하기 위하여 수로사면에 소단을 설치하였을 경우 또는 직선 수로인 경우 토사퇴적면적과 도달거리를 실험을 통해 분석하였다. 실험조건으로는 토사체적농도의 변화 및 수로의 경사변화 그리고 수로의 형태에 따라서 토사퇴적면적과 도달거리의 감소율을 조사하였다. 직선수로에서 수로경사가 급할수록 그리고 토사퇴적농도가 감소할수록 토사퇴적면적과 도달거리는 증가하였다. 소단을 갖는 수로에서는 경사가 급할수록 토사퇴적농도가 감소할수록 도달거리 및 토사퇴적농도가 증가하였다. 두 수로에서 토사퇴적면적과 도달거리의 차단을 비교해보면, 소단을 갖는 수로에서 직선수로인 경우보다 토사퇴적면적과 도달거리의 차단을 더 높았다. 본 연구의 결과는 급경사지 비탈면에서 토석류가 발생했을 때 효율적인 토석류 저감 또는 방어 대책을 세워 토석류에 의한 피해를 줄이는 데 정보를 제공할 것이다.

핵심용어: 기후변화, 슈퍼태풍, 소단, 토사퇴적면적, 도달거리

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the sedimentation area and runout distance in the downstream when debris flow occurred on a mountain slope through an experimental performance. Super typhoons and torrential rains caused by climate change cause large-scale debris flow disasters in the downstream areas of mountainous areas, mainly where sediments are deposited and flowed downstream. To analyze the characteristics of the sediment deposited downstream, the disposition area and runout distance were investigated through experiments in the case of a straight channel and channel with berm, respectively. As experimental conditions, changes in sediment volume concentration and channel slope, and channel with or without berm, reduction rates in sedimentation area and runout distance were investigated. In the straight channel, the steeper the channel slope and the lower the sedimentation concentration, the sedimentation area and runout distance were increased. In a channel with berm, the runout distance and sediment area increased as the slope became steeper and the sediment area decreased.

Keywords: Climate change, Super typhoon, Berm, Deposition area, Runout distance

*Corresponding author: Hojin Lee, hojinlee@cbnu.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6771-5690>

Received: 13 September 2022, Revised: 13 September 2022, Accepted: 20 September 2022



1. 서론

전 세계적인 기후변화로 인해 슈퍼태풍 및 집중호우의 발생빈도가 증가하고 있으며, 그 규모와 속도가 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 집중호우는 산악지형이 많은 우리나라에서 토석류를 발생시켜 하류에서의 토사재해를 야기한다(Kim, 2014). 특히, 2011년 우면산 산사태와 같이 토석류에 의한 피해가 최근에 상당히 많이 발생하였고, 이로 인한 피해 규모도 대폭 증가하였다.

토석류는 물과 흙 또는 암석이 섞여서 강한 운동성을 가지고 하류로 빠르게 이동하는 현상(Crosta, 2001; Chen et al., 2006)이며, 토사 체적 농도에 따라서 하류의 피해의 정도가 영향을 받는다. 토석류 현상은 기후변화의 거동처럼 운동성이 불안정하고, 토사 크기 및 분류에 따라 상당히 다르며, 불규칙성이 주를 이루고 있기 때문에 관측이 어렵고 모델링으로 정확한 피해를 측정하기는 어렵다(Proske et al., 2011).

토석류의 정확한 예측을 위해서 전 세계의 많은 학자들이 실험과 수치모델 그리고 통계분석 등을 이용하여 다양한 연구들을 수행하였다. 우선 Lee and Yu(2009)는 토석류의 특성을 피해사례로 연구하여 토석류 저감대책을 제안한 연구가 있었고, D'Agostino et al.(2010)은 이탈리아 알프스의 돌로미티 지역에서 토석류 현상을 현장조사를 하였고, 지형모델을 설정하기 위해서 항공 LiDAR를 이용하였다. Lee and Kim(2020)은 국소적 토석류 발생 지역과 국소적으로 발생하지 않은 지역을 비교 분석하여 토석류가 지형에 따라서 어떠한 곳이 토석류 발생 위험도가 높았는지를 분석하였고, 위험경사도를 설정하였다.

수치모의에 대한 연구로서 Kim(2014)은 질량보존을 만족하는 연속방정식 그리고 운동성을 측정하는 운동량 방정식 등을 이용하여 토석류 이론의 지배방정식을 설정하였고, 이 지배방정식을 토대로 시간변화의 특성을 잘 모의할 수 있는 유한차분법을 이용하여 토석류 모델을 제시하였다. 특히, 다양한 조건 하에서의 토석류의 거동과 하류에서의 토사체적 농도의 특성을 분석하였다. McDougall et al.(2003)은 수심평균모델(DAM)을 이용하여 이탈리아 알프스 지역에서의 수치모의를 진행하여 알프스 지역 토석류 피해 정도를 분석하였다. 침식과 퇴적의 반복성을 고려하여 수심평균 1차원을 적용한 Nakatani et al.(2008)의 연구가 있다.

토석류의 실험 연구로서, Fairfield(2011)은 수로실험을 소규모 실험과 대규모 실험으로 구분하여 토석류의 혼합시료를 적용하여 시료의 적정 비율과 물의 비율을 검토하였다. 이 외에도 다양한 토석류 실험 장치를 이용하여 토석류의 특성과 토석류 흐름의 분류를 설정한 연구들이 실내 실험을 통해 제시되었다(Lee et al., 2011; Ryou et al., 2021). 반면에 Iverson et al.(2011)은 대규모 실험장치를 실외에 설치하여 토사의 특성 변화에 따른 토석류의 거동과 유하과정 및 퇴적특성 등을 연구하였다.

본 연구는 산악지형의 사면에 소단을 설치하였을 경우 또는 직선 수로인 경우 다양한 입력조건 하에서 하류에서 토석류의 퇴적특성과 이동거리를 실험을 통해 조사한 것이다. 본 연구의 결과는 급경사지 비탈면에서 토석류가 발생했을 때 효율적인 토석류 저감 또는 방어 대책을 세워 토석류에 의한 피해를 줄이는 데 정보를 제공할 것이다.

2. 토석류 실험

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 토석류 수로 실험 장치는 Fig. 1로 나타났다. Fig. 1은 비탈 경사면 수로가 직선인 경우와 수로에 소단이 설치된 경우의 정면과 측면을 나타낸다. 토석류 퇴적특성을 위한 실험장치는 150 cm의 길이를 갖는 수로(직선수로인 경우) 및 60 cm의 길이를 갖는 소단판(소단이 설치된 수로)으로 구성되며 각 수로는 75 cm의 길이를 갖는 상판과 하판으로 나뉜다. 각 수로는 강철로 제작되었다(Choi, 2022). 또한 소단판은 소단길이변화 특성을 고려할 수 있도록 분리형으로 제작하여 구분하고, 각각의 수로 폭은 일정하게 15 cm폭으로 구성된다. 이 외에 퇴적 면적을 표현하기 위한 퇴적판은 강철로 제

작되었고, 바닥마찰 효과를 반영하기 위한 인공 조도판은 고무로 제작되었다. 시료통은 토사혼합물이 보관되며 아크릴로 제작되었다.

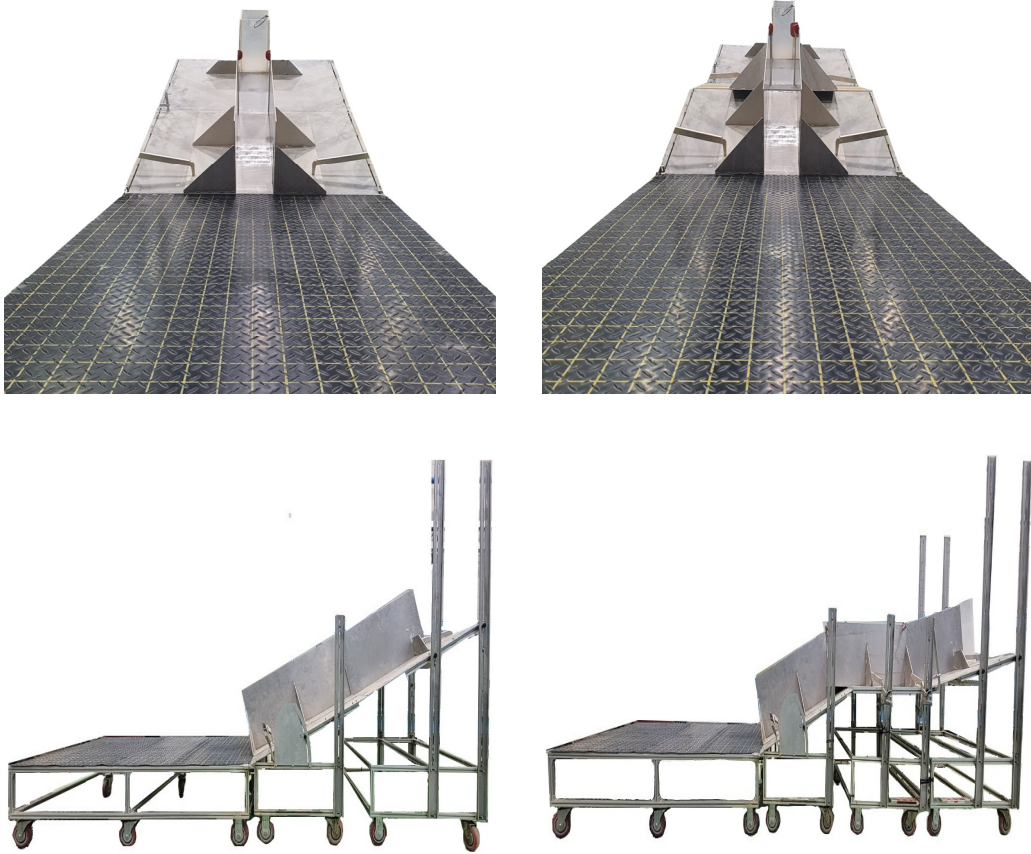


Fig. 1. The experimental channel with and without Berm

2.2 실험조건

다양한 실험 조건 하에서 토사체적 특성의 변화를 분석하기 위해서 토사체적농도와 수로경사를 실험변수로 설정하였고, 직선수로인 경우와 소단이 설치된 경우에 적용하여 토사체적면적과 도달거리를 측정하였다. 이중 토사체적 농도의 범위는 Costa(1988)이 제시한 $C_V=0.4\sim0.8$ 값과 D'Agostino et al.(2013)이 제시한 $C_V=0.5\sim0.6$ 값을 고려하여 $C_V=0.4\sim0.6$ 까지 0.05 간격으로 예비실험을 통하여 $C_V=0.5, 0.55, 0.6$ 로 선정하였다.

수로경사의 경우는 Costa(1984)가 제시한 토석류 발생각도 $15^\circ\sim20^\circ$ 와 Iverson(2014)이 제시한 토석류 발생각도 $25^\circ\sim30^\circ$ 를 고려하여 본 실험에서는 수로경사를 20° 와 30° 설정하여 실험을 수행하였다. 각각의 실험은 상기 선정된 실험조건을 바탕으로 반복실험을 하였고, 그 횟수는 3회로 총 12번의 토석류 실험이 수행되었다.

2.3 실험시료

토석류 실험에서 시료의 선정은 하류부 토사체적 특성에 영향을 주기 때문에 수로실험에 사용할 적합한 시료의 선정은 중요하다. 본 연구에서는 기존 연구자들의 참고문헌(D'Agostino et al., 2010; Ryou, 2020)을 바탕으로 예비실험을 진행하였고, 소규모 실험에 적합한 시료를 선정하였다. D'Agostino et al.(2010)은 실제 발생한 현장에서의 토석류를 시료로 사용하였고, Ryou(2020) 및 다수의 학자들은 소규모 실내수로 실험에 적합한 혼합시료를 사용하였다.

본 실험 전 예비실험에서 선정된 시료는 입자크기 4.75 mm~9.5 mm일 때 중량비 5%, 2 mm~4.75 mm일 때 중량비 47%, 0.075 mm~2 mm일 때 중량비 47%, 0.075 mm 이하일 때 중량비가 1%이다. 각각의 혼합시료의 입도에 따른 중량비는 Table 1과 같고, Table 2는 토사체적농도에 따른 혼합시료를 구성하는 각 시료를 나타내며, 하류단에서의 흙 입경은 0.075 mm 이하로 하였다.

Table 1. The weight ratio for particle size of mixed soil sample

Particle size(mm)	weight ratio (%)
4.75~9.5	5
2~4.75	47
0.075~2	47
<0.075	1

Table 2. The weight of each mixed soil sample for sediments volume concentration

Sediment volume concentration	sample weight (g)				weight of mixed soil sample
	<0.075 mm	0.075 mm ~ 2 mm	2 mm ~ 4.75 mm	4.75 mm ~ 9.5 mm	
0.5	54	2538	2538	270	5400
0.55	59.4	2791.8	2791.8	297	5940
0.6	64.8	3045.6	3045.6	324	6480

3. 실험결과 분석

3.1 토사체적농도에 따른 퇴적 변화 직선수로

산지에서 발달된 토석류가 하류로 유하할 때 토사의 퇴적농도와 토석류 도달거리는 하류에서의 피해에 상당한 영향을 준다. 본 연구는 토사체적 농도의 변화(0.5, 0.55, 0.6) 및 수로경사의 변화(20°, 30°)에 따라서 직선수로 및 소단을 갖는 수로인 경우 토사의 퇴적면적 및 도달거리를 측정하였다(Fig. 2와 Fig. 3). Figs. 2와 3의 좌측 세로축은 퇴적면적, 우측은 도달거리를 나타내며 가로축은 토사체적농도를 나타낸다.

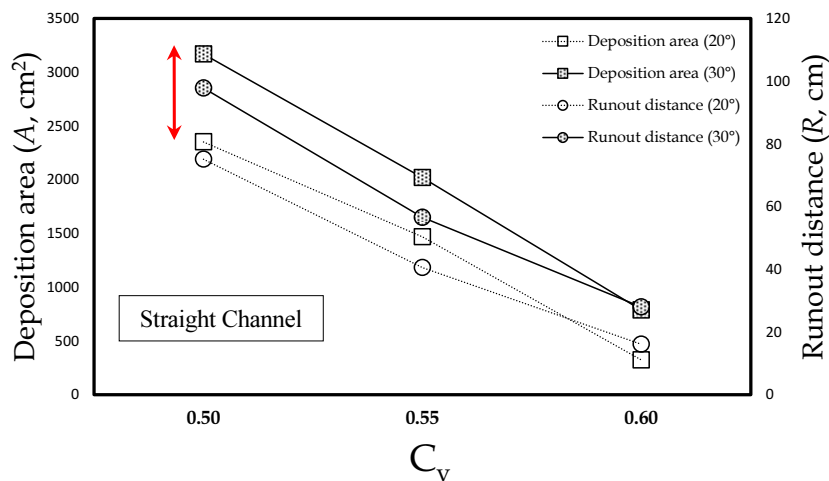


Fig. 2. The deposition area and runout distance for straight channel

Fig. 2에서 보면, 직선수로경사 20°인 경우 토사체적농도가 0.5에서 0.55로 증가할 때, 도달거리는 46.02%, 퇴적면적은 37.6% 감소하였고, 토사체적농도가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 60.31%, 퇴적면적은 78.07% 감소하였다. 직선수로경사 30°인 경우 토사체적농도가 0.5에서 0.55로 증가할 때, 도달거리는 42.19%, 퇴적면적은 36.29% 감소하였고, 토사체적농도가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 50.59%, 퇴적면적은 61.05% 감소하였다. 즉, 직선수로 경사가 급할수록 토사퇴적면적 및 도달거리는 증가하였고, 토사체적농도가 증가할수록 토사퇴적면적과 도달거리는 감소하였다. 토사퇴적농도가 0.6인 경우는 경사도에 상관없이 비슷한 값을 나타냈으며, 토사퇴적농도가 작을수록 경사도의 차이에 의해서 퇴적면적 및 도달거리의 밴드폭(화살표)이 커짐을 알 수 있다.

3.2 토사체적농도에 따른 퇴적 변화소단을 갖는 수로

Fig. 3은 소단을 갖는 수로에서 퇴적토사농도의 변화에 따른 토사퇴적면적과 토석류 도달거리를 나타낸다. Fig. 3에서 보면, 소단을 갖는 수로경사 20°(소단을 제외한 상하 수로부분이 모두 20°)인 경우 토사체적농도가 0.5에서 0.55로 증가할 때, 도달거리는 56.97%, 퇴적면적은 63.95% 감소하였고, 토사체적농도가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 62.89%, 퇴적면적은 86.2% 감소하였다. 소단을 갖는 수로경사 30°인 경우 토사체적농도가 0.5에서 0.55로 증가할 때, 도달거리는 45.82%, 퇴적면적은 68.1% 감소하였고, 토사체적농도가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 63.8%, 퇴적면적은 70.23% 감소하였다. 소단을 갖는 수로도 경사가 급할수록 도달거리 및 토사퇴적농도가 증가하였고, 토사체적농도의 증가로 토사퇴적면적과 도달거리는 감소하였다.

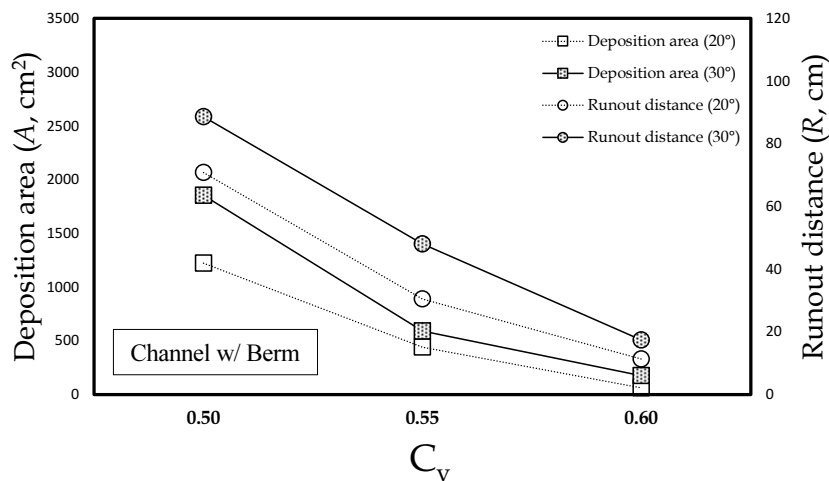


Fig. 3. The deposition area and runout distance for channel with berm

3.3 토사체적농도에 따른 퇴적 변화-수로별 비교

Table 3은 직선수로와 소단을 갖는 수로에서 토사체적농도 및 수로의 경사에 따른 토사퇴적면적과 토석류 도달거리를 측정 한 값을 나타낸다. Table 3에서 보면, 수로경사가 30° 및 토사체적농도가 0.5인 경우 소단을 갖는 수로가 직선수로보다 도달거리가 9.41%, 토사퇴적면적이 41.54% 더 감소하였고, 0.55인 경우 도달거리는 15.09%, 토사퇴적면적은 70.73% 감소하였고, 0.6인 경우 도달거리는 37.8, 토사퇴적면적은 77.63% 감소하였다. 즉, 소단을 갖는 수로에서 직선수로인 경우보다 토사퇴적면적과 도달거리의 감소율이 더 높았으며, 이는 소단의 설치로 인해 강한 운동성을 가지고 유하하는 토석류의 유동과 유동심의 에너지가 감소하여, 하류단에서의 토사퇴적면적과 도달거리가 감소하게 되는 것을 의미한다. 따라서, 토석류에 의해 토사가 많이 발생하는 하류가 있는 산지 사면에 소단을 설치함으로써 토석류에 의한 피해를 저감하는 데 도움이 된다고 판단된다.

Table 3. The deposition area and runout distance for various conditions

Channel condition	Sediment volume concentration	channel slope (20°)		channel slope (30°)	
		deposition area (m ²)	runout distance (cm)	deposition area (m ²)	runout distance (cm)
Straight	0.5	2351.44	75.09	3167.97	97.81
	0.55	1467.29	40.54	2018.2	56.54
	0.6	321.75	16.09	786.18	27.94
With berm	0.5	1220.76	70.81	1852	88.61
	0.55	440.03	30.47	590.77	48.01
	0.6	60.71	11.31	175.86	17.38

4. 결론

최근의 기후변화로 인한 슈퍼태풍과 집중호우는 산악지형이 많은 우리나라에서 토석류를 발생시켜 하류에서의 심각한 토사재해를 야기한다. 본 연구는 산악지형의 사면에 소단을 설치하였을 경우 또는 직선수로인 경우 토사퇴적면적과 수로 경사의 변화에 따라 하류에서 토석류의 토사퇴적면적과 도달거리를 실험을 통해 조사한 것이다.

토사체적농도 따른 직선수로에서 퇴적변화를 보면, 수로경사가 급할수록 토사퇴적면적 및 도달거리는 증가하였고, 토사체적농도가 증가할수록 토사퇴적면적과 도달거리는 감소하였다. 또한, 토사퇴적농도가 작을수록 경사도의 차이에 의해서 퇴적면적 및 도달거리의 밴드폭이 커짐을 알 수 있다. 소단을 갖는 수로에서 퇴적변화를 보면, 경사가 급할수록 도달거리 및 토사퇴적농도가 증가하였고, 토사체적농도의 증가로 토사퇴적면적과 도달거리는 감소하였다.

직선수로와 소단을 갖는 수로에서 토사체적농도 및 수로의 경사에 따른 토사퇴적면적과 토석류 도달거리를 비교해보면, 소단을 갖는 수로에서 직선수로인 경우보다 토사퇴적면적과 도달거리의 감소율이 더 높았으며, 이는 소단의 설치로 인해 토석류의 유동과 유동심의 에너지가 감소하여, 하류단에서의 토사퇴적면적과 도달거리가 감소하게 되는 것을 의미한다. 따라서, 토석류에 의해 토사가 많이 발생하는 하류가 있는 산지 사면에 소단을 설치함으로써 토석류에 의한 피해를 저감하는 데 도움이 된다고 판단된다. 본 연구의 결과는 급경사지 비탈면에서 토석류가 발생했을 때 효율적인 토석류 저감 또는 방어 대책을 세워 토석류에 의한 피해를 줄이는 데 정보를 제공할 것이다.

Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2021R111A3054408).

References

- Chen, H., Dadson, S., and Chi, Y. G. (2006). Recent Rainfall-induced Landslides and Debris Flow in Northern Taiwan. *Geomorphology*, 77: 112-125.
- Choi, Y. D. (2022). Effect of Berms and Baffles on Deposition Characteristics of Debris Flow. Master Thesis. Chungbuk National University.
- Costa, J. E. (1984). Physical Geomorphology of Debris Flows. In: Costa, J.E., Fleisher, P.J. (eds) *Developments and Applications of Geomorphology*. Springer, Berlin, Heidelberg. 268-317.
- Costa, J. E. (1988). Rheologic, Geomorphic, and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hyperconcentrated Flows, and Debris Flows. *Flood Geomorphology*. 113-122.

- Crosta, G. B. (2001). Failure and Flow Development of a Complex Slide: The 1993 Sesa, Landslide. *Engineering Geology*. 53: 173-199.
- D'Agostino, V., Cesca, M., and Marchi, L. (2010). Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps). *Geomorphology*. 115(3): 294-304.
- D'Agostino, V., Bettella, F., and Cesca, M. (2013). Basal Shear Stress of Debris Flow in the Runout Phase. *Geomorphology*. 201: 272-280.
- Fairfield, G. (2011). Assessing the Dynamic Influences of Slope Angle and Sediment Composition on Debris Flow Behaviour: An Experimental Approach. Masters Thesis. Durham University.
- Iverson, R. M. (2014). Debris Flows: Behaviour and Hazard Assessment. *Geology Today*. 30(1): 15-20.
- Iverson, R. M., Reid, M. E., Logan, M., LaHusen, R. G., Godt, J. W., and Griswold, J. P. (2011). Positive Feedback and Momentum Growth during Debris-flow Entrapment of Wet Bed Sediments. *Nature Geoscience*. 4(2): 116-121.
- Kim, S. D. (2014). The Study of Sediment Volume Concentration in Liquefied-layer of Debris Flow. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 15(12): 109-206.
- Lee, C. J. and Yoo, N. J. (2009). A Study on Debris Flow Landslide Disasters and Restoration at Inje of Kanwon Province, Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 9(1): 99-105.
- Lee, H. N. and Kim, G. H. (2020). Analysis of Topographical Factors in Woomyun Mountain Debris Flow using GIS. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*. 23(5): 809-815.
- Lee, Y. S., Ryu, S. H., and Jung, J. H. (2011). Result of Debris Flow Model Experiment under Rainy Condition. 2011 Korean Geo-Environmental Society Fall Conference. 215-218.
- McDougall, T., Donley, H. F., and Howard, T. R. (2003). On Debris Flow/Avalanche California, in *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*. Reviews in Engineering Geology, Geol. Soc. AM. VII. 223-236.
- Nakatani, K., Wada, T., Satofuka, Y., and Mizuyama, T. (2008). Development of "Kanko 2D (Ver. 2.00)", a User-friendly One and Two-dimensional Debris Flow Simulator Equipped with a Graphical User Interface. *International Journal of Erosion Control Engineering*. 1(2): 62-72.
- Proske, D., Suda, J., and Hubl, J. (2011). Debris Flow Impact Estimation for Breakers. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geo hazards*. 5(2): 143-155.
- Ryou, K. H. (2020). Analysis of Debris Flow Behavior Characteristics by Using Flume Experiments. Master Thesis. Chungbuk National University.
- Ryou, K. H., Chang, H. J., and Lee, H. J. (2021). A Study on the Flow Characteristics of Debris Flow Using Small-scaled Laboratory Test. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*. 22(4): 235-245.

Korean References Translated from the English

- 김성덕 (2014). 토석류 유동층에서 토사체적 농도 특성에 관한 연구. *한국지반환경공학회논문집*. 15(12): 109-115.
- 유국현 (2020). 수로실험을 통한 토석류 거동 특성 분석. *충북대학교 대학원 석사학위 논문*.
- 유국현, 장형준, 이호진 (2021). 실내 모형실험을 통한 토석류 흐름 특성 연구. *한국산학기술학회논문지*. 22(4): 235-245.
- 이용수, 류상훈, 정재형 (2011). 강우효과를 고려한 토석류 모형실험 결과. 2011년 한국지반환경공학회 가을학술발표대회 논문집. 215-218.
- 이철주, 유남재 (2009). 2006년 강원도 인제지역의 토석류 산사태 수해 및 복구에 관한 연구. *한국방재학회논문집*. 9(14): 99-105.
- 이한나, 김기홍 (2020). GIS를 이용한 우면산 토석류 지형인자 분석. *한국산업융합학회논문집*. 23(5): 809-815.
- 최영도 (2022). 소단과 배플이 토석류의 퇴적 특성에 미치는 영향. *충북대학교 대학원 석사학위 논문*.