

질량비 변화에 따른 산사태 모형으로 인해 생성되는 충격파의 특성분석 : 파진폭을 중심으로

Analysis of Impulse Wave Characteristics Generated by Landslide Models with Various Mass Ratio : Focus on Wave Amplitude

조한울¹⁾ · 이호진[†] · 김성덕²⁾

Hanwool Cho · Hojin Lee · Sungduk Kim

Received: January 20th, 2023; Revised: February 15th, 2023; Accepted: March 10th, 2023

ABSTRACT : Impulse waves generated by landslides near water bodies can lead to fatal damage to human life and surrounding infrastructure. These impulse waves are generally called landslide-impulsed waves and occur without being limited to a specific area. Recently, localized torrential rains have frequently occurred due to the influence of abnormal weather, both the frequency and scale of landslides occurring in Korea are increasing. Therefore, in this study, the experiments were conducted according to the mass ratio of the landslide models, and among the characteristics of the generated landslide-impulse waves. And the wave amplitude was observed and analyzed. In this study, a total of 75 experiments were conducted by repeating the experiment 5 times for 15 cases with mass ratios of 5 landslide models and 3 types of slope angles. As a result of experiments with different mass ratios of landslide models, if the landslides have the same initial energy, the size of the landslide-impulse waves generated by mixing granular and block forms is higher than the size of the landslide-impulse waves generated by pure granular and block landslides. It is analyzed that the size may be larger.

Keywords : Landslide model experiment, Landslide-impulse wave, Maximum amplitude

요지 : 수역 인근에서 산사태로 인해 발생하는 충격파는 인명과 주변 기반시설에 치명적인 피해로 이어질 수 있다. 이러한 충격파는 일반적으로 산사태 충격파라고 하며, 특정지역에 국한되지 않고 발생한다. 최근에는 이상기후의 영향으로 국지성 집중호우가 빈번하게 발생하면서 국내에서 발생하는 산사태의 발생빈도와 발생규모 모두 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 산사태 모형의 질량비 변화에 따른 실험을 수행하였으며, 생성되는 충격파의 특성 중 파의 진폭을 중심으로 관측 및 분석하였다. 본 연구에서는 5가지의 산사태 모형의 질량비, 3가지의 수로경사로 15가지의 케이스에 대하여 5회 반복실험하여 총 75회의 실험을 수행하였다. 산사태 모형의 질량비를 달리하며 실험을 해본 결과, 만약 초기 에너지가 동일한 산사태의 경우 순수한 입상, 순수한 블록 형태의 산사태에 의해서 생성되는 충격파의 크기보다 입상형태와 블록형태가 섞여 함께 거동하며 생성하는 충격파의 크기가 더 클 수 있다고 분석된다.

주요어 : 산사태 모형실험, 산사태 충격파, 최대진폭

1. 서론

산사태 충격파는 일반적으로 산사태에 의해서 생성되는 충격파를 말하며, 호수, 저수지 및 화선섬 등 특정 지역에 국한되지 않고 발생한다(Løvholt et al., 2008; Fuchs et al., 2011). 수역 인근에서 발생하는 산사태는 사면을 따라 가속되면서 수면과 만나 위력적인 산사태 충격파를 발생시키고(Heller et al., 2016), 인근 지역에 재난·재해를 야기할 수 있다(Huang et al., 2017). 특히 고산지대에서 발생하는 산사태 충격파는 상당수의 인공 저수지와 댐, 급경사의 계곡

등이 위치하는 경우가 많아 치명적인 피해로 이어질 수 있다(Vischer & Hager, 1998).

1958년 알래스카 리투야 만(Lituya Bay)과 1963년 이탈리아 북동부의 바이온트(Vaiont)댐 인근에서는 지진으로 인한 산사태로 인해 각각 520m, 250m의 진폭을 갖는 산사태 충격파를 발생시켰으며(Miller, 1960; Semenza & Ghirotti, 2000), 인근의 식생, 인명, 기반시설 등에 막대한 피해를 끼쳤다.

우리나라의 경우 아직까지는 지진으로 인한 산사태 사례는 보고되지 않았다(Seo et al., 2018). 하지만 지진으로 인한

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

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk, Chungbuk National University (Corresponding Author : hojinlee@chungbuk.ac.kr)

2) Instructor, Division of Human and Environmental Design, Cheongju University

산사태 연구의 필요성은 1998년부터 제시되었고(Lee, 1998), 2016년 경주지진과 2017년 포항지진 이후에야 대두되었다(Lee et al., 2017; Seo et al., 2018). 우리나라는 지리적으로 유라시아판 내부에 위치하고 있고, 활발한 판 경계로부터 떨어져 있어서 지진에 대해 안전하다는 인식이 자리잡고 있었지만(Jang & Lee, 2007), 디지털 관측기기로 지진기록을 시작한 1999년 이후로 기상청의 국내지진 발생 현황통계에 따르면 20년 동안 지진의 발생횟수는 약 2배 증가하였으며, 최근에는 전 세계적인 이상기후의 영향으로 국지성 집중호우가 빈번하게 발생하면서 지진에 의한 산사태 발생 빈도 또한 증가하고 있다(Seo et al., 2021). 국토의 63%가 산악지형인 우리나라도 더 이상 산사태 충격파로부터 안전하다고 할 수 없으며, 미래에 발생할 수 있는 산사태 충격파로부터 인명과 기반시설에 위협을 줄이기 위해서는 충격파 특성들에 대한 더 나은 이해능력은 필수적이다(Fuchs et al., 2011).

전 세계의 연구자들로부터 많은 산사태 충격파의 물리적인 실험적 연구가 수행되었지만(Fritz et al., 2003; Heller & Hager, 2014; Kim & Paik, 2021), 산사태 모형의 구성비율이 입상형태와 블록형태의 제한적인 경우에 대해서만 실험을 수행하였다. 하지만 실제 현상에서의 산사태는 다양한 직경의 모래, 자갈 및 바위 등으로 구성되며, 체적이 동일한 산사태가 발생한다고 해도 산사태의 구성요소에 따라 질량, 에너지 및 충격력 등 많은 물리적인 부분에서 차이가 있을 수 있다. 선행연구에서 제안된 경험식 또한 입상형태와 블록형태인 경우에 대해서 수행한 실험들에서 도출된 것들이며, 이를 현실에 적용하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 산사태 충격파의 특성을 알아보고자 산사태 모형의 질량비 변화에 따른 산사태 모형실험을 수행하였으며, 생성되는 충격파의 특성 중 최대진폭을 중점으로 관측하고 분석하였다.

2. 수로실험

본 연구에서의 산사태 모형실험은 강철(steel) 재질의 길이 25m, 폭 1m, 높이 1m의 수로에서 수행하였다. 실험장치는 시료통, 경사로 지지대, 경사로로 구성된다. 본 연구에서는 낙하높이 $H = 0.5m$, 산사태 모형의 총 질량 $M_T = 15kg$, 수심 $h = 0.2m$ 의 3가지 조건을 실험 공통 조건으로 설정하였다. 실험은 수로경사 20°, 40°, 60°인 경우에서 수행하였고, 낙하높이를 통일시켰기 때문에 수로경사가 증가함에 따라 경사로의 길이는 각각 경사 20°일 때 1.98m, 경사 40°일 때 1.25m, 경사 60°일 때 1.05m로 짧아졌다. 흙을 모사하

기 위한 입상형태 산사태 모형은 직경 8mm의 글라스 비즈(glass beads)를 사용하였다. 글라스 비즈 한 개의 질량 m_g 는 0.7g, 부피 $V_g = 2.14 \times 10^{-6} m^3$, 밀도 $\rho_g = 2.61 \times 10^3 kg/m^3$ 이다. 바위를 모사하기 위한 블록형태 산사태 모형은 콘크리트로 직접 제작하였다. Heller & Spinneken(2013)은 경사로 폭 b 와 블록형태 산사태 모형의 폭 b_s 의 비율인 차단비 B 가 $0.88 < B < 0.98$ 일 때, 그 실험은 3차원 효과를 배제하면서 2차원 실험임을 보장한다고 하였다. 이를 참고하여 본 연구에서는 차단비 $B = 0.88$ 로 설정하였고, 그에 따른 경사로의 폭과 블록형태 산사태 모형의 폭은 각각 $b = 0.4m$, $b_s = 0.352m$ 이었다. 본 연구에서는 산사태 모형의 질량비 M^* 를 달리하며 실험을 수행하였으며, 본 연구에서 설정한 질량비 M^* 는 전체 산사태 모형의 질량 중 블록형태 산사태 모형의 질량이 차지하는 비율로 $M^* = M_B / M_T$ 이다. M_B 는 블록형태 산사태 모형의 질량, M_T 는 산사태 모형의 전체 질량으로 $M_T = M_G + M_B$ 이며, M_G 는 입상형태 산사태 모형의 질량이다. 본 연구에서는 순수 입상형태($M^* = 0$), 순수 블록형태($M^* = 1$) 및 복합형태($M^* = 0.3, 0.5, 0.7$)로 총 5가지의 질량비 M^* 의 조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서 설정한 질량비 M^* 를 고려하여 블록형태 산사태 모형은 질량비 $M^* = 0.3(4.5kg)$, $M^* = 0.5(7.5kg)$, $M^* = 0.7(10.5kg)$, $M^* = 1(15kg)$ 로 총 4개의 블록형태 산사태 모형을 제작하였다. 블록형태 산사태 모형의 부피 V_b 는 각각 $M^* = 0.3$ 부터 $M^* = 1$ 의 순서대로 $2.59 \times 10^{-3} m^3$, $4.42 \times 10^{-3} m^3$, $5.97 \times 10^{-3} m^3$, $8.36 \times 10^{-3} m^3$ 이고, 밀도 ρ_b 는 각각 $1,750.97 kg/m^3$, $1,700.68 kg/m^3$, $1,761.74 kg/m^3$, $1,796.41 kg/m^3$ 이다. 입상형태 산사태 모형과 블록형태 산사태 모형은 Table 1의 재원을 갖는다. 산사태 모형에 의해서 생성되는 충격파는 60fps와 240fps로 촬영된 영상과 10Hz 성능의 수면변위센서를 이용하여 관측 및 분석하였다. 본 연구에서 수행한 산사태 모형실험의 모식도는 Fig. 1에 나타난다.

Table 1. Parameters of landslide model

Parameter	Granular type	Block type
Length (m)	-	0.125, 0.190, 0.245, 0.330
Thickness (m)	-	0.08
Mass (kg)	0.7×10^{-3}	4.5, 7.5, 10.5, 15
Volume (m^3)	2.14×10^{-6}	2.59×10^{-3} , 4.42×10^{-3} , 5.97×10^{-3} , 8.36×10^{-3}
Density (kg/m^3)	2.61×10^3	1,750.97, 1,700.68, 1,761.94, 1,796.41

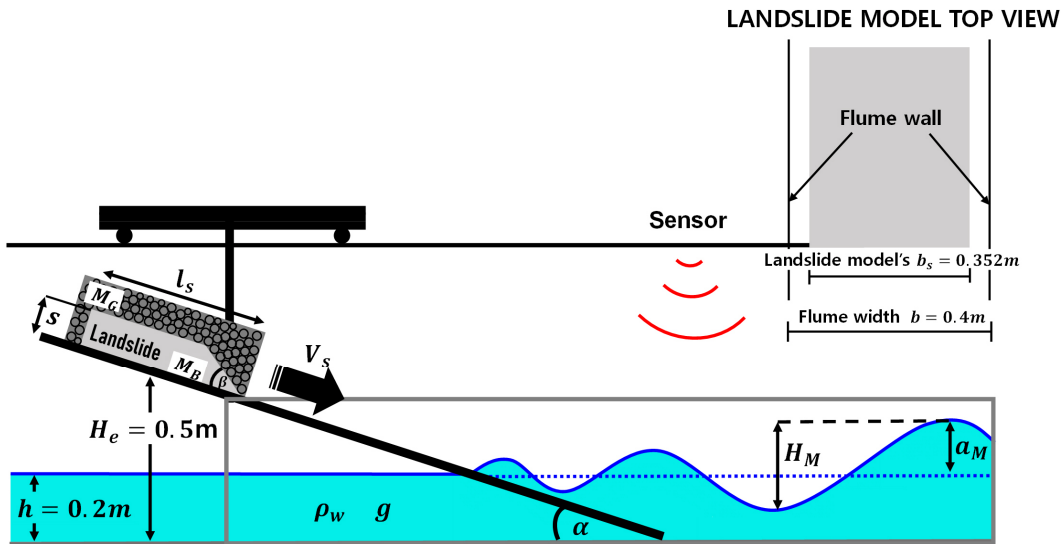


Fig. 1. Sketch of experimental performance

3. 실험 결과

본 연구는 산사태 모형을 구성하는 재료의 질량비 M^* 및 수로경사의 변화에 따라서 생성되는 충격파의 특성을 관측하고 분석하고자 산사태 모형실험을 수행하였다. 3.1절에서 순수 입상형태와 순수 블록형태 산사태 모형의 실험을 비교 및 분석하였고, 3.2절에서 복합형태 산사태 모형의 실험을 비교 및 분석하였다.

3.1 순수 입상형태, 순수 블록형태 산사태 모형실험 비교

흙을 모사하기 위한 입상형태 산사태 모형은 직경 8mm의 글라스 비즈를 사용하였고, 바위를 모사하기 위한 블록형태 산사태 모형은 콘크리트로 직접 제작하였다. $M^* = 0$ 은 블록형태 산사태 모형이 없고, 글라스 비즈만으로 구성된 산사태 모형이며, $M^* = 1$ 은 직접 제작한 콘크리트 덩어리 로만 구성된 산사태 모형을 의미한다. $M^* = 0$, $M^* = 1$ 에서

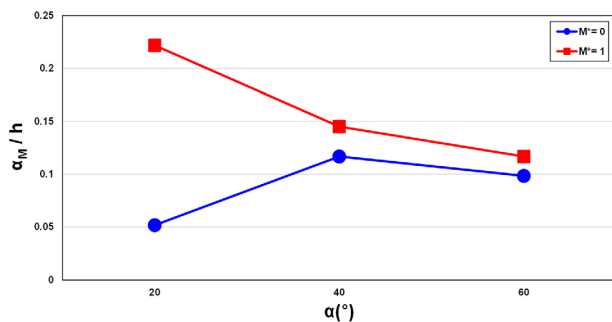


Fig. 2. Maximum amplitude by $M^* = 0$ and $M^* = 1$

수로경사에 따라 생성되는 최대진폭은 Fig. 2에 나타나며, 그에 따른 실험장면은 Fig. 3에 나타난다. Fig. 2에서 가로축은 수로경사이고, 세로축은 해당 경사인 경우, 산사태 모형에 의해서 생성되는 최대진폭 크기를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 좌측은 (a) $M^* = 0$ 인 경우 수중에서 순수 입상형태 산사태 모형이 회전하는 현상을 보여주는 사진이며, 우측은 (b) $M^* = 1$ 인 경우 순수 블록형태 산사태 모형의 실험 중 물 튀김 현상이 발생하는 사진이다.

Fig. 2에서 보면 입상형태 산사태 모형에 의해서 생성되는 최대진폭의 크기는 수로경사 40°일 때가 가장 크게 관측되었고, 수로경사 60°로 증가하면서 생성되는 진폭의 크기는 약간 감소하였으나, 감소폭은 적었다. Fig. 3(a)에서는 입상형태 산사태 모형이 수중에서 진행 방향을 따라 수면과 함께 위로 들어 올려지는 현상을 확인할 수 있다. 선행연구에 따르면(Evers & Hager, 2015; Fukii, 2018) 입상형태 산사태 모형은 산사태 모형이 수면과 충돌할 때 산사태 모형의 선단부에서는 속도의 감소가 발생하지만, 후미 쪽에서는 오히려 속도가 증가하면서 내려오게 되고, 결국 속도가 감소한 선단부의 산사태 모형을 뒤에서 밀어주게 되면서 수중에서는 입상형태 산사태 모형이 회전하는 현상이 발생한다고 하였다. 수로경사 40°에서는 산사태 모형의 길이가 수로경사 60°에서보다 길게 형성되기 때문에 산사태 모형의 선단부와 후미 쪽과의 속도차이는 더욱 증가하게 되어 입상형태 산사태 모형이 수중에서 회전하는 현상이 더욱 크게 발생하게 된다. 이러한 과정으로 인해 수로경사 40°일 때가 수로경사 60°일 때보다 생성되는 최대진폭의 크기가 더 크게 관측되는 것으로 분석된다(Fig. 2).

Fig. 2에서 블록형태 산사태 모형은 수로경사가 증가함에

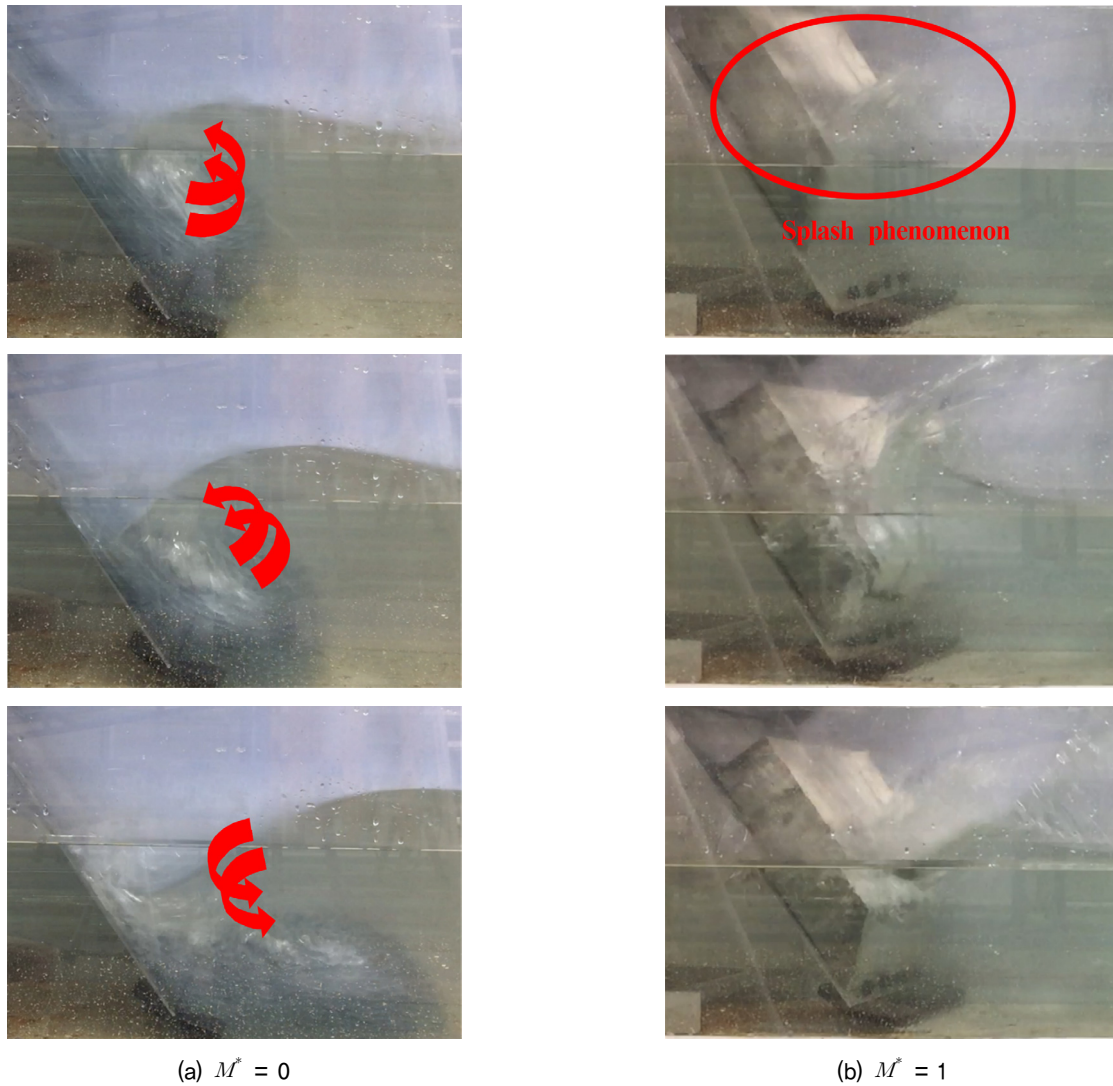


Fig. 3. Experiment pictures of landslide model at slope angle 60°, (a) $M^* = 0$ and (b) $M^* = 1$

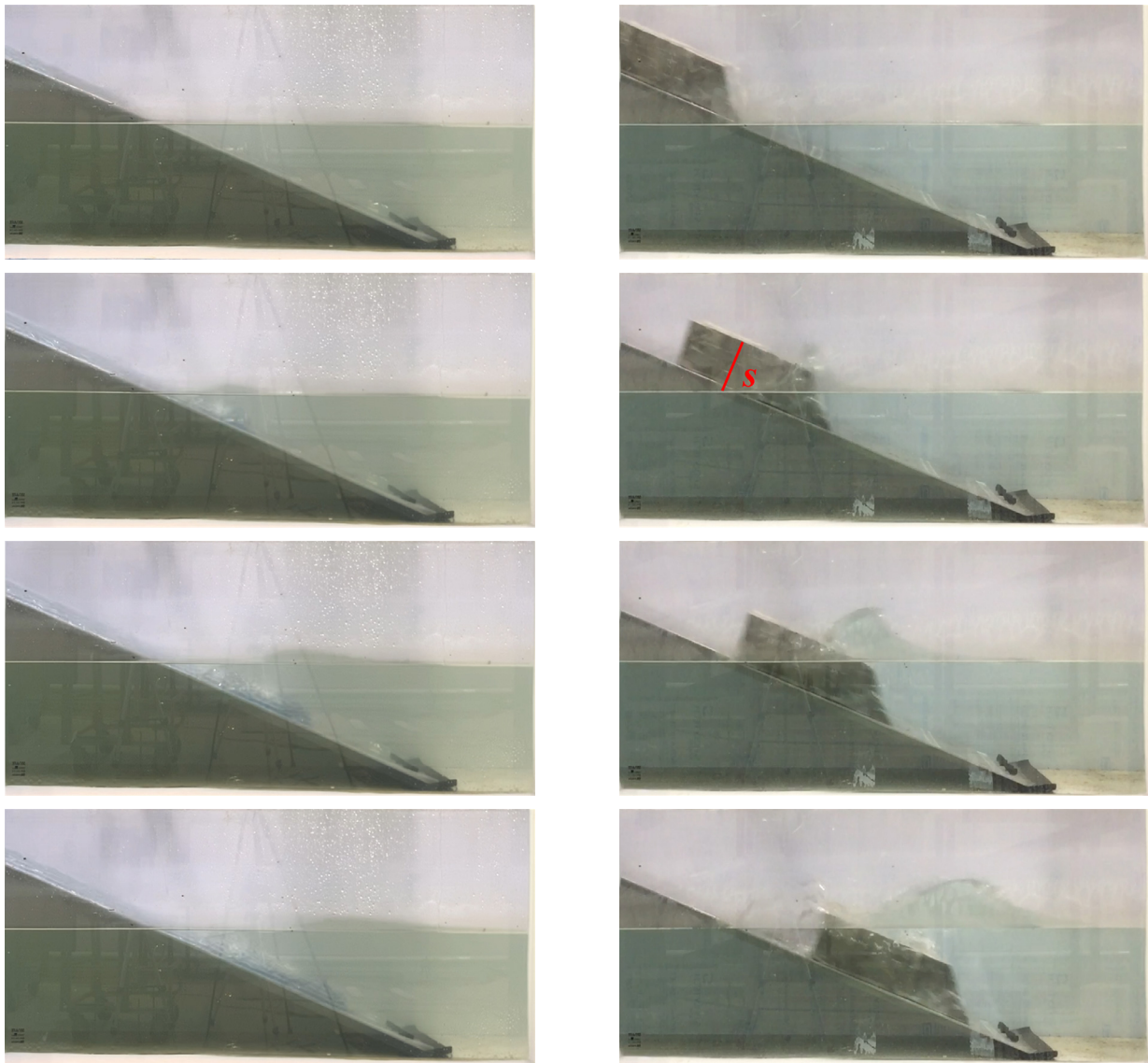
따라 생성되는 최대진폭의 크기는 감소하였다. 이는 블록형태 산사태 모형이 수면과 충돌할 때 물 튀김 현상이 발생했기 때문으로 분석된다. 물 튀김 현상이 발생하면(Fig. 3(b)) 수면 중 일부분이 공중으로 튀어오르고, 물의 총 질량은 튀어 오르는 물의 질량만큼 감소하게 되면서 에너지가 소산하게 된다. 즉, 산사태 모형으로부터 수면에 전달되는 운동에너지는 진폭을 생성하는데 사용되는데 물 튀김 현상이 발생하면서 에너지가 소산되고 결국 소산된 에너지만큼 감소한 진폭이 생성되는 것이다.

Fig. 2에서 보면 $M^* = 1$ 에 의해서 생성되는 최대진폭의 크기가 $M^* = 0$ 에 의해서 생성되는 최대진폭의 크기보다 모든 경사조건에서 크게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 산사태 모형의 두께 s 의 영향 때문으로 분석된다. Fig. 4에서 $M^* = 1$ 은 수면과 충돌할 때 수면이 산사태 모형을 타고 올라오면서 진폭을 생성하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 $M^* = 0$ 은 수면이 타고 올라 갈만한 충분한 높이인 산사태

모형의 두께 s 가 존재하지 않는다. 이러한 결과는 진폭의 형성에는 산사태 모형의 두께 s 가 영향을 끼치는 것으로 분석된다. 또한, 생성되는 진폭의 크기 차이는 수로경사 20°에서 329.03%, 40°에서 24.29%, 60°에서 18.65%만큼의 차이가 났으며, 수로경사가 증가할수록 진폭의 크기차이는 감소하였다. 이는 산사태 모형의 두께 s 의 영향은 급경사에서보다 완만한 경사에서 더 크게 작용하는 것으로 분석된다.

3.2 복합형태 산사태 모형실험 비교

본 연구에서 설정한 산사태 모형의 질량비 M^* 는 전체 산사태 모형의 질량 중 블록형태 산사태 모형이 차지하는 비율이며, 복합형태 산사태 모형은 $M^* = 0.3$, $M^* = 0.5$, $M^* = 0.7$ 의 조건에서 실험을 수행하였다. 수로경사에 따라 복합형태 산사태 모형에 의해서 생성되는 최대진폭은 Fig. 5에 나타난다. Fig. 5에서 보면 수로경사 20°에서는 $M^* = 0.3$ 이 최소, $M^* = 0.7$ 이 최대의 진폭을 보였지만, 수로경사 60°



(a) $M^* = 0$

(b) $M^* = 1$

Fig. 4. Experimental pictures of landslide model at slope angle 20° , (a) $M^* = 0$ and (b) $M^* = 1$

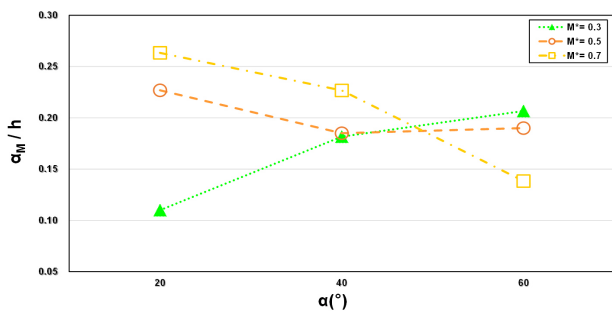


Fig. 5. Maximum amplitude by complex landslide models

에서는 $M^* = 0.3$ 이 최대, $M^* = 0.7$ 이 최소의 진폭을 보였다. 본 연구에서는 산사태 모형의 질량비 M^* 를 제외한 모든 수로조건을 동일하게 설정하였다. 산사태 모형의 두께 s 의 영향도 동일하게 나타났으며, 물 튀김 현상 또한 낮은 수로

경사에서는 작은 규모로, 높은 수로경사에서는 큰 규모로 발생하였다. 즉, 복합형태 산사태 모형에 의해서 생성되는 진폭의 크기에 영향을 줄 수 있는 인자는 산사태 모형의 질량비 M^* 로 완만한 경사에서는 토사류와 같은 작은 입자들의 영향력이 강하고, 급경사에서는 바위같은 질량 덩어리의 영향력이 강하다고 분석될 수 있다.

본 연구에서 수행한 모든 질량비 M^* 에서 수로경사에 따라 생성되는 최대진폭은 Fig. 6에 나타난다. 모든 경사조건에서 복합형태 산사태 모형에 의해서 생성되는 최대진폭의 크기가 순수 입상, 순수 블록형태 산사태 모형에 의해서 생성되는 충격파의 크기보다 크게 관측되었다. 이는 만일 초기 에너지가 동일한 산사태의 경우 순수한 토사류나 순수한 바위에 의해서 생성되는 충격파의 크기보다 토사류와 바위가

함께 거동하며 생성해 내는 충격파의 크기가 더 크다고 분석된다.

모든 질량비 M^* 에 대해서 산사태 모형의 충돌속도와 Froude 수를 산정하였다. 60fps, 240fps의 카메라와 10Hz 성능의 수면변위센서를 이용하였으며, Fig. 7과 Table 2에 나타났다. 충돌속도는 수로경사가 증가함에 따라 모든 산사태 모형에서 증가하였다. Froude 수는 $F_r = V_s / (gh)^{1/2}$ 로 계산되며, V_s 는 충돌속도, g 는 중력가속도, h 는 수심이다. 선행 연구들에서 입상형태 산사태 모형의 경우, 공압용 산사태 발생기(pneumatic landslide generator)를 사용하여 실험을 수행하였다(Fritz & Moser, 2003). 블록형태 산사태 모형의 경우, 산사태 모형 바닥면에 바퀴의 역할을 해주는 장치

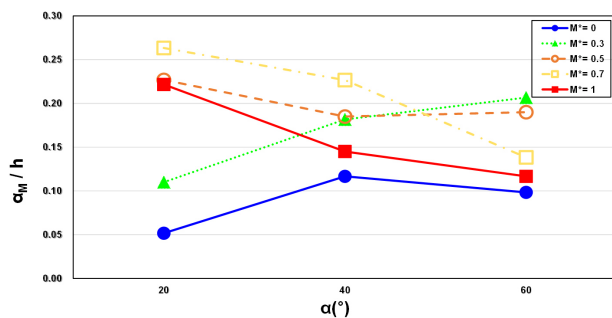


Fig. 6. Maximum amplitude by all landslide models

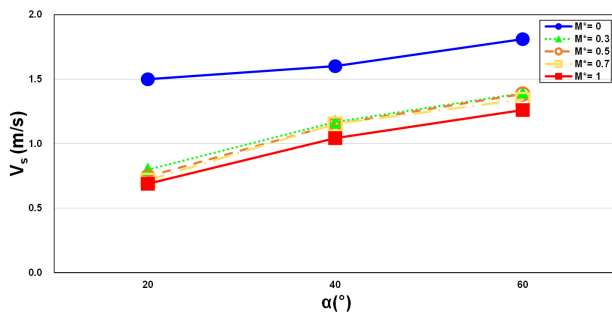


Fig. 7. Impact velocity of all landslide models

를 장착하거나(Lindstrom, 2016), 경사로 자체에 윤활처리를 해주어서(Ataie-Ashtiani & Nik-Khah, 2008) 마찰력을 0으로 설정하여 실험을 수행하였다. 하지만 본 연구의 주목적 중 하나는 실험에서 도출된 결과에 보다 현장요건을 반영하기 위함이었고, 실제 현상에서 마찰력 없는 경우는 없다고 판단하였다. 때문에 본 연구에서는 마찰력이 있는 환경에서 실험을 수행하였고, 이러한 마찰력의 차이는 Froude 수에 가장 큰 요인으로 작용하는 충돌속도 V_s 에 영향을 미치게 되어 본 연구에서의 충돌속도와 Froude 수가 선행연구에 비해서 작게 측정된 것으로 분석된다.

4. 결 론

산사태로 인해 생성되는 충격파는 일반적으로 산사태 충격파라고 하며, 특정 지역에 국한되지 않고 발생한다. 수역 인근에서 발생하는 산사태 충격파는 인명과 기반시설에 치명적인 피해를 끼친다. 하지만 국내에서 산사태 충격파에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 산사태로 인해 발생하는 충격파의 특성을 알아보기 위해 산사태 모형 실험을 수행하였으며, 생성되는 충격파의 특성 중 파진폭을 중점으로 관측하고 분석하였다. 본 연구에서 설정한 산사태 모형의 질량비 M^* 에 따라서 순수 입상형태($M^* = 0$), 순수 블록형태($M^* = 1$), 복합형태($M^* = 0.3, 0.5, 0.7$)의 5가지의 조건과 20°, 40°, 60°의 3가지 경사조건으로 15개의 케이스에 대해서 5회 반복실험하여 총 75회의 실험을 수행하였다. 이러한 조건을 바탕으로 수행한 수로실험의 결론은 다음과 같다.

- (1) $M^* = 0, M^* = 1$ 의 실험을 비교한 결과, 모든 경사조건에서 $M^* = 1$ 에 의해서 생성되는 진폭의 크기가 $M^* = 0$ 에 의해서 생성되는 진폭의 크기보다 크게 관측되었다. 이러한

Table 2. Experimental parameters of all landslide models

Parameter	Present study			Prior Study	
	Granular type	Block type	Complex type	Granular type	Block type
				Fritz & Moser (2003)	Saelebek et al. (2009)
Slope angle α (°)	20 40 60	20 40 60	20 40 60	30 - 60	45
Landslide mass M_T (kg)	15	15	15	10.09 - 113.3	52.6 - 175.47
Water depth h (m)	0.2	0.2	0.2	0.15 - 0.675	0.12 - 0.16
Impact velocity V_s (m/s)	1.56 - 1.81	0.82 - 0.88	0.82 - 1.26	2.06 - 8.77	2.45 - 3.56
Froude number F_r (-)	0.49 - 0.90	1.12 - 1.30	0.51 - 0.99	0.86 - 6.83	1.0 - 1.5

이유는 산사태 모형의 두께 s 가 진폭 형성에 영향을 미쳤기 때문으로 분석되었으며, 산사태 모형의 두께 s 의 영향은 급경사보다 완만한 경사에서 더 크게 작용한다.

- (2) 복합형태 산사태 모형($M^* = 0.3, 0.5, 0.7$)의 실험결과, 수로경사 20° 에서는 $M^* = 0.3$ 이 최소, $M^* = 0.7$ 이 최대의 진폭을 보였지만, 수로경사 60° 에서는 $M^* = 0.7$ 이 최소, $M^* = 0.3$ 이 최대의 진폭을 보였다.
- (3) 모든 질량비 M^* 의 산사태 모형의 실험결과, 수로경사 20° , $M^* = 0.3$ 인 경우를 제외하고 모든 경사조건에서 복합형태 산사태 모형에 의해서 생성되는 충격파가 순수 입상형태, 순수 블록형태 산사태 모형에 의해서 생성되는 충격파의 크기보다 크게 관측되었다. 이러한 결과는 만일 초기 에너지가 동일한 산사태가 발생했을 경우, 순수한 토사류나 순수한 바위에 의해서 생성되는 충격파의 크기보다 토사류와 바위가 함께 거동하며 발생하는 충격파의 크기가 더 크다고 분석될 수 있다.

본 연구에서 입상형태 산사태 모형으로 사용한 글라스 비드는 실제 흙에 비해서 매우 균질한 재료이다. 이런 재료적인 차이로 인해 실험결과가 실제 현상과 완전히 일치하지 않을 수 있다. 본 연구에서의 결과는 추후 수역 인근에서 발생하는 산사태 충격파를 고려하여 댐 등의 수공 구조물의 설계 시 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R111A3054408).

References

1. Ataie-Ashtiani, B. and Najafi-Jilani, A. (2008), Laboratory investigations on impulsive waves caused by underwater landslide, *Coastal Engineering*, Vol. 55, No. 12, pp. 989~1004.
2. Evers, F. M. and Hager, W. H. (2015), Impulse wave generation: Comparison of free granular with mesh-packed slides, *Journal of marine science and engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 100~110.
3. Fritz, H. M., Hager, W. H. and Minor, H. E. (2003), Landslide generated impulse waves, *Experiments in Fluids*, Vol. 35, No. 6, pp. 505~519.
4. Fritz, H. M. and Moser, P. (2003), Pneumatic landslide generator, *International Journal of Fluid Power*, Vol. 4, No. 1, pp. 49~57.
5. Fuchs, H., Pfister, M., Boes, R., Perzmaier, S. and Reindl, R. (2011), Impulse waves due to avalanche impact into Kuehtai reservoir; Impulswellen infolge Lawineneinstoss in den Speicher Kuehtai, *Wasserwirtschaft*, Vol. 101, No. 1-2, pp. 54~56.
6. Fukii, N., Matsuyama, M. and Mori, H. (2018), Hydraulic experiments of tsunami generation with plane water tank due to landslide, *Doboku Gakkai Ronbunshu B2, Kaigan Kogaku (Online)*, Vol. 74, No. 2, pp. 1~145.
7. Heller, V., Bruggemann, M., Spinneken, J. and Rogers, B. D. (2016), Composite modelling of subaerial landslide-tsunamis in different water body geometries and novel insight into slide and wave kinematics, *Coastal Engineering*, Vol. 109, pp. 20~41.
8. Heller, V. and Hager, W. H. (2014), A universal parameter to predict subaerial landslide tsunamis?, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 400~412.
9. Heller, V. and Spinneken, J. (2013), Improved landslide-tsunami prediction: effects of block model parameters and slide model, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 118, No. 3, pp. 1489~1507.
10. Huang, B., Wang, S. C. and Zhao, Y. B. (2017), Impulse waves in reservoirs generated by landslides into shallow water, *Coastal Engineering*, Vol. 123, pp. 52~61.
11. Jang, H., N. and Lee, J. Y. (2007), Case Study of Earthquake Damage in Korea and Countries, *Journal of Civil Engineers*, Vol. 55, No. 4, pp. 133~139 (In Korean).
12. Kim, B. J. and Paik, J. C. (2021), 3D numerical modeling of impact wave induced by landslide using a multiphase flow model, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 11, pp. 943~953 (In Korean).
13. Lee, J. H. (1998), The characteristics of the earthquake-induced landslide disaster and the influence of forests, *Monthly Forestry Information*, Vol. 86, pp. 44~47 (In Korean).
14. Lee, S. I., Seo, J. I., Kim, J. H., Ryu, D. S., Seo, J. P., Kim, D. Y., and Lee, C. W. (2017), International research trend on mountainous sediment-related disasters induced by earthquakes, *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 106, No. 4, pp. 431~440 (In Korean).
15. Lindström, E. K. (2016), Waves generated by subaerial slides with various porosities, *Coastal Engineering*, Vol. 116, pp. 170~179.
16. Løvholt, F., Pedersen, G. and Gisler, G. (2008), Oceanic propagation of a potential tsunami from the La Palma Island, *Journal of Geophysical Research, Oceans*, Vol. 113, C09026.
17. Miller, D. J. (1960), The Alaska earthquake of July 10, 1958: giant wave in Lituya Bay, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 50, No. 2, pp. 253~266.
18. Sælevik, G., Jensen, A. and Pedersen, G. (2009), Experimental investigation of impact generated tsunami; related to a potential rock slide, Western Norway, *Coastal Engineering*, Vol. 56, No. 9, pp. 897~906.
19. Semenza, E. and Ghirotti, M. (2000), History of the 1963 Vaiont slide: the importance of geological factors, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 59, No. 2, pp. 87~97.
20. Seo, J. L., Lee, S. I., Kweon, H. K., Jun, C. W., Kim, S. W., Jun, K. W., Kim, J. H. and Lee, C. W. (2018), Future research direction in response to mountainous sediment-related disasters induced by earthquakes in South Korea, *Crisisonomy*, Vol. 14, No. 3, pp. 119~138 (In Korean).
21. Seo, J. P., Eu, S., Lee, K. H., Lee, C. W. and Woo, C. S. (2021), A Study on Risk Assessment Methods for Earthquake-Induced Landslides, *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 17, No. 4, pp. 697~709 (In Korean).
22. Vischer, D. and Hager, W. H. (1998), *Dam hydraulics (Vol. 2)*, Chichester: Wiley.