사면경사 변화에 따른 토석류의 거동 분석
Analysis of Debis Flow according to Change of Slope Angle

박병수[1], Byung-Soo Park, 전상현[2], Sang-Hyun Jun, 유남재[3], Nam-Jae Yoo
한광두[4], Kwang-Doo Han, 윤영호[5], Young-Ho Yoon,

[1] 강원도립대학 건설토목과 조교수, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Gangwon Provincial College
[2] 세경대학 토목과 전임강사, Full Time Instructor., Dept. of Civil Eng., Saekyung College
[3] 강원대학교 토목공학과 교수, Prof., Dept. of Civil Eng., Kangwon National University
[4] (주) 이산 부사장, Executive Vice President., ISan Corporation
[5] 강원도립대학 건설토목과 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., Gangwon Provincial College

SYNOPSIS : This study is an experimental research for the dispersion behavior and impact characteristics of debris flow according to change of slope. Large scale experimental setup for the debris flow was established to simulate the artificial rainfall and control the ground slope.

Parameters such as materials of debris flow, slope, and length of slope were used for the experiments. After the experiments, it was found that the speed of ground material components was increased about 28～47%. It was found that speed can be increased by increasing the particle size. Furthermore, maximum/final loads for ground material components were increased 89% for the coarse aggregate and 68% for the fine aggregate comparing with sand.

Keywords : debris flow, artificial rainfall, impact characteristics

1. 서 론

우리나라에서는 태풍 등의 도래와 함께 집중호우가 발생하는 여름철에 사면활동이 많이 발생하고 있으며 최근에는 도로변 절개지 붕괴에 의한 것 뿐만 아니라 토석류로 인해 큰 피해가 발생하여 그에 대한 관심이 증가하고 있다. 토석류(土石流, Debris flow)는 물의 토석이 함께 결합해서 발생하는 복합적인 자연재해로 토석류에 의한 피해는 매년 증가하고 있는 추세로 국내외적으로 관심이 높아지고 있으며 이에 대한 방재대책이나 사면보강방안이 절실히 요구되는 실정이다

토석류의 발생 원인을 규명하고 그에 대한 대책을 강구하기 위해 국내외적으로 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 최근에는 실험적으로 규명하기 위하여 대형 실험 장비를 만들어 많은 연구를 수행하고 있다.

Mainali 등은(1994) 길이 4.25m, 폭 5.1cm의 토석류 실험 장비에 펌프를 이용하여 일정한 농도로 토석류를 발생시킨 실험을 실시한 후 입경이 감소함에 따라 깊이별 농도분포 및 속도분포가 일정해 지며 입경이 큰 경우에는 하층의 농도가 높고 전단력 또한 높게 형성된다고 보고 하였다. Bilesavar(2008)은 원심모형시험기를 통하여 지하수 흐름과 인공강우를 동시에 모델링하여 파괴시 전단에 의한 과잉간극수압의 발생과 소산을 관찰하여 강우강도와 지하수가 파괴의 주요원인임을 규명하였고, Bowman 등은(2006) 원심모형실험을 통하여 토석류 발생 현장과 같이 토석류 발생시 큰 입자가 앞쪽에 형성됨을 확인하였다. 또한, Moriwaki 등은(2004) 길이 23m, 높이 7.8m, 폭 3m의 실규모 토조에 상부와 하부의 사면경사를 달리하여 1.2m 두께의 지반을 조성한 후 각종 계측기와 함께 인공강우에 따른 사면거동을 관찰하여

사면활동이 경사부 하단에서 초기이동이 발생하여 파괴가 진행됨에 따라 상단과 중앙에서 지반의 이동속도가 증가하여 파괴에 이르는 토석류의 거동에 대한 연구를 수행하였다.

한편, 국내에서는 채병곤 등은(2006) 인공강우장치와 함께 길이 2.3m, 높이 0.5m, 폭 0.3m 의 모형토조를 제작하여 강우강도와 사면경사 변화에 따른 실험을 실시하여 산사태 발생양상 및 사태물질의 확산특성을 분석하였으며, 이승호 등은(2007) 총길이 3.2m, 높이 1.9m, 폭 1m 토조를 조립식으로 하여 실험에 따라 원하는 길이 및 높이로 추가 조립할 수 있도록 제작하였고 강우강도에 따른 사면 붕괴현상을 간극수압과 함수비로 상호관련성을 파악하였다.

본 연구에서는 토석류 거동에 대한 실내실험을 위하여 대형 토석류 시험기를 개발하고, 개발된 실내 시험장비로 부터 현장의 사면경사, 지반구성물질 등의 매개변수를 변화시키는 실험을 실시하여 토석류 방호책에 미치는 충격특성을 알아보고자 하였다.

2. 대형 토석류 시험기의 개발

대형 실내 모형실험을 하기 위하여 개발된 시스템의 정면도와 평면도를 그림 1, 2에 도시하였다. 실험 시스템은 크게 세부분으로 사면조성을 위한 굴절토조 시험장치와 인공강우를 구현하기 위한 인공강우재현 장비, 토석류의 방출을 위한 토사방출장치로 구성하였다.

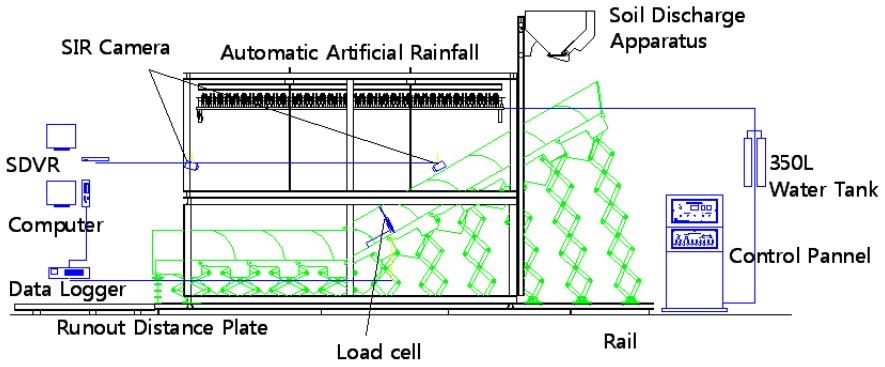

그림 1. 대형 토석류 모형실험 시스템(정면도)

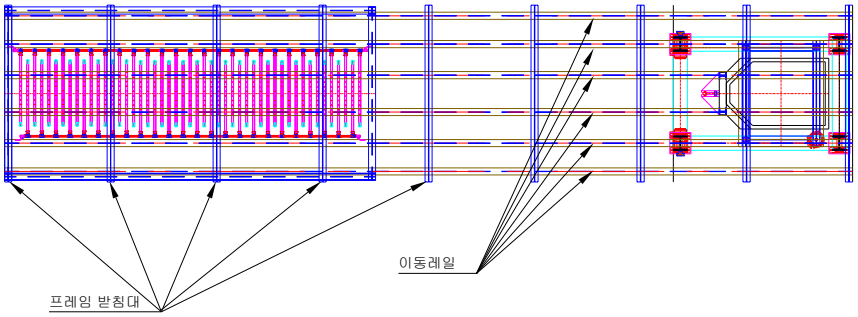

그림 2. 대형 토석류 모형실험 시스템(평면도)

또한 시험 장비는 모두 컴퓨터의 소프트 웨어에 의해 제어되며, 계측기는 데이터 수집장치와 연결되어 토석의 움직임을 관찰함과 동시에 소프트웨어를 통해 처리 할 수 있도록 하였다. 데이터 수집장치는 디스플레이 패널, 앰프 모듈, 센서연결모듈로 구성되며 센서종류에 따라 모듈을 교체가 가능하도록 하였고 데이터 수집장치의 초당 계측 가능한 데이터 수는 1채널 당 2400H_z까지 지원하고 초당 계측 가능한 데이터 수는 사용자가 원하는데로 선택할 수 있도록 하였다.

2.1 굴절토조 시험장비

굴절토조 시험장비는 사면을 조성하거나 토석류의 이동 계곡부를 재현하기 위하여 폭 600mm, 높이 550mm, 길이 800mm의 블록 10개를 연결하여 사면경사를 나타내었다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 이 시험기는 양쪽 프레임에 바닥면과 첫 번째 블록과 블록과 블록 사이를 힌지로 연결하여 다양한 지형을 재현 가능하도록 하였다. 또한 각 힌지는 유압실린더 유닛에 연결되어 있어 실험자의 설정에 따라 첫 고정점을 기준으로 0°에서 최대 45°까지 자유롭게 각도를 조절할 수 있게 제작하였으며 각 블록의 바닥에는 간극수압계 또는 토압계의 설치를 위하여 홀(Hole)을 설치하였다.
사면조성을 위한 블록 상부의 측면은 높이 550mm의 투명아크릴로 제작하여 토사의 변위를 측면에서 관찰 할 수 있도록 하였고, 토석류 방출시 방호시설에 미치는 충격특성 등을 알아보기 위하여 각 블록의 중간에 방호시설을 설치할 수 있도록 설치부를 가공하였고 로드셀을 설치 할 수 있는 충격력 측정 지지대를 설치하였다.

그림 3. 힌지 및 유압실린더로 구성된 굴절토조 시험장비

2.2 인공강우 재현 장비

그림 4에 나타낸 바와 같이 굴절토조 상부에 위치하는 인공강우재현 장비는 노즐 및 개폐밸브로 구성된 1m단위의 파이프 유닛에 주사바늘을 장착하여 강우를 발생시킬 수 있도록 하였다. 강우량은 5~50 mm/hr, 50~100mm/hr, 100~250mm/hr로 단계별로 강우량을 조절할 수 있으며 그림 5와 같은 리듈밸브 및 순간유량계를 이용하여 강우를 조절할 수 있도록 제작하였다. 또한 실제 강우상태와 유사한 강우를 재현할 수 있도록 강우 진동장치를 설치하여 한 부분에 강우가 집중되는 것을 방지하였고 솔레노이드 밸브를 이용하여 강우량을 조작하고 강우량은 디지털로 표시되도록 하였으며 전체적으로 컴퓨터를 이용하여 제어할 수 있도록 하였다.

2.3 토사방출 시험장비

그림 6은 토사방출을 위한 시험장비를 나타낸 것으로 토사방출을 위한 장비는 350리터 용량의 적재탱크를 각도 조절장치를 이용하여 프레임 위에서 사면으로 토사를 방출할 수 있도록 하였다. 적재탱크의 최대 유출각도는 45°로 하였으며, 바닥에서 적재탱크에 토사와 자갈을 적재한 후 승강레일을 이용하여 상부 방출지점으로 이동할 수 있도록 하였다.

그림 4. 인공강우 재현장비

그림 5. 유량계

그림 6. 토사방출 시험장비

3. 실내실험

지반의 구성 물질 변화에 따른 토석류 방호책에 미치는 충격특성을 분석하기 위하여 다음 표 1과 같은 실내실험을 수행하였다.

표에 나타낸 바와 같이 충격특성을 알아보기 위하여 토석류 구성물질과 사면길이, 경사 등을 매개변수로 하였으며 토석류 구성물질은 굵은골재(25mm이하), 잔골재(8mm이하), 모래(주문진 표준사)로 하였고, 사면길이는 2, 3, 4m, 사면경사도는 20°, 30° 두가지로 변화시켜 실험을 수행하였다.

표 1. 토석류 충격특성 시험내역

사면길이	2 m		3 m		4 m	
경사(°)	20°	30°	20°	30°	20°	30°
굵은골재	–	●	●	●	●	●
잔 골 재	–	●	●	●	●	●
모 래	–	●	–	●	●	●

3.1 실험과정

토석류가 사방댐에 미치는 충격량 특성에 대한 실험과정을 정리하면 다음과 같다. 먼저, 지반구성물질의 유로부 이동속도를 측정하기 위하여 토석류 시험기 유로부 바닥면에 5cm 눈금의 줄자를 붙이고, 스트레인 게이지를 30cm간격으로 설치하여 데이터 로거와 연결하였다.

줄자 및 스트레인 게이지의 부착이 완료된 이후에는 중앙조절 판넬의 각도 조정장치를 이용하여 굴절토모의 각도를 원하는 각도로 조절하였는데 이때 각도는 하부에 설치된 유압실린더에 의하여 조절되었으며, 유로부분에 해당하는 각 80cm 길이의 10개 토조판에서 중앙부분인 4번~9번의 토조판을 주로 실험에 이용하였다.

사면의 경사도 조정이 완료되면 유로의 종단부분에 토석류의 충격량을 측정할 수 있는 충격량 측정 로드셀 장치(전면판)를 설치하였다. 그림 7에 나타낸 바와 같이 충격량 측정장치는 토조측면부에 고정시키도록 제작되었으며 전면판은 강화 아크릴판으로 제작되었고 전면판 후면에 로드셀을 설치하여 상부로부터 밀려내려온 토석류가 전면판에 충격을 가하게 되면 후면부에 설치된 로드셀로부터 하중을 측정할 수 있도록 제작하였다. 한편, 전면판에 부딪히는 토석류의 면적측정을 위하여 2cm 간격으로 격자(Grid)를 그려 실험하였다.

또한, 실험을 시작하기 전에 실험기의 유로부를 통과하여 이동하는 토석류 이동과정과 종단부분에 설

치된 전면판에 부딪히는 토석류를 측정하기 위하여 카메라 2대를 설치하였으며 카메라는 DVR과 연결하여 DVR과 연결된 모니터를 통하여 실험과정을 관찰하였다.
실험에 이용할 자갈 또는 모래 등이 지반구성물질 100kg을 토사방출장치에 넣고 모터작동에 의해 토사방출장치를 상부로 올린 후, 전체 강우장치를 전진시켜 토사방출장치와 굴절토조모형시험 장치를 일치시키고 적재된 토사를 방출시켜 실험을 수행하였으나 본 연구에서는 건조상태의 지반구성물질을 사용하였으므로 강우장치는 사용하지 않았다.

이러한 일련의 실험과정은 SDVR에 저장된 카메라 영상데이터를 얻도록 하였으며 계측기는 데이터로거 MGCplus를 통하여 획득하였고 데이터 로거에 내장된 Catman프로그램으로 부터 측정된 스트레인게이지 값과 Load Cell 값을 계산하였다.

평면사진 정면사진 측면사진

그림 7. 종단부에 설치된 충격량 측정 로드셀

4. 결과분석

사면길이와 사면경사, 지반 구성물질을 변화시킨 충격특성 시험에 대한 결과를 그림 8~13에 도시하였으며, 사면길이 2m, 경사 30°에 대하여 토사방출 후 유로부 및 충격판에 도달하였을때 사진을 그림 14~16에 대표적으로 나타내었다.

그림 8~11은 사면경사 30°에 대하여 지반구성물질을 변화시킨 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 8에 도시한 바와 같이 사면길이가 증가할수록 지반구성물질의 이동속도는 증가하는 경향성을 나타내었다. 사면길이가 2m에서 4m로 증가할수록 굵은 골재는 3.38m/sec에서 4.28m/sec로 약 27% 증가하였으며 잔골재는 3.33m/sec에서 3.77m/sec로 약 13% 증가하였으나, 모래의 경우는 별다른 차이를 나타내지 않았다. 모래의 경우 입경이 작아 유로부와의 마찰로 인하여 이동속도가 작게 나타나는 반면, 입경이 잔골재, 굵은골재로 커질수록 유로부와의 마찰이 감소하며 중력에 의한 이동속도가 증가하는 경향성을 보인다. 따라서 모래의 경우 며 사면길이에 대한 변화에 대하여 미소한 변화를 나타내는 이유는 작은입경과 유로부와의 마찰에 기인한 것으로 판단된다.

한편, 그림 9는 사면길이에 대한 최대/최종하중을 도시한 그림으로 최대/최종하중은 사면길이에 대하여 별다른 경향성을 나타내지는 않았으나 입경이 모래에서 굵은골재로 커질수록 충격판에 미치는 충격량은 증가하는 경향성을 나타내었고 토석류가 유로를 따라 충격판에 충돌시 최대하중을 나타낸 후 실험이 종료하게 되면 하중은 최대하중보다 3.5~14.6% 범위로 감소하여 일정하게 수렴하는 것 나타났다. 사면길이 4m에 대한 최대하중은 굵은골재 29.8kg, 잔골재 26.4kg, 모래 15.8kg으로 예상한대로 중량이 커질수록 충격하중은 크게 측정되었으며 모래와 비교하여 굵은골재는 약 89%, 잔골재는 약 68%정도 증가하였다.

그림 10, 11은 지반구성물질에 대한 이동속도와 최대/최종하중을 도시한 것으로 전술한 바와 같이 모래에서 잔골재, 굵은골재로 입경이 커질수록 이동속도가 증가하는 경향성을 나타내며, 최대/최종하중의 비도 증가함을 볼 수 있다.

그림 12, 13은 사면길이 4m를 기준으로 하여 지반구성물질에 따라 사면경사를 변화시킨 결과이다.
그림 12에서 볼 수 있듯이 사면경사가 20°에서 30°로 증가할수록 이동속도는 모래 2m/sec에서 2.6

m/sec으로 약 27.6%증가, 잔골재는 2.9m/sec에서 3.8m/sec로 약 30%증가, 굵은골재는 2.9m/sec에서 4.3m/sec으로 약 47%증가하였다. 따라서 사면경사가 증가할수록 이동속도는 지반구성물질에 따라 27.6~47% 증가하였으며 입경이 커질수록 그의 증가폭은 크게 나타났음을 알 수 있다.

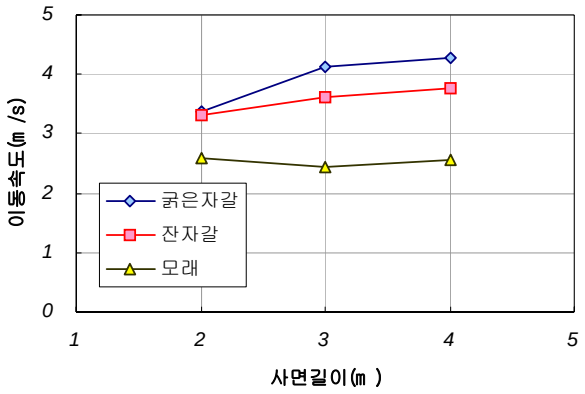

그림 8. 사면길이 변화에 따른 이동속도

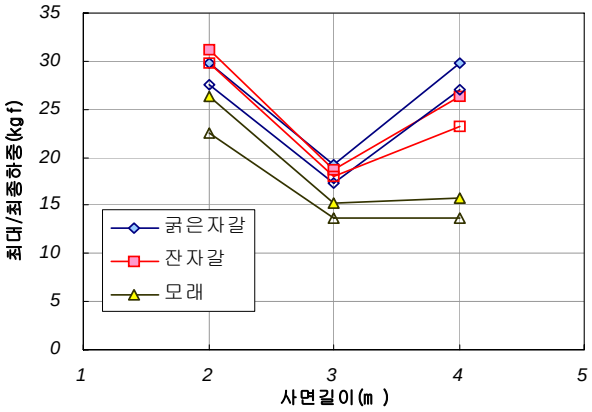

그림 9. 사면길이에 변화에 따른 최대/최종하중

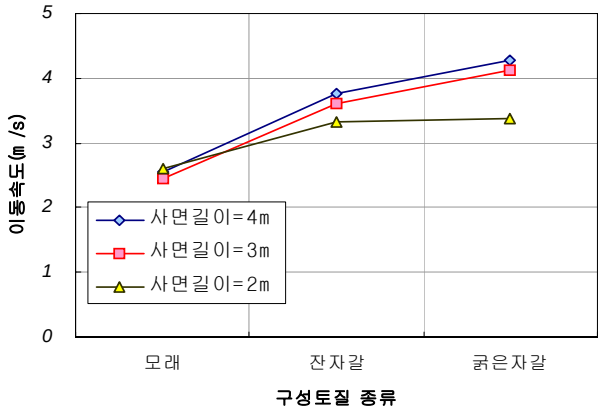

그림 10. 지반구성물질의 사면길이별 이동속도

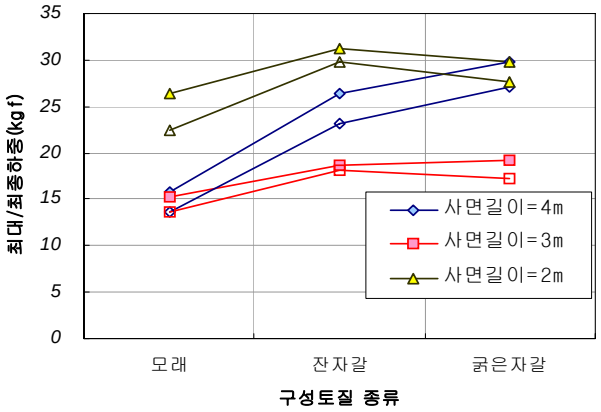

그림 11. 사면길이별 최대/최종하중 분포

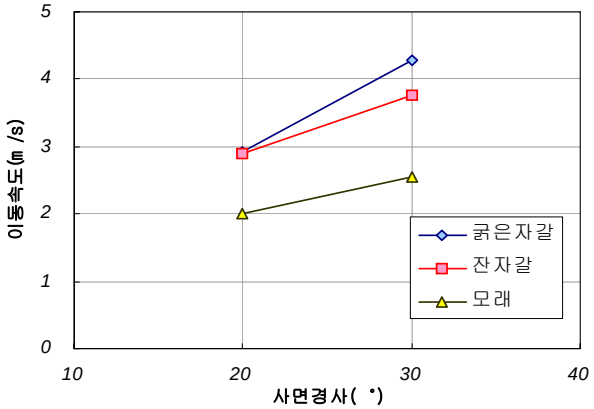

그림 12. 사면경사에 따른 이동속도 분포

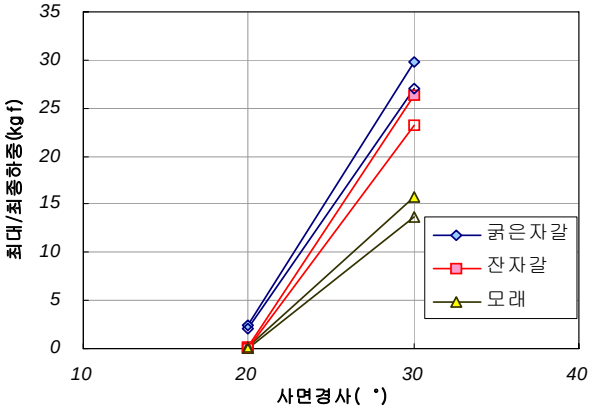

그림 13. 사면경사에 따른 최대/최종하중 분포

한편, 그림 13은 사면경사 변화에 대한 최대/최종하중을 도시한 것으로 사면경사 20°일때 모래와 잔자갈의 하중이 각각 0.06kg, 0.04kg으로 나타나 매우 작게 측정되었음을 알 수 있다. 이러한 이유는 사면

경사가 낮은 경우 입경이 작은 모래와 잔골재는 낙하에너지가 유로부의 마찰력보다 작아 충돌판까지 도달하지 못하였기 때문이다. 따라서 제한적인 실험결과로부터 일반적으로 사면경사가 작은 경우 현장에서 토석류의 이동은 매우 작게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

또한, 사면경사 30°일때 지반구성물질이 초기 유로를 따라 충돌판에 충격시 최대하중을 나타낸 후 토석류의 이동이 종료됨에 따라 최종하중으로 수렴되는 것으로 나타났으며, 모래, 잔골재, 굵은골재 각각에 대하여 13.5, 12.3, 9.3%로 감소하는 경향성을 나타내었고 입경이 커질 수록 그의 감소폭은 작아 짐을 알 수 있다.

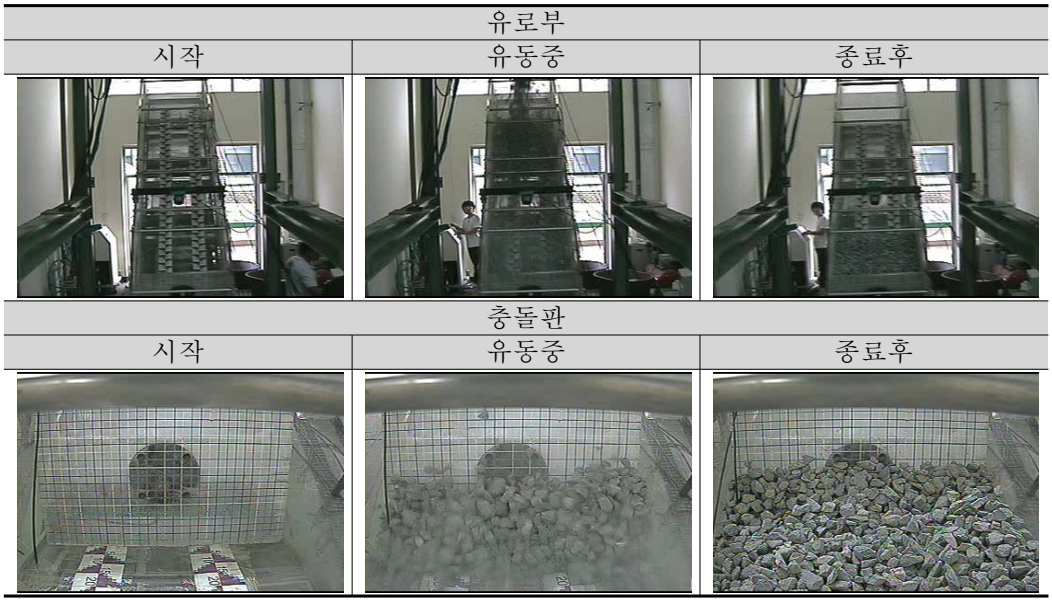

그림 14. 충격량 특성실험(굵은골재/길이2m/경사30도)

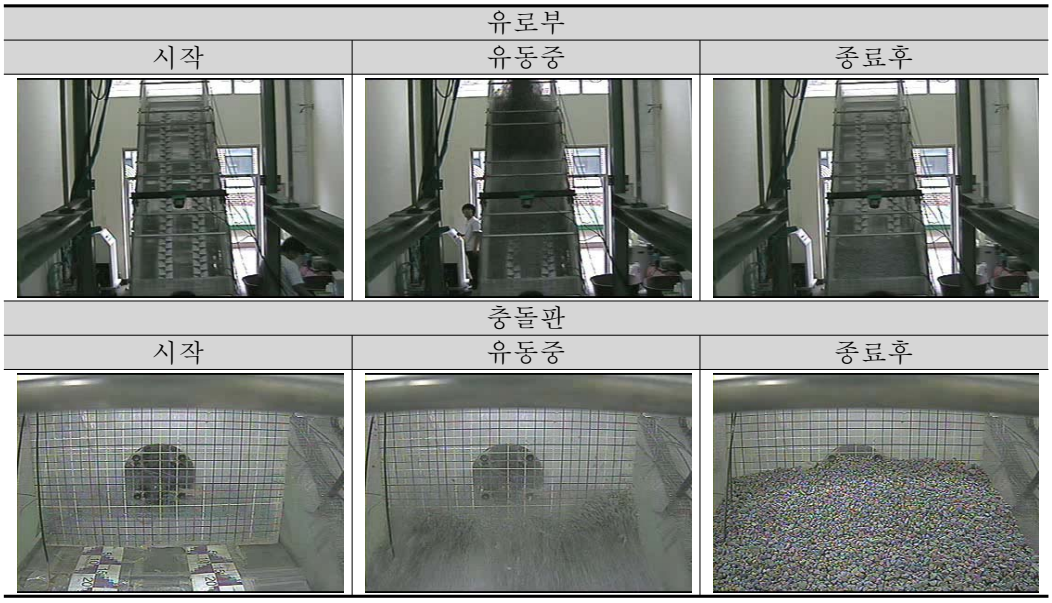

그림 15. 충격량 특성실험(잔골재/길이2m/경사30도)

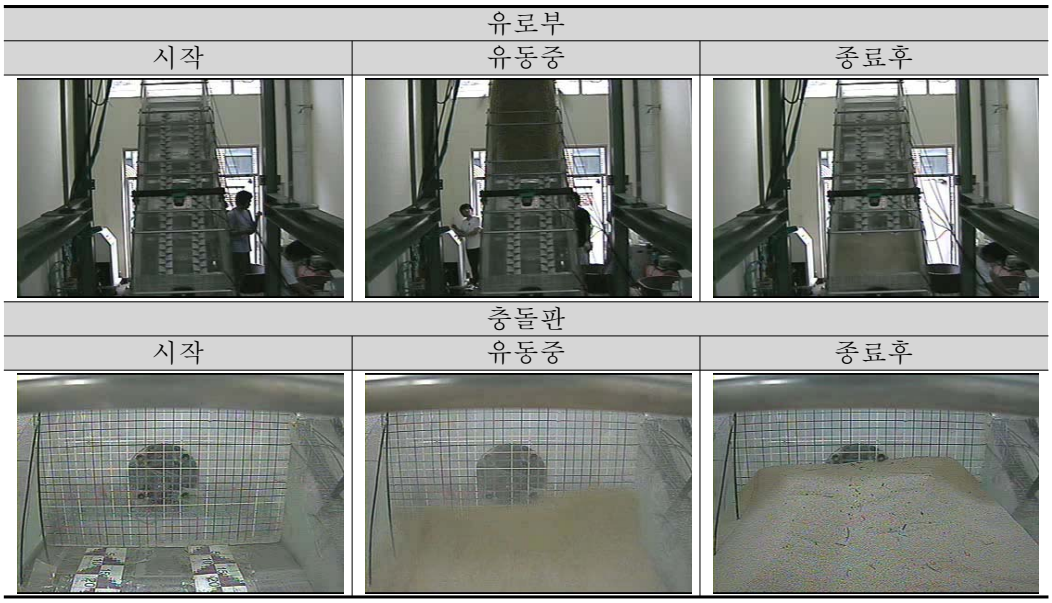

그림 16. 충격량 특성실험(모래/길이2m/경사30도)

5. 결론

본 연구는 사면경사 변화에 따른 토석류 구성물질이 방호시설에 미치는 거동을 알아보기 위하여 실내 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 인공강우가 구현가능하며 현장의 사면경사를 자유롭게 조절할 수 있는 실내 대형 토석류 실험장비를 설계 개발하였다.
2) 충격특성을 분석하기 위한 실험결과 사면경사가 커질수록 지반구성물질의 이동속도는 약 28~47% 증가하였으며 입경이 커질수록 그의 증가폭은 크게 나타났다.
3) 사면경사 변화에 따른 충격특성 실험결과, 지반구성물질에 대한 최대/최종하중은 모래와 비교하여 굵은골재는 약 89%, 잔골재는 약 68% 증가하였다.

참고문헌

1. 이승호, 황영철, 지영환, 정지수(2007), “인공강우장치를 이용한 산사태모형토조실험에 관한 기초적 연구”, **2007대한토목학회 정기학술대회 발표논문집**, pp.771~776.
2. 채병곤, 이성호, 송영석, 조용찬, 서용석(2007), “산사태 모형실험을 통한 강우강도 및 사면경사 변화와 간극수압과의 관계연구:편마암 풍화토를 대상으로”, **지질공학회지**, Vol.17, No.1, pp.57~64.
3. Bilesavar, R. D.(2008), "Physical modelling of flowslide mobility", *MS thesis, Queen's University*, Ontario, Canada.
4. Bowman, E. T., Laue, J., Imre, B., Zweidler, A., Springman, S. M.(2006), "Debris flows in geotechnical centrifuge", *Physical Modelling in Geotechnics 6th ICPMG'06*, pp.311~316.
5. Mainali, A., Rajaratnam, N.(1994), "Experimental study of debris flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.120, No.1, pp.104~123.
6. Moriwaki, T., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., Wang, G.(2004), "Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator", *Landslides4*, pp.277~288.