

## 낙석 특성을 고려한 낙석 시뮬레이션 해석 연구

### A Study on the Analysis of Rockfall Simulation using Rockfall Characteristics

이종현<sup>1)</sup>, Jong-Hyun Rhee, 구호본<sup>2)</sup>, Ho-Bon Koo, 박혁진<sup>3)</sup>, Hyuck-Jin Park, 배규진<sup>4)</sup>, Gyu-Jin Bae

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute Construction Technology

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Researcher Fellow, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute Construction Technology

<sup>3)</sup> 세종대학교 지구정보공학과 조교수, Assistant Professor, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 연구위원, Researcher Manager, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute Construction Technology

**SYNOPSIS :** It conducted an analysis and the research against kinetic energy distribution, velocity and bounce height according to rockfall characteristics using rockfall simulation program in cut-slope. This study considered kinetic energy and bounce height of rockfall for efficient establishment of rockfall protection fence that is countermeasure in cut-slope.

**Key words :** rockfall, rockfall characteristics, the analysis of rockfall simulation

## 1. 서 론

지난 수 십 년 동안 국내·외에서 산사태나 사면안정에 관한 연구들이 활발하게 진행되어 왔으며, 이에 따라 괄목할 만한 성과를 거두고 있다. 특히, 흩사면과는 다른 파괴양상을 보이는 암반사면의 파괴에 대한 연구가 다수 진행되었으며, 안정성 해석 분야에 있어서도 경계요소법이나 확률론적 해석법 등과 같은 새로운 기법들이 제안되었다. 이러한 암반사면 분야에서의 비약적인 발전은 수일이나 수주간에 걸쳐 교통에 지장을 줄 수 있는 대규모의 붕괴에 초점이 맞추어진 상태이며, 경사가 급한 사면에서 소규모의 암 탈락으로 발생하는 낙석에 대한 연구는 국내에서 거의 진행되고 있지 않은 실정이다. 또한, 최근 각 도로에서 교통량이 급속도로 늘어나고, 이에 따라 낙석의 피해가 증가하는 상황이므로 낙석에 대한 관심과 연구의 필요성도 증대되고 있다.

본 연구에서는 형상과 규모에 따른 낙석의 특성별로 그 운동과 영향 요인을 고찰하고, 선정된 대상 사면에 대해 낙석 시뮬레이션 프로그램을 수행하여 낙석 특성별 운동에너지 분포와 낙하속도, 도약높이 등에 대한 분석과 연구를 수행하였다. 또한, 연구대상 절토사면의 대책 방안인 낙석방지울타리의 효율적인 설치를 위해 낙석의 운동에너지와 도약높이 등을 활용하는 방안을 검토하였다.

## 2. 낙석의 운동과 영향 요인

낙석은 암반내의 불연속면이 확대되고, 암편 등이 떨어져 나오거나 표층 퇴적물, 화산 분출물, 고결도가 나쁜 층내의 암편 등이 표면에 드러나 사면에서 낙하되는 현상을 의미한다. 이에 반해, 사면붕괴는 일반적으로 다량의 토사 및 암석이 사면으로부터 붕괴되는 현상을 의미한다. 암반에서 주로 발생하는

붕괴는 낙석과 유사하며 확실히 구분되지는 않으나, 낙석은 개수로 표현될 수 있는 소량의 것을 의미하며, 소규모의 암석 붕괴는 대책을 고려할 경우 낙석과 동일하게 취급되는 경우가 많다.

낙석을 발생시키는 암반사면의 파괴는 주로 불연속면 사이의 수압, 지진이나 발파와 같은 진동, 그리고 사면의 절개와 같은 원인으로 발생하며, 이러한 원인에 의해 발생하는 낙석은 사면으로부터 암블록이 떨어져 나와 활동하는 암반사면의 파괴로부터 시작된다. 초기 운동이 시작된 낙석은 사면의 특성이거나, 낙석의 특성에 따라 자유낙하(free falling), 도약(bouncing), 회전(rolling) 그리고 미끄러짐(sliding)과 같은 운동 형태를 보인다.

낙석의 운동에 영향을 미치는 요인들은 크게 사면과 암체의 기하학적인 특성과 역학적인 특성으로 구분할 수 있다. 암체와 사면의 기하학적 특성은 암체의 규모나 사면의 경사 및 높이를 의미하며, 역학적인 특성은 쉽게 측정되거나 계산되어지지 않으나 낙석의 에너지 손실로부터 추정할 수 있는 계수들로부터 표현될 수 있다. 반발계수(coefficient of restitution)와 회전 마찰계수(rolling friction coefficient)가 그 대표적인 예이며, 반발계수는 낙석이 사면에 충돌할 때 발생하는 에너지의 손실량이고, 회전마찰계수는 암체가 사면에서 회전할 때 발생하는 마찰을 표현하는 계수이다.

암체의 규모는 부피에 의해 주로 표현되는 낙석운동에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나이다. 또한, 사면의 기하학적인 특성과 거칠기 역시 낙석의 운동에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나로 고려되어진다. 그밖에 낙석의 초기속도와 사면의 거칠기 각도 등이 중요한 요인으로 고려되어진다(Spang and Sonser, 1995).

### 3. 현장개요

연구대상으로 선정된 절토사면은 국도 29호선 상의 전라남도 화순군 이양면에 위치하고 있다. 절토사면의 연장은 180m이며, 높이는 15m로 1:0.5의 구배로 절취되어있다. 국내 국도면 암반 절토사면의 일반적인 형성 높이가 10~20m이고 1:0.5(63°)로 절취된다는 점을 고려한다면, 본 연구대상 절토사면은 국도 주변에서 쉽게 관찰되어지는 전형적인 규모라 할 수 있다(한국건설기술연구원, 1999). 대상 절토사면은 화강암질 편마암으로 구성되어 있으며, 슈미트 해머의 타격 값으로 추정된 일축압축강도는 약 54MPa를 보이고 있다. 구성암반의 상태를 판단하기 위해 현장조사를 통해 획득한 불연속면의 자료를 토대로 계산된 RMR 값과 SMR 값은 각각 52와 43.5로 암반의 상태는 양호한 것으로 판단되었다.

정밀 현장조사로부터 획득한 불연속면의 방향성을 하반구 등면적 투영망에 도시하여 평면 및 썸기 파괴에 대한 안정성을 검토한 결과, 평면파괴와 썸기파괴의 파괴가능 영역 내에 도시된 절리군은 관찰되지 않았다. 따라서, RMR 및 SMR의 값과 평사투영망을 이용한 안정해석 결과, 불연속면을 따라 발생하는 대규모의 파괴에 대해서는 안정한 것으로 판단된다. 그러나, 절토사면의 일부 구간에서 과발파로 인해 평균 0.1m<sup>3</sup> 규모의 낙석(약 260kg)이 탈락할 가능성이 관찰되고 있어 낙석방지울타리가 사면 보호공법의 일환으로 제안되었다.

현재 국내에서 주로 사용되고 있는 낙석방지울타리는 150×75 규격의 H 형강 지주에 지름 18mm의 와이어 로프를 사용하여 각 지주를 연결한 형식의 울타리가 사용되고 있다. 낙석방지울타리는 지주, 와이어 로프, 철망이 일체가 되어 낙석에너지를 흡수하는 시설로 비교적 소규모의 낙석 대책에 사용되고 있다. 즉, 낙석방지울타리의 흡수 가능 에너지는 와이어 로프의 흡수 가능 에너지, 지주의 흡수 가능 에너지와 철망의 흡수 가능 에너지의 합으로부터 추정할 수 있다. 현재 국내에서 주로 사용되고 있는 낙석방지울타리는 약 50kJ까지의 낙석에너지를 흡수할 수 있는 것으로 보고되고 있다(한국도로공사, 1992). 따라서, 50kJ을 국내에서 시공중인 낙석방지시설의 흡수 가능 에너지로 보고, 낙석 시물레이션 프로그램을 이용하여 본 연구대상 절토사면에서의 낙석 형상 및 규모별 운동에너지, 낙하속도 및 도약 높이에 대한 분석을 실시하고, 대책방안인 낙석방지울타리의 효율적인 설치를 위한 검토를 실시해 보았다.

### 3.1 낙석 에너지의 추정

사면으로부터 낙하하는 낙석의 에너지를 추정하고 낙석 현상을 이해하기 위하여 여러 수학적 모델이 제시되었으며, 컴퓨터의 발달로 이러한 수학적 모델들은 그 이용 가능성과 정확도가 증가하고 있다. 현재 사용되고 있는 수학적 모델들은 크게 두 가지의 종류로 나누어 질 수 있는데 중량을 고려하지 않거나 암체 중심부의 한 점에 질량이 집중되어 있는 것으로 가정하여 낙하운동을 고려하는 모델(Hoek, 1987; Paronuzzi, 1989)과 암체를 질량, 부피 및 특정 형상을 갖는 것으로 가정하는 모델(Spang and Rautenstrauch, 1988)이 있다. 이들 중 암체의 질량과 부피 및 형상을 고려하는 모델이 현장에서 관찰되는 조건을 보다 더 정확하게 표현할 수 있으며, 따라서 더욱 정확한 결과를 기대할 수 있어 폭 넓게 쓰여지고 있다. 본 연구에서 사용된 RockFall 프로그램 역시 이 모델을 기본으로 제작되었다.

이러한 낙석모델은 낙석운동의 결과로 발생하는 낙석의 낙하속도, 도약높이 그리고 낙석의 운동에너지를 추정하는 데 사용되며, 낙석의 발생으로 예상되는 낙석의 도로 내 유입여부를 판별할 수 있다. 본 연구에서 사용된 RockFall 프로그램은 현재까지 개발된 다른 어떤 프로그램보다 낙석에 영향을 주는 변수들을 많이 고려할 수 있으며 입력변수들을 확률변수로 설정, 일정 구간 내에서의 여러 값들을 반복적으로 추정하여 계산을 수행할 수 있다. 특히, 시뮬레이션의 결과 부분에서 평균 낙석의 운동에너지와 도약높이를 사면의 각 지점에서 추정할 수 있으며 낙석방지울타리를 설정할 경우 지정된 지점에서 추정되는 운동에너지와 도약높이의 통계분포를 결과로 출력 가능하다.

본 연구에서 사용된 입력자료는 대부분 현장조사를 통해 획득되었으며, 현장조사를 통해 획득이 불가능한 반발계수나 회전 마찰계수 등은 참고문헌 등을 참고하여 결정하였다. 회전 마찰 계수의 경우 Losenhausen(1978)에 의해 추정되고 제시된 값을 사용하였으며, 반발계수의 경우는 Spang에 의해 제안된 값을 사용하였다.

### 3.2 낙석 운동의 분석

연구대상 절토사면은 주로 암반으로 구성되어 있으며, 구배가 일정하지 않고 굴곡이 심한 편이다. 따라서, 반발계수와 회전 마찰계수는 암반의 특성을 나타내는 수치를 선정하였으며, 그 값은 각각 0.93, 0.02이다. 시뮬레이션에 사용된 낙석은 구형(sphere), 원통형(cylinder), 판형(plate)의 형상을 이용하였으며, 초기속도는 0.1m/sec로 회전하면서 굴러 떨어지기 시작한 것으로 추정하였다.

낙석의 규모는 각 형상별로 7종류를 선정하였으며, 절토사면 하부로부터 1m의 이격거리를 가지고 2.5m의 낙석방지울타리가 설치된 것으로 가정하여 모사를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 낙석 시뮬레이션 프로그램인 RockFall은 각각의 입력변수에 대하여 지정된 범위 내에서 여러 값들을 변화시켜 가며 입력하여 통계적으로 처리가 되어진다. 따라서, 각 입력변수의 특성에 따라 10~30%까지의 범위 내에서 변화시켜가며 100회의 시뮬레이션을 반복하였으며, 해석 결과 값의 최대, 최소, 평균값을 제시하고 있다.

#### 3.2.1 낙석 형상 및 규모에 따른 해석 수행

낙석의 형상을 구형으로 가정한 경우에는 지름을 각각 0.290m, 0.370m, 0.400m, 0.450m, 0.460m, 0.520m, 0.540m로 달리함으로써 낙석의 무게를 총 7종류로 구분하였으며, 낙석의 형상을 원통형으로 가정한 경우에는 지름 : 두께의 비를 각각 0.200m : 0.810m, 0.260m : 1.000m, 0.300m : 0.950m, 0.340m : 1.050m, 0.370m : 0.950m, 0.400m : 1.170m, 0.410m : 1.250m로 달리함으로써 낙석의 무게를 총 7종류로 구분하였다. 또한, 낙석의 형상을 판형으로 가정한 경우에는 지름 : 두께의 비를 각각 0.500m : 0.130m, 0.750m : 0.120m, 0.924m : 0.100m, 1.150m : 0.092m, 1.200m : 0.090m, 1.250m : 0.120m, 1.323m : 0.120m로 달리함으로써 낙석의 무게를 총 7종류로 구분하였다. 이와 같이, 낙석의 형상과 규모를 달리함으로써 해석을 수행한 각각의 경우에 대해 낙석의 운동에너지, 낙하속도, 도약높이 등을 다음의 표 1, 2, 3에 정리하였다.

표 1. 구형(sphere) 낙석에 대한 해석 수행 결과

낙석의 무게 (kg)	운동에너지(kJ)			낙하속도(m/s)			도약높이(m)		
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean
266	23.40	8.65	19.45	31.85	22.16	28.66	3.94	2.20	3.23
552	65.68	16.36	29.21	26.30	17.43	21.45	4.13	1.38	3.26
697	81.42	18.16	36.18	23.46	15.25	19.89	4.29	1.78	3.29
992	118.08	27.25	53.39	21.62	13.92	17.79	4.13	1.43	3.30
1,060	127.37	29.58	56.91	21.75	13.00	17.37	4.20	1.26	3.31
1,531	183.37	45.15	77.16	18.71	12.39	15.34	4.13	1.28	3.30
1,715	204.25	48.22	84.29	17.16	11.74	14.57	4.00	1.38	3.31

표 2. 원통형(cylinder) 낙석에 대한 해석 수행 결과

낙석의 무게 (kg)	운동에너지(kJ)			낙하속도(m/s)			도약높이(m)		
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean
265	22.25	8.91	17.66	41.01	26.30	33.12	3.29	1.23	2.32
552	46.48	18.42	35.26	31.28	20.01	25.83	3.25	1.15	2.39
698	58.78	22.99	45.47	27.52	17.84	22.16	3.31	1.34	2.33
991	83.41	35.12	65.63	24.05	16.29	19.57	3.28	1.55	2.34
1,062	89.25	35.55	64.61	21.54	15.00	18.48	3.18	1.56	2.46
1,529	128.72	51.36	99.41	20.36	13.83	16.60	3.26	1.55	2.33
1,716	144.44	57.33	111.84	19.64	13.24	16.27	3.22	1.43	2.35

표 3. 판형(plate) 낙석에 대한 해석 수행 결과

낙석의 무게 (kg)	운동에너지(kJ)			낙하속도(m/s)			도약높이(m)		
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean
265	18.81	7.62	10.41	17.00	11.65	13.92	3.62	2.27	2.99
551	39.10	15.22	20.03	11.59	7.92	9.14	3.67	2.37	2.95
697	49.43	19.27	25.85	9.00	6.30	7.35	3.57	2.27	2.91
994	70.39	27.52	38.41	7.29	5.06	6.00	3.59	2.26	2.97
1,059	75.05	29.27	40.04	7.09	4.94	5.83	3.62	2.36	3.02
1,532	108.60	42.38	61.37	6.76	4.63	5.49	3.60	2.24	2.94
1,716	121.69	47.54	65.82	6.40	4.44	5.23	3.61	2.31	2.97

### 3.2.2 낙석 운동의 분석

앞 절의 낙석 해석 결과를 토대로 연구대상 절토사면의 낙석 형상과 규모를 변수로 하였을 때 발생하는 낙석의 운동에너지와 낙하속도, 그리고 도약높이에 대한 경향을 파악하고자 한다. 본 연구에서 실시한 낙석 운동의 분석에는 최대, 최소 그리고 평균의 결과값 가운데 평균값을 이용하였다.

먼저, 낙석의 형상별 운동에너지와 낙석 무게의 관계에 대한 분석을 실시한 결과, 그림 1과 같이 선형적인 증가 경향을 보이고 있는 것이 확인되었다. 그림에서 보는 바와 같이 유사한 낙석 규모를 보일 때, 낙석 형상별 운동에너지는 원통형이 가장 크며, 그 다음이 구형, 마지막으로 판형의 순으로 분석됨을 확인할 수 있다. 국내 낙석방지울타리의 흡수 가능 운동에너지를 50kJ로 보았을 때, 모든 형상의 약 700kg 이하의 낙석에 대해서는 낙석방지울타리의 기능을 충분히

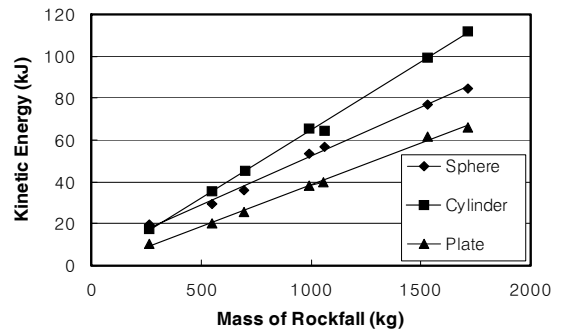


그림 1. 낙석 형상에 따른 낙석 무게별 운동에너지의 변화

발휘할 수 있는 것으로 분석되었다.

낙석의 형상별 낙하속도와 낙석 규모의 관계에 대한 분석을 실시한 결과, 그림 2와 같은 경향을 보이고 있는 것이 확인되었다. 그림에서 보는 바와 같이 유사한 낙석 규모를 보일 때, 낙석 형상별 낙하속도는 원통형이 가장 크며, 그 다음이 구형, 마지막으로 판형의 순으로 분석된 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 낙석 형상별 규모에 따라 낙하속도 변화에 대한 추세선이 2차원적인 감소 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

낙석의 형상별 도약높이와 낙석 무게의 관계에 대한 분석을 실시한 결과, 그림 3과 같은 경향을 보이고 있는 것이 확인되었다. 그림에서 보는 바와 같이 유사한 낙석 규모를 보일 때, 낙석 형상별 도약높이는 구형이 가장 크며, 그 다음이 판형, 마지막으로 원통형의 순으로 분석된 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 낙석 형상별 규모에 따라 도약높이의 변화에 대한 추세선이 거의 일정한 상태에 있음을 알 수 있으며, 본 연구대상 절토사면에서는 원통형의 낙석만이 2.5m 이하의 도약높이를 보여 낙석방지울타리 내에 잔류할 수 있을 것으로 분석되었다.

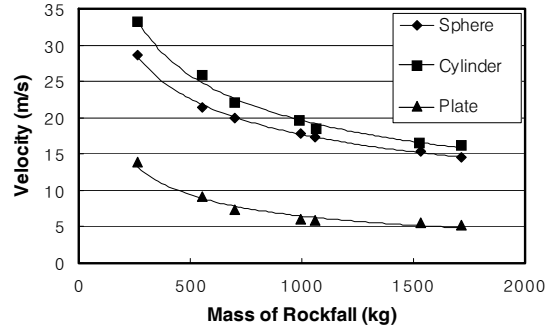


그림 2. 낙석 형상에 따른 낙석 무게별 낙하속도의 변화

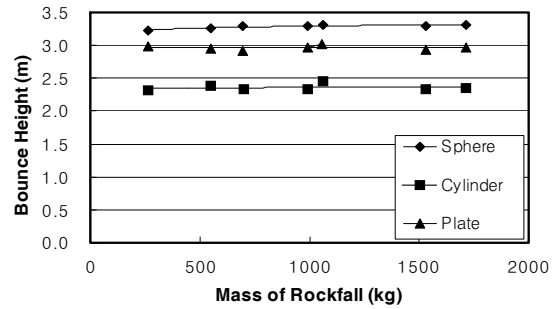


그림 3. 낙석 형상에 따른 낙석 무게별 도약높이의 변화

### 3.2.3 낙석방지울타리 설치 위치에 따른 낙석의 운동에너지 및 도약높이 분석

앞 절의 분석 결과에서 구형과 판형의 낙석은 모든 낙석 규모에서 낙석방지울타리의 설치 높이인 2.5m를 상회하여 도로로 유입되는 것으로 분석되었다. 따라서, 낙석방지울타리의 설치 위치를 1.2m, 1.5m, 2.0m 거리로 이동 설치하여 낙석 시뮬레이션 해석을 반복 실시하였다.

다음은 연구대상 절토사면에서 주요 형상으로 판단되는 판형의 낙석에 대한 이격거리별 낙석방지울타리 설치 타당성에 대한 낙석 해석 결과이다(그림 4, 5 참조).

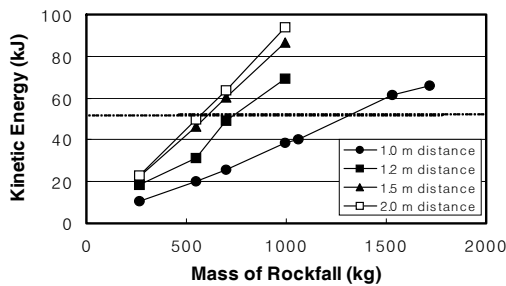


그림 4. 낙석방지울타리 설치 위치에 따른 낙석 무게별 운동에너지의 변화

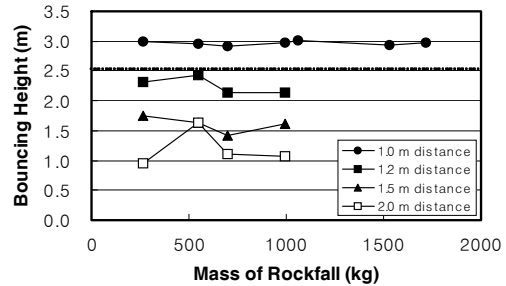


그림 5. 낙석방지울타리 설치 위치에 따른 낙석 무게별 도약높이의 변화

그림 4는 낙석방지울타리의 설치 위치에 따른 낙석 무게별 운동에너지의 변화를 나타내고 있는 그림이다. 이격거리 1.0m 일 때는 낙석 규모 약 1,000kg 정도에서 발생하는 운동에너지가 국내 낙석방지울타리의 흡수 가능 에너지 범위 내에 분포함을 알 수 있으며, 이격거리 1.2m 일 때는 낙석 규모 약 700 kg 정도에서 발생하는 운동에너지가 낙석방지울타리의 흡수 가능 에너지 범위 내에 분포하고, 이격거리

1.5m와 2.0m 일 때는 낙석 규모 약 500kg 정도에서 발생하는 운동에너지가 낙석방지울타리의 흡수 가능 에너지 범위 내에 분포하고 있음을 알 수 있다. 그림 5의 낙석방지울타리 설치 위치에 따른 낙석 무게별 도약높이의 분포를 살펴보면, 이격거리 1.0m 일 때는 낙석의 도약높이가 모든 낙석 규모에서 3m 내외의 값을 보여 본 연구대상 절토사면에 설치키로 한 낙석방지울타리의 높이인 2.5m를 상회하여 낙석의 도로 유입이 가능할 것으로 판단된다. 1.2m 이상의 이격거리를 갖는 낙석방지시설에 낙하하는 낙석은 이격이 증가함에 따라 도약높이가 감소하며, 모두 2.5m이하의 도약 높이를 가지고 있는 것으로 해석되었다. 또한, 이 때의 낙석 운동에너지는 이격거리가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나, 본 연구대상 절토사면에서 관찰되는 낙석의 무게가 260kg 정도로 조사되어 발생 운동에너지가 약 20kJ 내외로 1.2m에서 2.0m사이의 이격거리 내에서 충분히 낙석의 피해를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

암반사면의 안정성 평가에서 불연속면을 따르는 대규모의 파괴 예측은 지속적인 연구를 통해 많은 발전을 이룩하고 있다. 그러나, 불특정 암체의 탈락인 낙석에 대한 고려는 현재 큰 진전이 없는 상태이다. 본 연구를 통해서 낙석의 형상과 규모에 따라 야기되는 운동에너지와 낙하속도, 도약높이 등을 고려하는 것이 효율적인 낙석의 방지에 큰 도움이 됨을 알 수 있었다.

또한, 낙석 시뮬레이션에 의한 분석 결과, 낙석 형상에 따른 운동에너지와 낙하속도는 동일 규모에서 원통형, 구형, 판형의 순으로 크며, 규모가 증가함에 따라 운동에너지는 선형적인 증가 경향을 보임을 알 수 있으며, 낙하속도는 2차원적인 감소 경향을 보임을 알 수 있다. 낙석 형상에 따른 도약높이는 동일 규모에서 구형, 판형, 원통형의 순으로 크며, 규모의 증가에도 거의 일정한 값을 보였다. 또한, 낙석방지울타리나 낙석방지옹벽 등의 설치 시에는 낙석의 형상과 규모에 따라 야기되는 운동에너지와 도약높이 등의 관계를 고려하는 것이 효율적인 낙석 방지를 위해 반드시 필요한 사항임을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 한국건설기술연구원(1999), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(II), 건설교통부
2. 한국건설기술연구원(2000), 도로안전시설 설치 및 관리지침, 건설교통부
3. 日本道路協會(2000), 落石對策便覽, 日本道路協會
4. Azzoni, A. and de Freitas, M.H.(1995), "Experimentally gained parameters, decisive for rockfall analysis", *Rock Mech. Rock Eng.* 28(2): 111-124.
5. Azzoni, A., Drigo, E., Giani, G. P. and Zanintti, A.(1991), "In field observation of rockfall analysis parameters", *Proc. 6th International Symp. on Landslides*, 307-314.
6. Badger, T. C and Lowell, S. M(1992), *Rockfall controll in Washington State*, Transportation Research record, No.1343.
7. Bozzolo, D. and Pamini, R.(1986), "Simulation of rockfalls down a valley side", *Acta Mech.* (63):113-130.
8. Giani, G. P.(1992), *Rock Slope Stability Analysis*, A.A. Balkema
9. Krynine, D. P. and Judd, W. R.(1957), *Principles of Engineering Geology and Geotechnics*, McGraw-Hill, New York.
10. Pfeiffer, T. J. and Bowen, T. D.(1989), "Computer simulation of rockfalls", *Bull. Ass. Eng. Gel.* 26, pp. 135-146.
11. Ritchie, A.(1963), *The evaluation of rockfall and its control*, Highway Research Record 17, pp.13-28.
12. Spang, R. M. and Sonser, T. H.(1995), "Optimized rockfall protection by ROCKFALL", *Proc. 8th Int. Congress on Rock Mechanics*, Tokyo.