

낙석의 위험성 경감을 위한 사면의 외적조건 특성에 관한 수치해석적 연구

지현우¹⁾, 최성웅²⁾*

Numerical Analysis on Morphologic Characteristics of Rock Slope for Reducing Rockfall Risk

Hyun-Woo Ji, Sung O. Choi

Abstract Geo-hazard shows a rapid increasing tendency with establishment of frequent great slopes in various construction sites, especially in the unfavorable topographic condition in which about 70% of the surface is covered by the mountainous area. An repeatedly taking place on the heavy rain season is accompanied by a large scale of rockfall, and causes great damage to an individual as well as a property. Even though lots of field studies and fundamental studies have been performed to reduce this hazard, however, an essential study on the mechanism of the rockfall should be limited to the conventional studies on the slope reinforcement and/or the rockfall risk analysis. In this study, the mechanism of rockfall depending on the morphologic characteristics of slope has been simulated numerically with the PFC2D, one of the discrete element programs. For analyzing its mechanism, the input parameters relating to the slope such as surface condition, gradient, number of benches, bench gradient, and the ratio of bench width to rockfall size were taken into consideration.

Key words Rockfall, Discrete element method, PFC2D, Slope, Bench

초 록 국토의 약 70%가 산악지형인 우리나라의 지형적 특성상 각종 건설공사에 따른 절토 사면의 형성으로 인해 낙석의 위험성이 급증하고 있다. 특히 해마다 반복되는 집중호우 시의 사면 붕괴는 대규모 낙석을 동반하면서 막대한 인적, 물적 피해를 초래하고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 많은 현장조사연구 및 기초연구들이 수행되고 있으나 이들 연구의 대부분은 낙석이 발생할 경우의 보강 및 낙석 위험도 분석 등에 국한되고 있어, 근본적인 낙석의 거동에 관한 검토 및 분석은 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수치해석적 기법을 이용하여 사면의 외적 요소에 따른 낙석의 거동 특성을 규명하였으며, 이를 위해 개별요소법의 하나인 PFC2D가 이용되었다. 사면의 외적 요소로 사면의 표면상태, 구배, 소단 개수, 소단 구배 및 낙석의 크기에 대한 소단의 너비의 비 등이 검토되었으며, 이들 요소에 대한 다양한 변화를 통해 낙석의 거동 메커니즘이 수치해석적으로 분석되었다.

핵심어 낙석, 개별요소법, PFC2D, 사면, 소단

1. 서 론

최근 기상이변으로 인한 태풍 및 국지성 집중호우의 빈발과 산업의 발달로 인한 산지지역의 개발급증은 많

은 사면재해를 유발시키고 있다. 또한 1990년대 이전의 도로 건설현장의 경우 공사비의 절약, 공사기간의 단축, 절토 사면의 경사도 결정 시 설계 및 시공의 기술적 한계 등으로 인하여 절토 사면의 안정성 확보에 비중을 두지 않고 주로 자연사면의 하부에서 발파에 의해 신속한 시공이 이루어진 상태로 도로를 개통함으로써 불안정한 도로 절토 사면이 분포하는 결과를 초래하였다. 국내의 지형특성상 70% 이상이 산지로 구성되어 있고 여름철 집중강우 등의 영향으로 매년 반복적으로 발생

¹⁾ 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 석사과정

²⁾ 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수

* 교신저자 : choiso@kangwon.ac.kr

접수일 : 2010년 1월 5일

심사 완료일 : 2010년 1월 29일

게재 확정일 : 2010년 2월 22일

하는 산사태에 의한 인명피해는 연평균 56명에 달하고 있는 것으로 알려지고 있다(권오성 외, 2009). 사면재해는 직접적인 인명피해 뿐만 아니라 심각한 경제적 손실을 초래하게 되며, 또한 도시의 발달과 인구의 증가는 이러한 사면재해에 대한 취약성을 증가시키고 있다. 그러나 사면붕괴 방지대책은 산사태 및 절토 사면 붕괴에 대한 사전예측 및 철저한 원인규명이 없이 이루어지고 있는 경우가 많아 매년 반복되는 사면재해에 대하여 인명 및 재산피해를 저감시키기 위해서는 공학적, 정책적 측면에서 다양한 논의가 필요한 실정이다.

지금까지의 사면재해 예방에 대한 연구는 대부분 구호본 외(2001), 권영호 외(2005), 이상진 외(2008) 등에 의한 보강적인 측면에서의 연구가 진행되어 왔고, 강인규와 류정수(2005), 신은철 외(2008), 신종호 외(2009) 등의 사면의 안정성평가에 대한 연구를 수행한 바 있다. 또한 장기태 외(2003), 박혁진(2006), 서영교(2008) 등의 사면의 불연속면, 암반상태, 유효응력, 지중온도 등의 내부적인 요인들에 의한 사면의 파괴 예측 및 사면재해 예방에 관한 연구를 수행하였다.

다시 말해 지금까지의 사면재해에 관한 연구는 대부분 보강 및 안정성 평가, 그리고 사면재해의 예측 및 예방 등에 집중되고 있어, 사면재해 발생 시 재해의 상당 부분을 차지하는 낙석의 거동에 관한 정량적 규명이 부족한 것이 사실이다. 즉 사면의 안정성 여부를 평가하고 사면재해의 발생가능성을 예측하며 이를 통해 보강방안을 제시하는 형태로 연구가 진행되고 있지만, 이와는 별도로 실제 사면에서 낙석이 발생할 경우 이에 따른 피해 정도를 정량적으로 분석하고 동일한 조건에 대해 피해규모를 최소화 시킬 수 있는 방안이 검토될 수 있다면 사면재해 연구의 또 다른 연구방향 제시가 될 수 있을 것이다.

따라서 앞선 연구들과는 다른 시각에서의 사면재해 예방 연구의 일환으로 사면재해의 요소 중 낙석이라는 대상을 초점으로 하여 연구를 수행하였고, PFC2D 프로

그램을 이용한 수치해석적 방법을 통해 사면의 외적인 요소에 대한 낙석의 거동 특성을 파악해 보았다. 여기서 사면의 외적인 요소에는 사면의 표면상태, 사면경사, 사면높이, 소단과 관련된 몇몇 요소들이 있으며 이러한 요소들이 낙석 발생 시 낙석의 거동에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 규명해 보았다.

2. 낙석의 정의 및 특성

2.1 정의

일반적으로 낙석이란 암반 내 불연속면의 이완이나 차별적 풍화에 의해 돌출된 암편 등이 외적요인에 의해 중력방향으로 낙하되는 현상을 의미하며, 이에 반해 대량의 토사나 암석이 절개면으로부터 파괴되어 무너져 내리는 현상을 대부분 사면붕괴로 규정하고 있다. 따라서 현실적으로 암반사면에서 발생하는 붕괴와 낙석을 명확히 구분 짓기는 힘들지만, 대부분의 경우 암편의 개수로 붕괴규모를 표현할 수 있을 정도의 소규모일 경우는 낙석이라 칭하고, 떨어져 쌓인 암편의 체적으로 표현할 정도의 대규모일 경우를 붕괴라고 칭한다. 따라서 본 연구에서는 대규모 암편의 붕괴 보다는 소규모의 낙석에 연구의 주안점을 두고자 하며, 이는 실제 시공 사례에서 소규모의 암반 붕괴는 낙석과 동일하게 취급되어 대책이 강구되는 경우가 많다는 구호본 외(2001)의 연구결과와도 무관하지 않다.

2.2 낙석의 운동형태

중력의 영향에 의하여 발생된 낙석의 운동 형태는 자유낙하, 도약, 회전과 미끄러짐 등으로 설명할 수 있다. 자유낙하(free fall)는 Fig. 1의 (a)와 같은 형태의 운동 형태이며, 초기속도가 '0'인 상태로 중력가속도에 의하여 지상을 향해 낙하하는 물체의 운동이다. 지구의 중력가속도를 갖는 등가속도운동을 하며, 떨어지는 동안의 속도는 중력가속도와 낙하시간의 곱과 같다. 또한

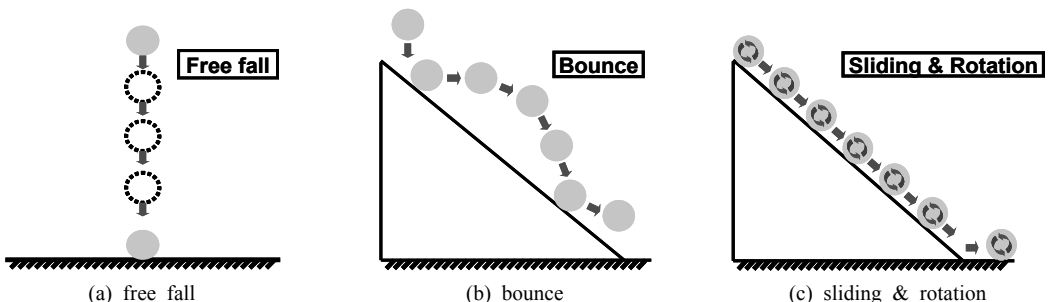


Fig. 1. Schematic diagram for different types of rockfall movement.

도약(bounce)은 Fig. 1의 (b)와 같은 형태의 운동이다. 즉, 낙석이 사면의 표면과 충돌하면서, 일정한 에너지 손실이 발생하여 튀어 오르는 현상으로 낙석의 거동 특성을 파악하는데 매우 중요한 인자로 작용한다. 회전(rotation)과 미끄러짐(sliding)은 그림 Fig. 1의 (c)와 같은 형태의 운동으로 낙석이 사면을 따라 떨어지면서 사면이 가지는 임의의 마찰력에 의해 일정한 에너지 손실을 발생하여 미끄러지고 회전이 발생하게 되는 현상이다. 이러한 운동 형태는 사면의 표면상태에 의해 크게 좌우된다.

3. PFC2D를 이용한 수치해석

본 연구에서는 Cundall & Strack(1979)이 개별요소법(DEM)을 사용하여 구상입자의 운동과 상호작용을 모사한데서 비롯된 상용 해석프로그램인 PFC2D를 사용하여 사면의 외적요소 조건별 낙석의 거동 특성을 모사하여 보았다. PFC2D는 모든 요소들을 구형의 입자들로 형성하여 사면을 강제벽이 아닌, 보다 실제 사면과 근접한 형태의 표면 상태를 지닌 사면 모델링을 가능하게 한다(Itasca Consulting Group, 2004). 특히 강제된 입상체든 어떤 형태로 구현된 사면에 대해서도 낙석의 거동에 따른 사면과 낙석 자체에서의 에너지 계산을 다음과 같은 6가지 형태로 수행할 수 있으므로 정량적이고 공학적인 결과값의 도출이 가능하다. 본 연구에서 이용된 PFC2D를 통한 낙석의 거동 특성에 관한 에너지 계산은 모두 이러한 형태로 수행되었다.

- ① Body work: 시스템 전체에 가해진 모든 물체력 (중력, 가해진 외력과 모멘트 등)
- ② Bond energy: Parallel 내에 축적된 총 변형률 에너지

- ③ Boundary work: 모든 wall에 의해 요소집합체에 가해진 총 일량
- ④ Frictional work: 모든 접촉면에서 마찰 미끄러짐에 의해 소모되는 총 에너지
- ⑤ Kinetic energy: 평행이동 및 회전운동에 의한 모든 입자들의 총 운동에너지
- ⑥ Strain energy: 선형 접촉·강성 모델에서 모든 접촉에 축적된 총 변형률 에너지

3.1 모델적용

본 연구에서는 사면을 모델링하는 방법으로 Fig. 2와 같이 사면을 입상체로 모델링하는 방법과 강제벽으로 모델링하는 방법을 적용하였다. 입상체로 사면을 모사할 경우, 사면의 변형양상이 낙석에 미치는 영향을 비교적 현실적으로 고려할 수 있다는 장점이 있는 반면 해석시간 및 계산량이 크게 증가하는 단점을 지닌다. 반면 강제벽으로 사면을 모사할 경우 사면의 변형 양상에 대한 현실성이 다소 결여되기는 하나 해석시간이 짧고 계산량이 상대적으로 줄어들기 때문에 해석결과와 피드백이 용이하다는 장점이 있기도 하다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 경우, 즉 사면을 강제벽과 입상체로 고려하는 경우를 각각 고려하였으며, 두 가지 경우에 대한 결과를 비교하였다.

3.2 해석과정

Fig. 3은 본 연구의 전체 과정에서 적용된 낙석거동 분석에 관한 기본 개념도이다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 사면의 상단부 일정 지점에서 임의 크기의 낙석이 발생하였다고 가정하고 이 낙석이 중력에 의하여 자유 낙하 하면서, 앞서 언급한 바와 같이 도약, 회전 및 미끄러짐의 과정을 거친 뒤 사면의 최하단부에 도달할 경우 최하단부에서 임의 길이 만큼 떨어진 곳에 임의의

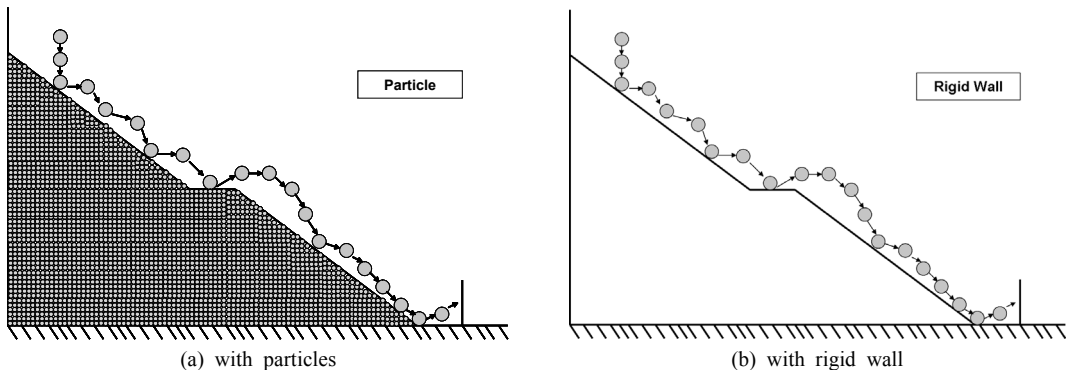


Fig. 2. Illustration of rock slope generation in PFC2D analysis.

wall을 설치하여 이 wall에 낙석이 충돌하는 순간의 에너지를 측정함으로써 낙석의 조건 및 사면의 외적 조건에 따른 낙석의 거동양상을 규명하고자 한다.

PFC2D에 의한 수치해석에서 사용된 사면 및 낙석에 관한 입력자료는 Table 1에 정리한 바와 같다. 이때 사면의 형태에 따른 낙석의 거동양상 비교를 위해 낙석의 직경은 0.1m 로 동일하게 적용하였다.

이러한 수치해석 과정을 통해 낙석의 충격에너지에 관한 증감율을 고찰함으로써 낙석의 거동양상을 분석하였다. 낙석의 충격에너지에 관한 증감율의 정의는 Eq. (1)과 같다.

$$\text{Rate of increase energy (\%)} = \left(\frac{E_b}{E_a} \times 100 \right) - 100 \quad (1)$$

여기서, E_b 는 초기에 낙석이 사면 상단부에 낙하하며 발생한 낙석의 충격에너지이며, E_a 는 최종적으로 발생한 낙석의 충격에너지, 즉 사면의 최하단부에서 일정 거리에 설치된 wall에 가해지는 충격에너지를 의미한다.

이상의 입력자료를 이용하여 사면의 외적 조건의 변화에 따른 낙석의 발생거동 양상을 살펴보고자 한다. 본 연구에서 고려된 사면의 외적조건은 주로 육안 관찰에 의해 가능한 사면의 조건, 즉 사면의 표면상태, 사면의 구배, 소단의 개수, 소단의 구배, 그리고 낙석의 크기에 대한 소단의 상대 너비 등이다. 이와 같이 총 5개의 사면 조건에 대한 다양한 값의 적용을 통해 낙석 발생

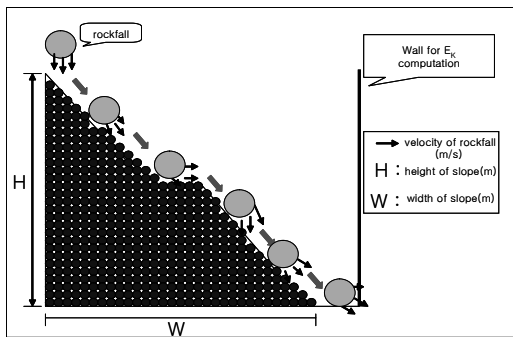


Fig. 3. Conceptual diagram for rockfall analysis along with the rock slope.

시 낙석의 거동특성 및 충격에너지 증감율을 검토하였으며, 이를 토대로 사면의 외적 조건의 변화에 따른 낙석의 발생거동 양상의 상관관계를 다음과 같이 분석하였다.

4. 사면 외적조건에 따른 낙석의 거동 및 충격에너지 증감율 분석

4.1 사면의 표면상태

Fig. 4는 사면의 표면상태에 관한 변화양상을 수치해석모델로 구현한 한 예를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 사면의 표면상태는 사면을 구성하는 입상체의 크기에 따라 달리 표현되며 각 조건에 대해 사면의 구배를 30°, 45°, 60°로 부여하여 수치해석을 실시하였다. 이때 사면의 높이는 20m 로 동일하게 유지하였다.

특히 사면의 표면상태를 달리 표현하기 위하여 사면을 구성하는 입상체의 크기를 Eq. (2)와 같은 값의 범위 내에서 생성하여 최종적으로 사면 표면의 굴곡 정도를 수치해석적으로 구현하였다.

$$\begin{aligned} r_{\max} &= 1.0\text{m}, r_{\min} = 0.5\text{m}, \text{ for 'large size'} \\ r_{\max} &= 0.5\text{m}, r_{\min} = 0.1\text{m}, \text{ for 'medium size'} \\ r_{\max} &= 0.1\text{m}, r_{\min} = 0.01\text{m}, \text{ for 'small size'} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, r_{\max} 는 최대 입자의 직경이며, r_{\min} 은 최소 입자의 직경이다.

이상과 같이 사면을 형성하기 위한 입상체의 크기를 세 가지로 적용한 가운데 사면의 경사를 각각 30°, 45°, 60° 로 변화시켜 낙석을 발생시킨 경우에 대하여 낙석의 최종 충격에너지의 변화양상을 살펴보았다(Fig. 5).

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 동일한 사면의 경사에 대해 사면을 형성하는 입자의 크기가 클수록, 사면의 표면상태가 거칠수록 낙석의 최종 충격에너지는 감소하는 양상을 보여주고 있다. 이러한 양상은 사면의 경사가 증가할수록 그 차이가 작아지는 하나 경향은 유사함을 알 수 있는데, 이는 곧 사면의 표면상태가 거칠수록 낙석이 발생하는 과정에서 사면과의 마찰에 의한 에너지 손실이 증가하면서 최종적인 낙석의 충격에너지는 감소함을 의미한다.

참고로 Giani(1992)는 회전과 미끄러짐의 구분에서

Table 1. Input parameters used in PFC2D analysis

Gravity (m/sec ²)	Density (kg/m ³)	Porosity	Ball stiffness (N/m)	Wall stiffness (N/m)	Parallel bond (N/m)	Rockfall diameter (m)
9.8	2,650	0.14	1.00E+7	1.00E+9	7.00E+7	0.1

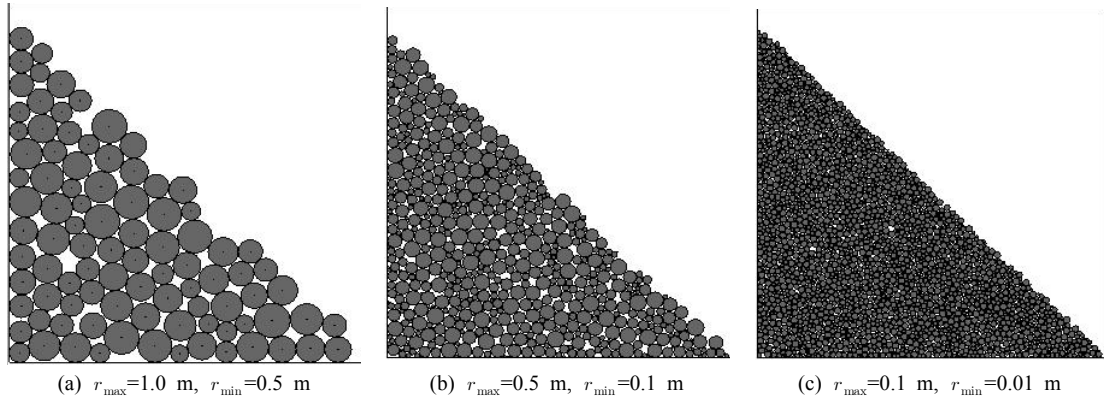


Fig. 4. Illustration of different surface condition of the slope using the different sized particles in PFC2D(the slope angle is 45° in both cases)

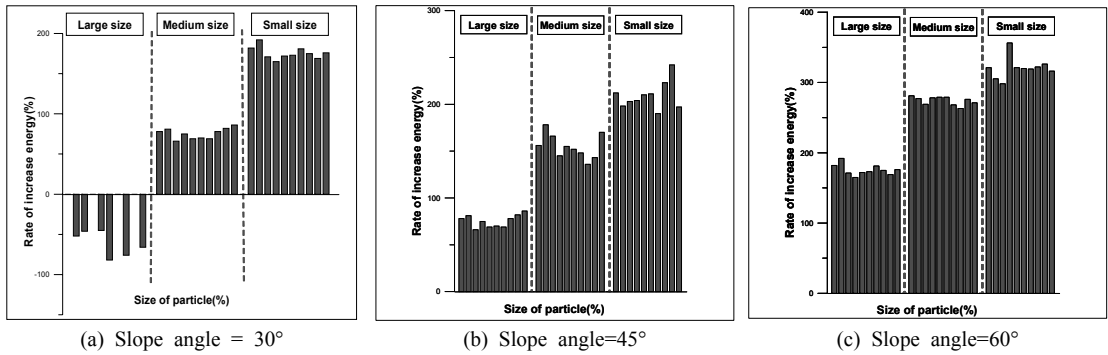


Fig. 5. Increased rate of rockfall energy with different slope angle and different particle size for slope

절개면의 굴곡보다 암편의 크기가 클 경우 도약을 수반하여 미끄러지는 경향을 보이고, 굴곡의 크기가 더 클 경우 절개면과 암체의 접촉면에서 약간의 미끄러짐과 함께 회전하는 경향을 보이는 것으로 보고한 바 있다. 결국 본 연구에서와 같이 사면을 형성하기 위한 입상체의 크기를 큰 값을 적용시켜 사면의 굴곡 정도를 크게 표현하게 되면 낙석의 과정에서 사면에 부딪힌 낙석이 더 큰 도약의 과정을 거치게 되고 이러한 도약으로 인해 더 많은 에너지 감소를 초래함으로써 최종적인 충격 에너지는 감소된다는 것을 수치해석적으로 증명하고 있음을 알 수 있다.

4.2 사면의 경사

사면의 경사에 따른 낙석의 거동 양상을 살펴보기 위하여 사면의 경사를 10°에서 80° 까지의 범위 내에서 10° 간격으로 총 8가지 모델에 대해 수치해석을 실시하였다. 이 때 사면을 표현하는 방법으로 다양한 크기의 입자가 쌓여 사면을 형성시키는 입상체 방식과 사면의

형상을 단순한 강체벽으로 표현하는 강체벽 방식 등 두 가지 형태로 각각 수행하였다.

입상체로 사면을 구성할 경우 전술한 사면의 표면상태에서 살펴본 바와 같이 입상체의 크기에 따라 사면의 표면 굴곡도가 달라지며 이에 따라 최종적인 낙석의 충격에너지가 변화할 수 있기 때문에 여기서는 중간크기의 입상체로 사면을 구성하였다. 이는 사면의 표면상태를 동일하게 유지하고 오직 사면의 경사에 따른 낙석의 거동양상을 규명하기 위함이다. 또한 서로 다른 사면경사 조건에서도 동일한 낙석 이동거리를 부여하기 위해 사면의 빗변 길이가 항상 30m 를 유지할 수 있도록 사면의 경사에 따라 사면의 높이와 너비를 조정하여 수치해석에 반영하였다.

이상의 조건으로 사면의 경사에 따른 낙석의 최종 충격에너지를 구하였으며 이를 Table 2에 정리하였다. 또한 모든 수치해석 결과는 수차례의 해석을 실시한 결과 대표적인 10가지의 결과들을 표에 정리를 하였다. Table 2에 나타난 결과는 입상체로 사면을 표현한 경우

에 대한 낙석의 최종 충격에너지의 비교 양상이며, 사면을 강제벽으로 표현한 경우에 대한 결과값은 여기에 기재하지 않았다. 사면을 강제벽으로 표현할 경우 사면의 경사에 대한 낙석의 충격에너지는 선형적으로 비례하는 양상은 보였으나 그 크기가 너무 커서 현실성이 매우 떨어졌기 때문이다.

Fig. 6은 Table 2에 정리한 결과를 그림으로 나타낸 것인데, 여기서 알 수 있는 바와 같이 사면의 경사가 증가함에 따라 낙석의 최종 발생에너지의 증감율도 증가함을 알 수 있다. 또한 Fig. 6에서 나타낸 각 경사에 따른 평균값을 이용하여 Fig. 7과 같이 그 경향성을 검토한 결과, 사면의 경사가 커질수록 낙석의 최종 발생에너지의 증감율은 지수 형태로 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 사면의 경사가 40° 인 경우를 기점으로 낙석의 최종 발생에너지의 증감율이 변화하는 양상을 보임을

확인할 수 있었다.

4.3 소단의 개수

앞 절의 사면경사 조건과 동일한 방법으로 사면을 모델링하는 방법은 입상체 방식과 강제벽 방식을 병행하여 모사하였다. 한편 입상체의 입자크기를 앞의 조건과 같이 중간 크기로 할 경우 사면에서의 소단을 효과적으로 표현하기에는 부족한 것으로 판단되어 해석시간이 길어짐에도 불구하고 입상체의 입자크기를 작은 크기 (Eq. (2)의 'small size')로 적용하였다.

소단의 개수는 소단이 없는 경우부터 차츰 소단의 개수를 1개씩 추가하면서 총 3개의 소단을 가지는 사면까지에 대하여 총 4가지 경우에 대한 해석을 실시하였으며, 이때 사면의 높이와 너비는 각각 20m로 적용하였고 소단은 5m, 10m 간격으로 위치시켰다.

Table 2. Increased rate of rockfall energy with increasing the slope angle(when particles are used for generating the slope)

Slope angle(%)	10	20	30	40	50	60	70	80
Rate of increase energy (%)	-10	32	52	86	180	260	360	550
	-9	28	66	91	171	255	371	480
	-15	41	71	102	188	261	355	590
	6	33	59	88	191	272	349	530
	4	35	68	87	185	282	409	545
	-8	44	72	103	185	266	389	561
	-5	51	73	105	180	265	388	498
	-11	26	66	92	178	259	379	502
	-12	12	59	80	175	279	369	504
3	31	60	99	186	271	351	565	
Mean value(%)	-5.7	33.3	64.6	93.3	181.9	267	372	532.5

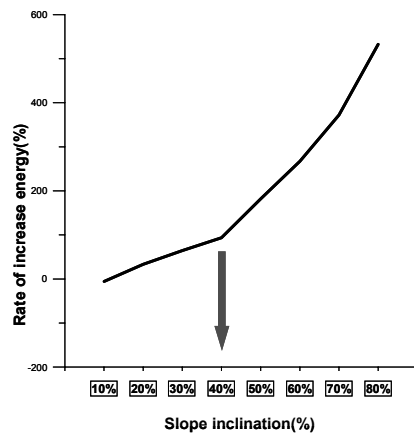
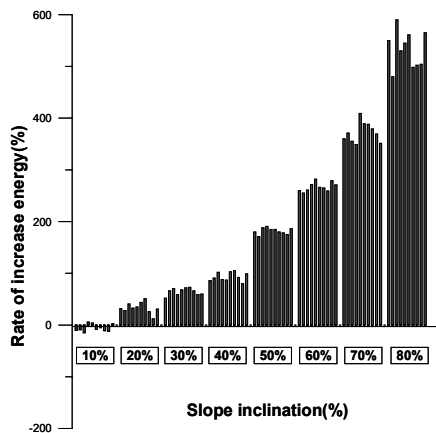


Fig. 6. Increased rate of rockfall energy with different slope angles(when particles are used for generating the slope)

Fig. 7. Relationship between slope angle and increased rate of energy(when particles are used for generating the slope)

소단의 개수를 n이라 할 때, n=0 인 경우를 기준값으로 하여 n=1, 2, 3 인 경우에 대한 결과값과 비교한 결과를 Table 3에 정리하였다. Table 3의 결과는 입상체를 이용하여 사면을 표현한 경우에 대한 해석결과인데, 각 소단의 개수에 대한 해석 경우에 대하여 낙석의 발생 위치를 임의로 변화시키면서 반복적인 수치해석을 실시하였으며, 특히 소단이 있는 경우 낙석이 소단에 충돌하는 대표적인 경우에 대하여 각각 10회씩의 수치 해석 결과값을 나타내었다.

Table 3에서 정리한 바와 같이 소단이 없는 경우 최종적인 낙석의 에너지 증감율은 84.3% 인 것으로 나타났으며, 소단의 개수가 증가할수록 전체적인 에너지 증감율은 감소하는 것을 알 수 있다.

특히 소단의 개수가 1개인 경우 소단이 없는 경우에

비해 에너지 증감율이 약 40% 가량 감소하였으며, n=2 인 경우는 n=1인 경우에 비하여 약 46% 감소하였음을 알 수 있다. 또한 n=3 인 경우는 n=2 인 경우에 비하여 약 25% 가량 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 해석결과로부터 낙석이 발생하여 사면을 따라 자유낙하하는 가운데 1개의 소단을 거치게 되면 평균 약 37% 가량의 에너지 감소가 나타남을 알 수 있다. 이러한 사실은 낙석의 최종 충격에너지의 감소에 미치는 소단의 개수에 관한 중요성을 보여주는 결과이다.

한편, 강체벽을 이용하여 사면을 모사한 뒤, 앞과 동일한 과정을 거쳐 최종적인 낙석 에너지의 증감율을 살펴보았다(Table 4). 해석결과 소단이 없는 경우 최종적인 낙석에너지 증감율은 168.6%로 나타났으며, 소단의 개수가 증가함에 따라 전체적으로 에너지 증감율이 낮

Table 3. Increased rate of rockfall energy with number of slope-benches(when particles are used for generating the slope)

Number of slope-benches	n=0	n=1	n=2	n=3
Rate of increase energy (%)	80	56	-22	-91
	82	64	-40	Hang up
	86	48	-38	-56
	91	52	26	-78
	78	66	-88	-94
	81	46	-67	Hang up
	90	51	21	Hang up
	88	52	6	Hang up
	84	38	-32	-68
	83	47	-55	-79
Mean value(%)	84.3	52	-28.9	-46.6

Table 4. Increased rate of rockfall energy with number of slope-benches(when a rigid wall is used for generating the slope)

Number of slope-benches	n=0	n=1	n=2	n=3
Rate of increase energy (%)	181	121	78	58
	167	115	95	66
	178	131	109	81
	191	109	112	48
	164	125	89	56
	155	110	77	67
	171	106	89	69
	169	98	92	71
	158	116	110	64
	152	114	98	65
Mean value(%)	168.6	114.5	94.9	64.5

게 나타나는 것을 알 수 있었다. 추가적으로 $n=1$ 의 경우 $n=0$ 인 경우에 비하여 에너지 증감율이 약 32% 정도 감소한 것을 알 수 있고, $n=2$ 인 경우는 $n=1$ 의 경우에 비하여 약 18% 감소하였다. 또한 $n=3$ 인 경우는 $n=2$ 의 경우에 비하여 약 33% 감소한 것을 알 수 있다. 즉, 낙석이 1개의 소단을 경유하는 경우 평균적으로 약 27% 정도의 에너지 감소를 보이는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 Table 3에서 정리한 입상체의 경우와 비교해 보면, 강체벽 방식보다 입상체 방식이 대략 10% 정도의 에너지 감소가 나타남을 알 수 있었다. 이러한 원인은 프로그램 특성상 입상체 방식은 강체벽 방식보다 낙석에 큰 마찰력을 작용하는 것으로 판단된다. 또한 위의 두 가지 결과 값을 종합해 보았을 때 대체적으로 낙석이 소단에 충돌하는 경우 27~37% 수준의 에너지 감소율이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제 사면 설계에서, 소단의 설치는 낙석의 위험성 경감을 위하여 탁월한 인자로써 고려될 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 입상체 방식과 강체벽 방식에 대한 PFC2D 해석결과인 Table 3 및 Table 4의 결과를 정리하여 나타낸 것으로서, 소단의 개수에 따른 최종 낙석에너지의 증감율을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 강체벽 방식으로 사면을 형성한 경우(Fig. 8 (a)), 낙석의 최종 에너지의 증가양상은 소단의 개수가 많아짐에 따라 줄어드는 양상을 보이거나 전체적으로 소단의 개수와 관계없이 모든 경우에 대하여 낙석에너지가 증가된 양상을 보이고 있다. 반면 입상체 방식으로 사면을 형성한 경우(Fig. 8 (b)), $n=2$ 인 경우부터 초기 발생 에너지보다 감소된 값이 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이

사면의 굴곡정도의 차이에 따라 낙석과 사면의 충돌에 따라 도약의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

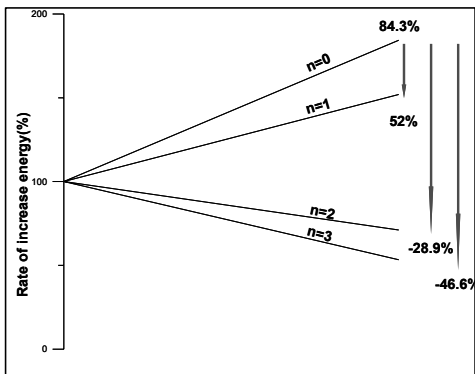
따라서 입상체 방식으로 사면을 형성한 경우에 대한 수치해석 결과를 검토한 결과만을 볼 때, 소단이 2개 이상 설치된 경우가 1개 이하로 설치된 경우보다 더 큰 에너지 감소폭을 갖는다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 양상은 절대적인 것은 아니며 단지 소단의 개수의 증가에 따라 낙석에너지의 증감율이 감소할 것이라는 일반적인 결론을 의미한다고 봐야 할 것이다. 또한 입상체에 의한 사면의 표현과 강체벽에 의한 사면의 표현에 따라 낙석의 최종에너지의 증감율 차이를 통하여 사면 또는 소단의 표면처리 역시 낙석의 위험성 경감에 있어 중요한 변수로 작용할 것임을 판단할 수 있다.

4.4 R_D/B_W 비

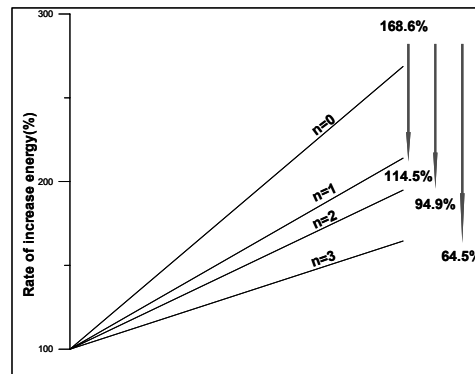
앞에서 수행한 수치해석 결과를 통해 낙석이 발생하게 되면 사면의 표면에서 도약 현상이 일어나게 되며 도약의 정도에 따라 2차 충돌이 소단에서 발생하지 않고 직접 사면의 표면에서 발생할 가능성이 있음을 예상할 수 있다.

소단의 역할 중 낙석의 위험성을 경감시키는 것이 중요한 부분인 것을 감안할 때 낙석의 충돌이 소단에서 발생하지 않는다면 본래의 소단의 기능을 충분히 발휘하지 못하는 결과를 양산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 낙석 발생시 낙석이 소단에 충돌하여 낙석의 위험성을 경감시키기 위해서는 근본적으로 낙석의 크기에 대한 소단의 너비의 비가 중요한 요소로 고려될 수 있을 것이라는 개념을 수치해석적으로 살펴보고자 한다.

이러한 검토를 위해 본 수치해석에서는 강체벽을 이용하여 사면을 형성한 경우만 살펴보았는데, 입상체 방



(a) when particles are used for generating the slope



(b) when a rigid wall is used for generating the slope

Fig. 8. Relationship between the increased rate of rockfall energy and the number of slope bench with respect to the type of slope surface.

식으로 사면을 표현할 경우 사면을 형성하는 입자들의 최소 크기를 바탕으로 소단의 형상을 충분히 표현하기가 부족했기 때문이다. 또한 소단의 형상을 충분히 표현하기 위해서는 입자들의 크기가 충분히 작아져야 하는데 이 역시 해석시간의 측면에서 용이하지 않았다. 따라서 강체벽을 이용하여 사면을 형성한 경우에 대해서만 검토하였으며, 앞의 수치해석의 결과에서 보듯이 강체벽으로 사면을 형성할 경우 낮은 수치의 마찰력을 지니는 사면으로 인하여 결과값이 다소 크게 나타나나 그 경향성에서는 차이가 없었기 때문에 Eq. (3)에서와 같이 R_D/B_W 비에 따른 낙석의 거동 특성 분석에는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

$$\frac{R_D}{B_W} = \frac{\text{Rockfall Diameter}(m)}{\text{Bench Width}(m)} = R_D/B_W \text{ ratio} \quad (3)$$

여기서, R_D 는 낙석의 직경이며, B_W 는 소단의 너비이다. Eq. (3)에서 보는 바와 같이 R_D/B_W 는 소단의 너비에 대한 낙석의 상대적인 크기를 나타내는 것으로서 그 비율이 작을수록 낙석의 크기에 비하여 소단너비가 커짐을 의미한다. 또한 낙석의 크기는 직경 0.1m로 동일하게 유지한 채, 소단의 너비를 0.1m씩 증가시키면서 수치해석을 실시하였으며, 사면의 높이와 너비를 각각 25m 로 설정하였고 소단의 위치는 사면의 중간 지점인 12.5m 지점에 설정하였다.

이상과 같은 조건으로 R_D/B_W 비에 따라, 즉 소단의 너비를 0m부터 3m까지 0.1m 씩 증가시키면서 매 경우에 대하여 총 10회씩 수치해석을 실시하였으며 이를 통해 평균적인 낙석의 충돌에너지의 증감을 및 소단에서의 충돌회수를 정리하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Increased rate of energy and number of rockfall collision with different R_D/B_W ratio

R_D/B_W ratio	Bench width (m)	Rate of increase energy(%)											Number of rockfall collision
		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	Ave.	
-	0.0	187.6	183.2	182.7	155.8	168.7	172.3	171.6	181.5	166.6	172.7	187.6	0
1.000	0.1	172.6	166.5	181.4	171.5	172.2	168.6	155.7	182.6	183.1	187.5	174.2	0
0.500	0.2	182.4	175.6	168.3	167.4	181.1	181.9	162.7	194.2	171.2	164.3	174.9	0
0.333	0.3	179.5	181.5	174.2	175.3	188.4	181.1	176.2	164.2	142.1	169.5	173.2	1
0.250	0.4	175.6	176.1	138.4	161.2	175.7	155.3	146.7	184.6	144.1	171.2	162.9	4
0.200	0.5	161.2	134.5	146.8	177.8	151.2	176.4	175.9	135.1	161.1	172.5	259.3	3
0.167	0.6	168.8	122.8	172.8	172.5	180.2	113.4	114.7	175.4	123.6	148.7	149.3	5
0.143	0.7	121.8	172.9	119.5	165.2	171.5	119.5	109.5	98.5	122.3	169.5	137.0	6
0.125	0.8	134.0	144.2	171.1	126.5	166.9	134.5	168.5	128.5	166.8	130.4	147.1	6
0.111	0.9	109.5	105.2	175.3	102.7	172.5	181.2	98.8	111.5	101.2	114.7	127.3	7
0.100	1.0	110.5	121.6	172.8	169.8	102.3	109.6	115.4	113.5	109.6	91.6	121.7	8
0.091	1.1	122.5	128.3	119.8	121.5	117.4	127.4	177.6	126.3	114.5	122.6	127.8	9
0.083	1.2	103.5	112.3	131.6	120.5	172.5	111.6	112.5	115.6	118.5	127.8	122.3	9
0.077	1.3	148.0	156.8	136.6	135	133.2	136.1	123.5	189.6	127.0	136.8	142.3	9
0.071	1.4	50.4	40.6	73.7	70.6	49.7	46.8	48.6	50.2	70.4	61.6	56.3	10
0.067	1.5	56.4	46.6	79.7	76.6	55.7	52.8	54.6	56.2	76.4	67.6	62.3	10
0.063	1.6	-27.9	-37.7	-4.6	-7.7	-28.6	-31.5	29.4	-28.1	-7.9	-16.7	-16.1	10
0.059	1.7	-40.9	-50.7	-17.6	-20.7	-41.6	-44.5	42.6	-41.1	-20.9	-29.7	-26.5	10
0.056	1.8	-52.1	-61.9	-28.8	-31.9	-52.8	-55.7	-53.9	-52.3	-32.1	-40.9	-46.2	10
0.053	1.9	-20.6	-30.4	2.7	-0.4	-21.3	-24.2	-22.4	-20.8	-0.6	-9.4	-14.7	10
0.050	2.0	-40.9	-32.1	-52.3	-53.9	-55.7	-52.8	-31.9	-28.8	-61.9	-52.1	-46.2	10
0.048	2.1	-30.6	-21.8	-42.0	-43.6	-45.4	-42.5	-21.6	-18.5	-51.6	-41.8	-35.9	10
0.045	2.2	-36.2	-46.0	-12.9	-16.0	-36.9	-39.8	-38.0	-36.4	-16.1	-25.0	-30.3	10
0.043	2.3	-52.7	-62.5	-29.4	-32.5	-53.4	-56.3	-54.5	-52.9	-32.6	-41.5	-46.8	10
0.042	2.4	-61.4	-71.2	-38.1	-41.2	-62.1	-65.0	-63.2	-61.6	-41.3	-50.2	-55.5	10
0.040	2.5	-64.7	-55.8	-76.1	-77.7	-79.5	-76.6	-55.7	-52.6	-85.7	-75.8	-70.0	10
0.038	2.6	-70.0	-61.1	-81.4	-83.0	-84.8	-81.9	-61.0	-57.9	-91.0	-81.1	-75.3	10
0.037	2.7	-55.8	-65.6	-32.6	-35.7	-56.6	-59.5	-57.7	-56.1	-35.8	-44.7	-50.0	10
0.036	2.8	-69.0	-78.8	-45.8	-48.9	-69.8	-72.7	-70.9	-69.3	-49.0	-57.9	-63.2	10
0.034	2.9	-36.1	-24.2	-47.5	-49.1	-50.9	-48.0	-27.1	-24.0	-57.0	-47.2	-41.1	10
0.033	3.0	-66.5	-54.6	-77.9	-79.5	-81.3	-78.4	-57.5	-54.4	-87.4	-77.6	-71.5	10

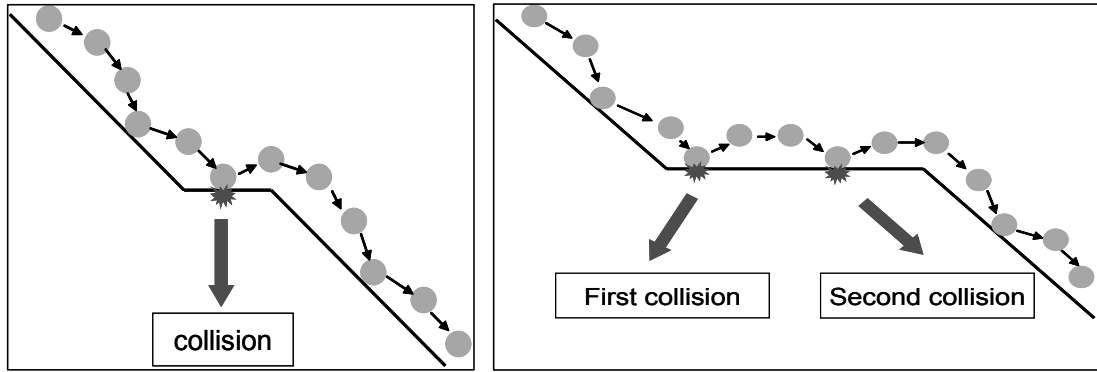


Fig. 9. Illustration of rockfall collision at slope-bench with respect to the R_D/B_W ratio.

Table 5에서 알 수 있는 바와 같이, R_D/B_W 비가 작아질수록 낙석에너지의 증감율은 감소하고, 낙석이 소단에 충돌할 확률은 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 R_D/B_W 비에 따라 낙석이 소단에 충돌하는 과정에서 발생하는 낙석의 운동형태에 대한 모식도를 나타내는 Fig. 9에서 보는 바와 같이, R_D/B_W 비가 0.5 이상인 경우에는 낙석의 도약으로 인하여 소단에서의 2차 충돌이 하지 않는 경우가 발생한 반면, R_D/B_W 비가 0.333 이하인 경우에는 소단에서의 2차 충돌이 발생하는 빈도가 증가하는 양상을 띄고 있음을 알 수 있다.

이러한 양상은 R_D/B_W 비가 0.071 이하가 되면서 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데, R_D/B_W 비에 대한 낙석의 충돌에너지의 증감율에 대한 상관관계를 나타내는 Fig. 10에서도 보는 바와 같이 R_D/B_W 비가 0.071 이하의 경우 낙석의 소단 충돌현상이 2번 이상 발생하게 되어 에너지 증감율이 더욱 낮은 수준으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

결과적으로 실제 현장에서 사면의 불연속면이나 암종, 주변여건 등 다양한 요소의 분석 이후, 예측 가능한 낙석의 크기로서 적정한 R_D/B_W 비를 산정하여 사면 설계에 활용한다면 낙석의 위험성 경감에 효과적인 사면 시공이 이루어질 것으로 판단된다.

4.5 소단구배

일반적으로 사면 시공에서 소단의 설치는 낙석의 위험성 경감과 사면에서의 유도 배수를 목적으로 하는 것으로 알려져 있으며, 따라서 이러한 목적을 위하여 소단의 구배는 대개 2~5% 로 시공되도록 권장되고 있지만, 실제 현장에서는 낙석의 위험성 경감을 목적으로 소단의 구배를 조절하여 시공하지는 않는 것이 현실이다.

그러나 앞의 수치해석 결과에서 보듯이 낙석 발생 이

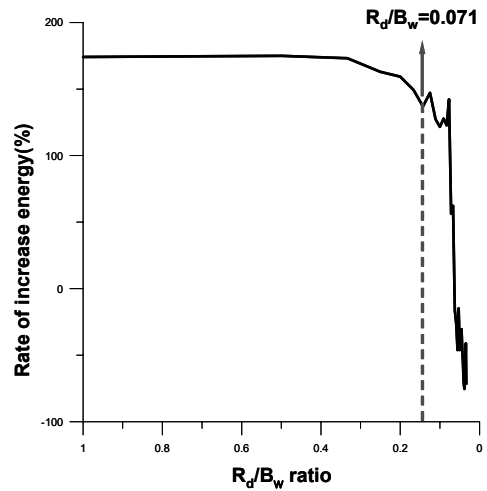


Fig. 10. Variation of increased rate of rockfall energy with R_D/B_W ratio and its threshold.

후 소단에서의 충돌에 따라 낙석의 운동 형태가 확연히 변화하는 것처럼 소단의 구배는 낙석의 충돌에너지 감소에 절대적인 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 소단의 구배에 따른 낙석 충돌에너지의 변화양상을 살펴보기 위하여 소단의 구배를 1~10% 범위 내에서 각각 1% 씩 증가시키면서 수치해석을 실시하였다.

특히 소단의 구배는 사면 방향으로 또는 역방향으로 고려될 수 있으므로 본 연구에서는 사면에서 바깥방향 하단으로 기울어진 소단구배를 상향구배로 정의하였고, 그 반대 방향은 하향구배로 정의하였다(Fig. 11). 즉 Fig. 11은 상향구배 10%와 하향구배 10% 로 소단을 구성하였을 경우에 대한 수치해석 과정 중에서 낙석이 소단에 충돌하는 순간을 나타내는 예로서, 충돌하는 순간의 낙

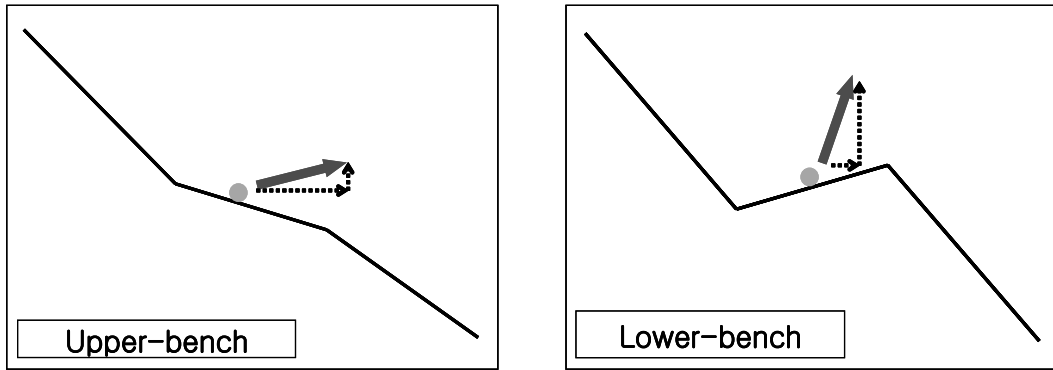


Fig. 11. Illustration of rockfall bouncing at the slope-bench with respect to the different gradient of slope-bench.

Table 6. Increased rate of rockfall energy according to the various gradients of slope-bench.

Bench gradient		Rate of increase energy(%)
0%		376.5
Upper-bench	1%	329.8
	2%	311.9
	3%	467.2
	4%	347.3
	5%	341.2
	6%	432.4
	7%	349.3
	8%	344.8
	9%	529.2
	10%	551.6
Lower-bench	1%	191.6
	2%	219.4
	3%	-44.8
	4%	-26.1
	5%	-58.5
	6%	-18.5
	7%	-27.4
	8%	-56.9
	9%	-60.9
	10%	-40.0

석의 방향벡터를 보여주고 있다.

이러한 조건을 바탕으로 사면을 강체벽으로 표현한 상태에서 수치해석을 실시하였는데, 앞의 수치해석에서 언급한 바와 같이 입상체로 사면을 표현할 경우 입자의 크기와 소단의 너비의 상대적 비에 따라 정확한 형태의

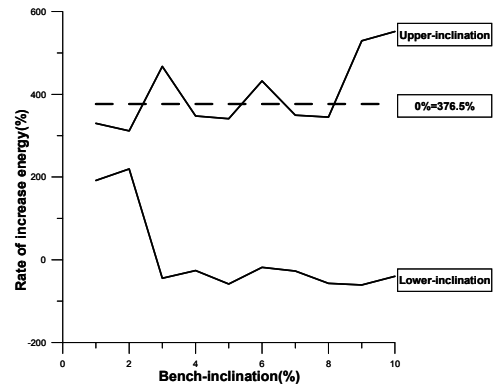


Fig. 12. Results from the numerical analysis on the increased rate of rockfall energy according to the various gradient of slope-bench.

소단을 표현하기가 용이하지 않았기 때문이다. 전체적인 해석모델은 사면의 높이와 너비를 각각 40m 씩으로 고정한 상태에서 소단은 사면의 중간지점인 20m 지점에 설치되는 것으로 가정하여 해석을 실시하였다.

Table 6은 각각의 소단구배에 대하여 낙석을 발생시킨 후 낙석의 최종에너지 증감율을 정리하여 나타낸 것이며, 이를 그림으로 나타내면 Fig. 12와 같다. 즉, 소단의 구배가 없는 경우인 0%에 대한 수치해석 결과를 기준으로 상향구배인 경우와 하향구배인 경우에 대한 수치해석 결과를 비교해 본 결과, Fig. 12에서 알 수 있듯이 상향구배의 경우 소단구배가 0%인 경우에 비하여 낮은 수준의 에너지 증감율을 보이는 경우가 약 60% 정도였으며 그 크기는 평균적으로 약 9% 정도의 감소율을 보였다. 반면 하향구배의 경우 상향구배와는 달리 전체적으로 매우 낮은 수준의 증감율을 보였으며, 이러한 결과는 소단구배가 0%인 경우에 비해 평균 78%

정도로 낙석에너지를 감소시키는 것으로 나타났다.

따라서 소단의 형성시 낙석에 따른 위험성 경감에 큰 비중을 차지해야 하는 사면 설계시 상향구배 보다는 하향구배로 소단을 설계하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단되며, 특히 Fig. 12에서 보는 바와 같이 하향구배의 크기가 3% 이상이 되면서 낙석에너지의 감소 폭이 급격히 증가하는 것으로 볼 때, 3% 이상의 하향구배로 소단을 설계하는 것이 매우 효과적일 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 낙석 위험성 경감을 위한 목적으로 사면의 외적조건인 사면의 표면상태, 사면의 경사, 소단의 개수, R_D/B_W 비, 소단구배에 따른 낙석의 최종 발생에너지 증감율을 수치해석적으로 분석해 보았다. 해석을 위해 사용된 프로그램은 개별요소법의 일종인 PFC2D였으며, 모든 해석과정에 대해 입상체 방식과 강체벽 방식으로 모델링한 사면을 각각 적용하였다. 또한 사면 상단부 임의 지점에서 낙석을 자유낙하시켜 사면의 하단부에 미리 설치해 둔 wall에 낙석이 작용하는 순간의 에너지를 측정하였으며, 이 측정값을 초기에 낙석이 자유낙하하여 사면에 충돌하는 순간의 초기에너지와 비교함으로써 최종적인 낙석의 에너지 증감율을 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 사면의 표면상태에 따른 낙석 거동 특성을 분석하기 위하여 사면을 구성하는 입자들의 크기를 달리하여 사면 표면의 굴곡정도를 변화시켰으며, 각 사면표면 상태에 대해 사면의 전체 구배를 30°, 45°, 60°로 변화시켜 해석을 수행한 결과, 입자의 크기가 클수록 즉, 표면상태가 거칠수록 낙석에너지 손실이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 굴곡이 클수록 낙석의 도약이 더욱 활발하게 일어나게 되고 이러한 도약으로 인해 추가적인 에너지 손실을 가져왔을 것으로 판단된다. 따라서 사면 설계 시 식생, 격자블록, 거친 자연사면 활용 등을 통하여 표면 상태를 거칠게 하는 방법을 통하여 낙석의 위험도를 경감시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 사면의 경사를 10°~80° 범위 내에서 10°씩 변화를 주어 수치해석을 실시한 결과, 강체벽으로 사면을 모델링한 경우 경사가 증가함에 따라 선형적으로 낙석에너지의 증감율이 증가하는 것으로 나타났으나, 입상체로 사면을 모델링한 경우는 지수함수 형태의 비례적인 증가 곡선이 나타났으며, 사면의 경사가 40°인 경우를 기점으로 낙석의 최종 발생에너지가

큰 폭으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

- 3) 소단의 개수에 따른 낙석의 거동특성 분석에서는, 낙석이 소단에 충돌할 경우 약 27%~37% 수준의 에너지 감소율이 평균적으로 나타나는 것이 확인되었다. 이러한 결과는 실제 사면 설계에서 소단의 설치를 통하여 낙석의 위험성 경감을 획기적으로 도모할 수 있음을 보여주고 있다.
- 4) 소단의 너비에 대한 낙석의 크기의 비, 즉 R_D/B_W 비의 변화에 따른 낙석의 충돌에너지 증감율을 검토한 결과, R_D/B_W 비가 0.071 이하가 되면 낙석의 소단 충돌현상이 2번 이상 발생하게 되어 에너지 증감율이 더욱 낮은 수준으로 나타났다. 따라서 실제 현장에서 사면의 불연속면이나 암중, 주변여건 등 다양한 요소의 분석을 통하여 낙석의 크기를 예측하고 이를 통해 소단의 너비를 산정하여 사면 설계에 반영한다면 낙석의 위험성 경감에 효과적인 사면 시공이 이루어질 것으로 판단된다.
- 5) 소단의 구배에 따른 낙석의 거동특성 분석 결과, 소단의 구배가 하향인 경우 소단의 구배가 없는 경우에 비하여 평균 78% 정도로 낙석에너지를 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 소단의 형성시 낙석에 따른 위험성 경감에 큰 비중을 차지해야 하는 사면 설계시 상향구배 보다는 하향구배로 소단을 설계하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단되며, 특히 하향구배의 크기가 3% 이상이 되면 낙석에너지의 감소 폭이 급격히 증가하므로 시공성을 고려한 적정 하향구배가 설계에 반영되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Cundall, P.A. & Strack, O., 1979, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, pp. 47-65.
2. Giani, G.P., 1992, *Rock Slope Stability Analysis*, A.A.Balkema.
3. Itasca Consulting Group Co., 2007, PFC2D Ver.3.1, *Manuals*.
4. 강인규, 류정수, 2005, 해빙기 붕괴토 지반의 사면안정성 검토 사례, *지반환경*, 제6권, 제1호, pp. 22-26.
5. 권오성, 정상, 홍남경, 이종현, 최지용, 2009, 국가차원의 체계적 사면재해예방 및 유지관리시스템 운용, *한국지반공학회지*, 제25권, 제2호, pp. 22-29.
6. 권영호, 박신영, 류정수, 강인규, 2005, 조립식 쓰일네일링 공법의 개발과 시험시공사례에 관한 연구, *한국지반공학회*, 2005 봄 학술발표회 논문집.
7. 구호본, 박혁진, 백영식, 2001, 현장 낙석실험을 통한 낙석방지울타리의 특성 및 성능평가, *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 제6호, pp. 111-121.
8. 박혁진, 2006, 암반사면의 복합 파괴해석을 위한 안정성

- 해석기법의 적용, 한국지반공학회, 가을학술발표회 논문집, pp. 27-28.
9. 서영교, 2008, Numerical Analysis of Seepage Induced Earthem Slope Failures, 한국지반공학회, 제24권, 제9호, pp. 5-11.
 10. 신은철, 시타라잔 파트라, 프라드한, 2008, 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정해석의 일반화 해법, 한국지반공학회 논문집, 제24권, 제3호, pp. 5-11.
 11. 신중호, 김학문, 장경준, 2009, 연계해석에 의한 간극수압 이 사면안정에 미치는 영향, 한국지반공학회 논문집, 제25권, 제2호, pp. 25-35.
 12. 이상진, 김민영, 이양상, 2008, 언양지역 퇴적암층내 점토 충전물에 의한 사면파괴 보강시공 사례고찰, 한국지반공학회지, 제24권, 제1호, pp. 54-61.
 13. 장기태, 한희수, 유병선, 2003, 지중온도에 의한 사면의 거동 예측, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제6호, pp. 407-418.



지 현 우

2007년 강원대학교 지구시스템공학과 공학사
2010년 강원대학교 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253
E-mail: kirara8665@kangwon.ac.kr



최 성 웅

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수