

낙석에너지를 고려한 낙석방지울타리 기준 개선 연구

A Study on the Improvement of Design Standards for Rockfall Protection Fences Considering Rockfall Energy

김형규¹, 박현^{2*}

Hyung-Kyu Kim¹, Hyeon Park^{2*}

요약

본 연구는 도로 절개사면에서 발생하는 낙석으로 인한 인명·재산 피해를 예방하기 위한 낙석방지 울타리의 성능을 정량적으로 평가하고, 현행 설계기준의 적정성을 검토하였다. 국내에서 사용되는 표준 낙석방지울타리는 12.5m 높이에서 400kg 암괴가 낙석할 때 약 50kJ의 에너지를 흡수하도록 설계되어 있으나, 다양한 무게·높이 조건에서 발생하는 실제 낙석 상황을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 MI-66 CRSP v4.0 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 400~800kg의 암괴를 5~20m 높이에서 낙하시키는 1,000회 시뮬레이션을 수행하고, 발생높이·무게별 최대 및 평균 낙석에너지와 도약높이를 산출하였다. 분석 결과, 발생높이 증가가 낙석에너지에 미치는 영향이 가장 컸으며, 무게 또한 에너지 증가에 비례적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 15m 이상, 500kg 이상의 조건에서는 최대 낙석에너지가 50kJ를 초과하여 현행 울타리의 흡수능력을 넘어서는 경우가 발생하였다. 도약높이는 발생높이에 따라 증가하였으나 무게에 따른 영향은 미미하였다. 본 연구는 50kJ 기준의 한계를 정량적으로 입증하고, 흡수능력 향상을 위해 지주 규격 상향 및 철망 2중 설치와 같은 보강안을 제시하였다. 이러한 결과는 합리적 설계기준 수립과 도로 안전성 확보, 유지관리 효율 향상에 기여할 것으로 기대된다.

핵심어 : 낙석방지울타리, 도로 사면, 낙석시뮬레이션, 설계기준, 도로안전

Abstract

This study quantitatively evaluates the performance of rockfall protection fences installed along roadside slopes to prevent human and property damage caused by rockfalls and examines the adequacy of the current design standards. The standard rockfall fence used in Korea is designed to absorb approximately 50 kJ of energy when a 400 kg rock falls from a height of 12.5 m; however, it does not sufficiently account for the wide range of rockfall conditions involving various masses and heights that can occur in the field. To address this limitation, the MI-66 CRSP v4.0 simulation program was employed to conduct 1,000 simulations of rockfalls with masses ranging from 400 kg to 800 kg and heights from 5 m to 20 m. The

1 Department of Highway and Transportation Research, KICT, Gyeonggi-do, Korea [Senior Researcher]

e-mail: hyoungkyukim@kict.re.kr

2 Department of Highway and Transportation Research, KICT, Gyeonggi-do, Korea [Principal Researcher]

e-mail: hyeonpark@kict.re.kr(Corresponding author)

* 본 연구는 국토교통부 한국건설기술연구원 위탁사업으로 수행되었음(과제명 : 2025년 교통량정보제공시스템(TMS) 운영 업무대행)

Received(September 11, 2025), Review Result(1st: September 27, 2025), Accepted(October 13, 2025), Published(October 31, 2025)



© 2025 The Authors. Published by NCISS.
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

maximum and average rockfall energies as well as bounce heights were calculated for each condition. The results indicate that increasing fall height had the greatest effect on rockfall energy, with rock mass also contributing proportionally to energy growth. For conditions exceeding 15 m in height and 500 kg in mass, the maximum rockfall energy surpassed 50 kJ, exceeding the absorption capacity of current fences. Bounce heights increased with fall height but showed relatively little dependence on rock mass. This study quantitatively demonstrates the limitations of the current 50 kJ design standard and proposes reinforcement measures, including upgrading post specifications and installing double-layered wire mesh, to improve energy absorption capacity. These findings are expected to contribute to the establishment of more rational design standards, enhanced road safety, and improved maintenance efficiency.

Keyword : Rockfall Protection Fence, Roadside Slope, Rockfall Simulation, Design Standard, Road Safety


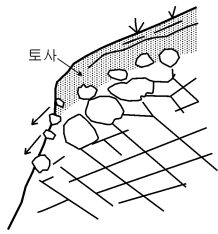
1. 서론

낙석방지시설은 도로변 절개면 등에서 떨어지는 돌(낙석)로 인한 교통 장애, 인명 및 재산 피해를 막기 위한 구조물로, 주요 종류로는 낙석방지울타리, 낙석방지망, 낙석방지옹벽 등이 있다. 낙석은 [표 1]과 같이 낙석은 암반내 불연속면(절리, 편리, 층리 등의 갈라진 틈)의 이완현상에 의해 암편이 모암으로부터 분리되어 낙하하는 현상으로 규모면에서 암편을 셀 수 있을 정도의 소량의 것을 의미하며, 사면 붕괴는 토사나 암석이 대규모로 무너져 내리는 현상으로 체적으로 표현되는 대량의 것을 말한다 [1].

낙석방지시설은 이러한 낙석, 토사붕괴 등으로 인한 교통장애, 물적·인적 손실을 예방하기 위해 설치하는 시설이다. 낙석이 발생했을 때 그 에너지를 흡수하고 도로로 굴러 떨어지는 것을 막아 도로 이용자의 안전을 확보한다.

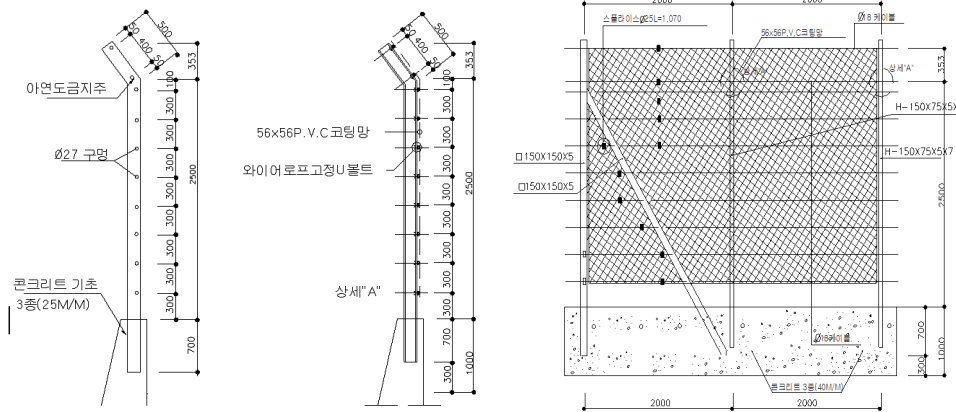
[표 1] 낙석의 원인 및 발생 형태

[Table 1] Causes and types of rockfall

| 구분 | 탈락형 낙석 | 뜯돌형 낙석 |
|----|---|--|
| 설명 | 발달된 불연속면의 이완작용으로 분리되어 낙하하는 낙석 형태 | 암·자갈이 침식되어 암편 표면이 들뜬 상태로 균형을 잃고 낙하하는 낙석 형태 |
| 형태 |  |  |

이 중 낙석방지울타리는 낙석 발생시 낙석이 도로로 추락하는 것을 물리적으로 제한하는 시설로 낙석의 무게 및 높이에 따른 물리에너지를 구조적으로 흡수할 수 있어야 한다.

국내에서 사용되고 있는 낙석방지울타리의 구조는 다음 [그림 1]과 같이 150×75×5×7mm 규격의 H형강을 2.5m의 지주를 사용하고, 와이어로프로 정착하고 60m마다 단부를 설치하는 형식이다 [2]. 낙석 하중 400kg인 암괴가 12.5m의 높이에서 낙석될 때를 기준으로 흡수가능 에너지는 약 50kJ 정도이다.



[그림 1] 국내 낙석방지시설 규격

[Fig. 1] Domestic standards for rockfall protection facilities

낙석방지시설에 대한 현행 기준은 12.5m에서 400kg 암석이 낙석되는 경우의 구조 검토에 근거하여 획일적으로 다음과 같은 표준도 형태로 설치되고 있는 상황이며, 낙석 피해 예측이나 낙석 대책공의 선정에 위해서는 비탈면에서 대상이 되는 낙석의 형상, 치수, 운동 형태, 낙하 속도, 도약 높이, 이동경로, 낙석 에너지 등의 낙석 운동 형태 적용이 필요하다.

즉, 다양한 규모, 형태로 발생하는 낙석을 고려하여 합리적인 낙석방지시설 설치방안을 검토 및 수립하여야 한다. 단일규격의 낙석방지 울타리 사용시 고중량의 낙석 발생과 같이 다양한 패턴으로 발생하는 낙석 에너지에 대응이 곤란한 문제가 발생한다.

현재 적용하고 있는 낙석 방지울타리의 흡수 가능한 낙석 에너지는 약 50kJ로 다양한 낙석에 대한 적용 유연성이 부족하다. 12.5m에서 400kg의 자유 낙하 에너지이지만 낙석하중이 더 크고 높은 도로비탈면에서 발생하는 낙석이 발생할 경우 상기 기준으로는 자유 낙하 에너지 흡수가 어려운 실정이다.

또한, 다음 [표 2]와 같이 낙석방지울타리 미설치 구간의 소규모 낙석 및 토사 유실 발생 시 대응이 곤란한 문제가 있기 때문에 교통안전 및 유지관리를 고려한 개선이 요구된다.

낙석 에너지 산정(추정)을 위한 비탈면 조건(경사, 소단), 낙석높이에 대한 기준이 없어 수량산출 기준에 따라 낙석방지시설 반영이 필요하다. 이를 위해서는 발생 가능한 낙석 조건(하중, 높이 등) 기준 및 유지관리를 감안한 합리적인 낙석방지 대책을 강구하여야 한다.

[표 2] 낙석 및 토사에 따른 피해 유형

[Table 2] Damage types according to rockfall and debris flow

| 토사유실(방호울타리 有) | 토사유실(방호울타리 無) | 도로유입 |
|---|---|--|
|  |  |  |

2. 낙석발생 원인 및 낙석방지울타리 성능 관련 기존 연구 고찰

국내에서는 낙석방지울타리의 실제 지지능력을 평가하고, 기존 설계기준의 문제점을 개선하기 위해 수행되었다. 기존 설계 방식에서는 울타리를 구성하는 철망, 지주, 와이어로프 각각의 흡수가능에너지를 단순 합산하여 전체 흡수능력을 산정했으나, 실제 현장 시험에서는 이러한 방식으로 계산된 값보다 훨씬 낮은 에너지에서도 울타리가 낙석을 지지하지 못하는 사례가 발생하였다. 이에 연구자는 낙석방지울타리의 성능을 실규모 낙석시험을 통해 직접 확인하고, 이를 토대로 설계기준을 보완할 필요성을 제기하였다 [3].

낙석시험장에서 400kg 콘크리트 낙석 볼과 크레인, 초고속 카메라, 타격 위치 제어장치를 이용하여 수직 낙하시험을 진행한 연구에서는 PVC 코팅망과 각형강관으로 설치한 울타리에 25kJ와 30kJ의 에너지로 낙석을 떨어뜨린 결과, 실제 최대 변위는 기존 설계 기준에서 사용하는 값보다 크게 나타났으며, 약 30kJ의 에너지를 흡수할 수 있음을 확인했다. 본 결과는 향후 낙석방지 울타리 망의 설계 및 성능평가 기준 개선의 필요성을 제시하였다 [4].

유한 요소 분석 프로그램을 사용한 사례로는 국내 도로 절개사면에 설치되는 낙석방지울타리의 에너지 흡수 능력을 구성 부재별로 정량적으로 평가한 연구가 진행되었다. 기존에는 실물 낙하 실험을 통해 전체 시스템의 성능을 검증해 왔으나, 이러한 시험은 비용과 시간이 많이 소요될 뿐 아니라 철망, 와이어로프, 지주 등 각 부재별로 에너지가 얼마나 소산되는지 분석하기 어렵다는 한계가 있었다. 이에 연구진은 상용 유한요소해석 프로그램(ABAQUS)을 이용해 낙석방지울타리의 해석 모델을 개발하고, 실제 낙하 실험 결과와 비교·검증하여 모델의 신뢰성을 확보하였다 [5].

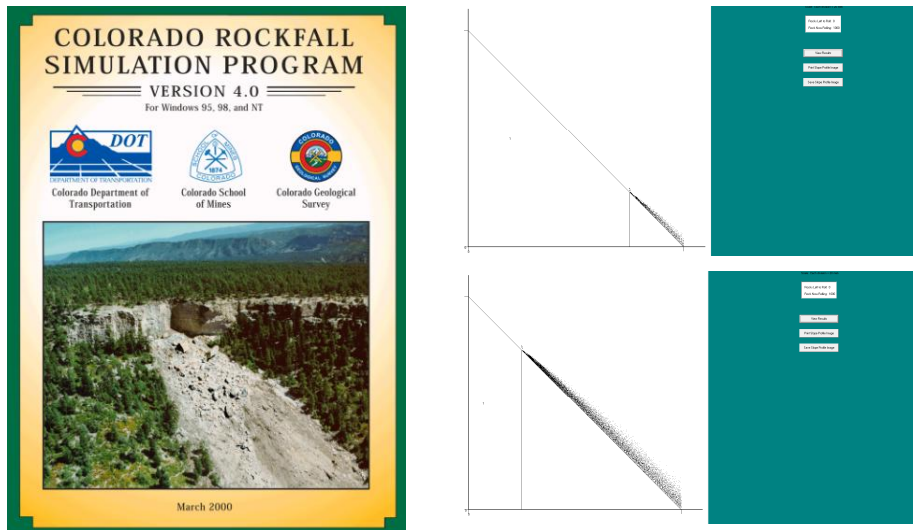
3. 낙석 유형에 따른 운동에너지 산출 방법론

기존 문헌 검토 결과, 암석의 낙하에너지를 시뮬레이션 하는 유한요소해석 프로그램의 활용성이 확인되었고, 본 연구에서는 미국 콜로라도 주정부에서 사용하는 낙석에너지 산출 시뮬레이션을 통해 명확한 낙석 중량, 낙석 높이, 경사 등에 따른 낙석 에너지를 검토하였다. 이를 통해 현행 기준

적용 시 낙하에너지 흡수 여부를 최종적으로 판단하고, 성능 강화 시의 최대 흡수 가능 에너지 등을 산출하였다.

이를 위하여, MI-66 Colorado Rockfall Simulation Program, Version 4.0 (MI-66 CRSP v4.0)은 암석 낙하 시뮬레이션을 위한 프로그램을 적용하여 에너지 산정한다. MI-66 CRSP v4.0은 미국 콜로라도주 정부 기관인 지질조사국(Colorado Geological Survey)에서 개발한 프로그램으로 암석 낙하를 시뮬레이션하여 낙하 경로, 속도, 에너지 등을 분석한다. 이를 통해 암석 낙하의 영향을 예측하고, 위험 지역을 식별하여 적절한 방호 조치를 설계할 수 있다.

기능적인 특징으로 [그림 2]와 같이 암석 낙하 경로 시뮬레이션이 가능하며, 암석이 낙하하는 경로를 2D 및 3D로 시뮬레이션이 가능하다. 이는 암석의 초기 위치, 크기, 형태 및 경사면의 특성을 고려하여 경로를 산출하고, 속도 및 에너지 계산을 통해 낙하하는 동안 암석의 속도와 운동 에너지를 계산하여 낙하의 강도를 평가한다.



[그림 2] MI-66 Colorado Rockfall Simulation Program

[Fig. 2] MI-66 Colorado Rockfall Simulation Program

충돌 및 회전 시뮬레이션 기능이 존재하며, 암석이 경사면이나 다른 물체와 충돌할 때의 행동을 시뮬레이션하여, 충돌 후의 방향 및 에너지를 예측 가능하다. 그 외 실제 지형 데이터를 기반으로 한 다양한 지형 모델을 사용하여 정확한 시뮬레이션이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 주 정부기관에서 다년간의 실제 낙석 데이터를 기반으로 개발된 MI-66 CRSP v4.0을 활용하여 암괴 낙석 높이별 운동에너지를 산출 분석하며, 이를 통해 현행 낙석방지울타리의 허용 운동에너지를 초과하는지를 판단하였다.

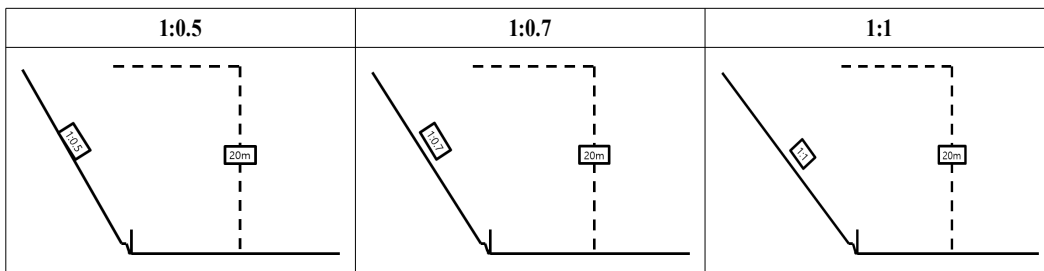
낙석 시뮬레이션을 위하여 우선 낙석 모델링을 진행하였으며, 낙석 중량은 다음 [표 3]과 같이 단위중량 형상, 낙석 수량을 선정하였다.

[표 3] 시뮬레이션을 위한 낙석 모델링
 [Table 3] Rockfall modeling for simulation

| 구 분 | 단위중량(kg/m ³) | 형 상 | 낙석수량 |
|-----|--------------------------|-----|-------|
| 낙 석 | 2,700 | 구형 | 1,000 |

해석 단면 구성은 다음 [표 4]와 같이 경사 1:0.5, 1:0.7, 1:1 3가지 경사에 대하여 진행하였으며, 경사 높이는 10, 15, 20, 25, 30m로 구분하여 진행하였다.

[표 4] 해석 단면 구성 예시 (20m 기준)
 [Table 4] Example of analysis cross-section configuration (Based on 20m height)



낙석중량은 400kg을 기준으로 중량이 높은 낙석이 발생할 수 있다는 점을 고려하여 400kg, 500kg, 600kg, 700kg, 800kg으로 설정하였으며, 이를 각 1,000회 낙하하여 시뮬레이션을 진행하였다.

4. 분석결과

본 연구에서 수행한 ‘MI-66 CRSP v4.0’ 시뮬레이션 결과, 비탈면 1:1에서는 다음 [표 5]와 같이 암괴의 발생 높이와 무게는 낙석에너지 및 도약높이에 뚜렷한 영향을 미쳤다. 먼저 발생 높이가 높아질수록 낙석에너지는 급격히 증가하였다. 400kg 암괴의 최대 낙석에너지는 5m 발생 시 5.1kJ 였으나 10m에서는 12.5kJ, 15m에서 31.1kJ, 20m에서 33.6kJ로 상승하였다. 평균 낙석에너지 역시 4.1kJ에서 28.1kJ까지 꾸준히 증가하였다. 이는 발생 높이가 클수록 낙석이 갖는 위치 에너지가 커지고, 결과적으로 충돌 시 더 큰 에너지가 전달됨을 의미한다.

암괴의 무게 역시 낙석에너지 증가에 중요한 역할을 했다. 같은 발생 높이에서 무게가 커질수록 최대 낙석에너지는 비례적으로 커졌다. 15m 높이에서 발생 시 400kg 암괴의 최대 낙석에너지는 31.1kJ였으나, 800kg 암괴에서는 59.3kJ로 약 1.9배 증가하였다. 평균 낙석에너지도 유사한 비율로

증가하여, 무거운 암괴일수록 충돌 시 더 큰 에너지가 방호 구조물에 작용함을 알 수 있다.

최대 도약높이는 발생 높이 증가에 따라 점진적으로 상승했지만, 증가폭은 에너지만큼 크지 않았다. 400kg 암괴의 경우 5m 발생 시 최대 도약높이가 0.41m였으나 20m에서는 1.51m로 약 3.7배 증가하였다. 무게에 따른 영향은 비교적 작았으며, 예를 들어 20m 발생 시 400kg과 800kg 암괴의 최대 도약높이는 각각 1.51m와 1.62m로 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 도약높이가 주로 초기 운동 에너지보다 충돌 및 반발 계수 등에 영향을 받는다는 점을 시사한다.

종합적으로 볼 때, 발생 높이와 무게는 낙석에너지의 주요 결정 인자로 작용하며, 특히 높이 증가가 에너지 증가에 미치는 영향이 크다. 최대 도약높이의 경우 높이와 무게에 따라 증가하지만, 에너지 증가만큼 민감하게 반응하지는 않았다.

[표 5] 비탈면 1:1에서 암괴 발생높이별 낙석에너지 시뮬레이션 결과

[Table 5] Simulation results of rockfall energy by block fall height on a 1:1 slope

| 암괴 무게 발생높이 | | 400kg | 500kg | 600kg | 700kg | 800kg |
|---------------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| | | 최대 낙석에너지 | 5.1kJ | 5.8kJ | 9.1kJ | 9.4kJ |
| 5m | 평균 낙석에너지 | 4.1kJ | 4.3kJ | 7.3kJ | 8.2kJ | 9.2kJ |
| | 최대 도약높이 | 0.41m | 0.42m | 0.53m | 0.58m | 0.61m |
| | 최대 낙석에너지 | 12.5kJ | 14.8kJ | 23.4kJ | 24.3kJ | 24.9kJ |
| 10m | 평균 낙석에너지 | 8.3kJ | 12.1kJ | 19.3kJ | 22.1kJ | 23.8kJ |
| | 최대 도약높이 | 0.81m | 0.83m | 0.88m | 0.89m | 0.93m |
| | 최대 낙석에너지 | 31.1kJ | 38.9kJ | 44.3kJ | 56.3kJ | 59.3kJ |
| 15m | 평균 낙석에너지 | 25.3kJ | 31.5kJ | 38.1kJ | 47.3kJ | 51.1kJ |
| | 최대 도약높이 | 1.22m | 1.22m | 1.25m | 1.26m | 1.31m |
| | 최대 낙석에너지 | 33.6kJ | 44.5kJ | 50.1kJ | 56.3kJ | 73.1kJ |
| 20m | 평균 낙석에너지 | 28.1kJ | 38.9kJ | 41.3kJ | 48.1kJ | 58.9kJ |
| | 최대 도약높이 | 1.51m | 1.53m | 1.54m | 1.61m | 1.62m |

비탈면 1:0.7에서는 다음 [표 6]와 같이 암괴의 발생높이가 15m 이상이고 암괴의 무게가 600kg 이상일 경우 최대 낙석에너지가 63.7kJ로 나타나 허용 에너지를 초과하는 것으로 분석되었다. 평균 낙석에너지는 발생높이 15m 이상 암괴의 무게 700kg 이상이거나, 발생높이 20m 이상 암괴의 무게가 600kg 이상일 때부터 허용 에너지를 초과하였다.

암괴 낙석시 최대 도약높이는 발생높이가 커질수록 전반적으로 증가하지만, 무게의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 15m 높이에서 400kg 암괴의 최대 도약높이는 1.22m이고 800kg에서도 1.31m로 큰 차이가 발생하지는 않았다. 반면에 5m에서 0.4~0.6m 수준이던 도약높이가 20m에서는 1.5~1.6m까지 증가하여 약 3배 이상 증가하였다. 20m 높이에서 낙석시 최대 2.94m로 현행 낙석방

지울타리의 높이 3.83m를 초과하지는 않는 것으로 나타나, 낙석방지울타리의 구조적인 높이 부족으로 인해 암괴가 도로로 침범하는 경우는 발생하지 않았다.

[표 6] 비탈면 1:0.7에서 암괴 발생높이별 낙석에너지 시뮬레이션 결과
 [Table 6] Simulation results of rockfall energy by block fall height on a 1:0.7 slope

| 암괴 무게 | | 400kg | 500kg | 600kg | 700kg | 800kg |
|-------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 발생높이 | | | | | | |
| 5m | 최대 낙석에너지 | 6.3kJ | 7.5kJ | 10.5kJ | 11.3kJ | 12.5kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 5.5kJ | 6.5kJ | 8.8kJ | 9.3kJ | 10.9kJ |
| | 최대 도약높이 | 0.61m | 0.69m | 0.71m | 0.73m | 0.76m |
| 10m | 최대 낙석에너지 | 16.3kJ | 20.3kJ | 35.7kJ | 37.3kJ | 40.9kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 14.7kJ | 16.8kJ | 28.3kJ | 30.9kJ | 33.1kJ |
| | 최대 도약높이 | 1.11m | 1.22m | 1.32m | 1.37m | 1.44m |
| 15m | 최대 낙석에너지 | 37.7kJ | 45.7kJ | 63.7kJ | 68.1kJ | 71.3kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 30.9kJ | 38.1kJ | 49.4kJ | 55.4kJ | 61.1kJ |
| | 최대 도약높이 | 1.99m | 2.21m | 2.41m | 2.44m | 2.51m |
| 20m | 최대 낙석에너지 | 46.1kJ | 60.7kJ | 83.9kJ | 88.1kJ | 95.1kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 40.3kJ | 44.3kJ | 68.1kJ | 72.5kJ | 80.1kJ |
| | 최대 도약높이 | 2.71m | 2.88m | 2.91m | 2.92m | 2.94m |

비탈면 1:0.5에서는 결과는 다음 [표 7]과 같이 발생높이가 높아질수록 낙석의 에너지는 급격하게 증가하였다. 400kg 암괴는 5m에서 떨어질 때 최대 낙석에너지가 6.2kJ이지만, 10m에서는 26.9kJ, 15m에서는 50.1kJ, 20m에서는 57.7kJ로 약 9배 이상 증가하였다. 무게가 큰 암괴일수록 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 800kg 암괴는 5m에서 최대 12.9kJ이던 에너지가 20m에서는 109.1kJ까지 증가하였다. 이는 낙석 에너지가 중력 위치에너지에 비례하기 때문이며, 설계 시 발생높이를 가장 중요한 변수로 고려할 필요가 있다.

같은 높이에서 무게가 400kg에서 800kg으로 두 배가 되면 최대 낙석에너지는 거의 두 배 가까이 증가하였는데, 15m에서 400kg 암괴의 최대 낙석에너지는 50.1kJ이지만 800kg은 95.4kJ로 나타났다. 따라서 낙석방지울타리의 에너지 흡수 능력은 예상되는 최대 암괴 무게와 높이의 조합을 기준으로 산정되어야 하며, 평균 낙석에너지는 최대값보다 항상 낮게 나타나는데, 이는 실제 낙석이 충돌과 구름 과정에서 일부 에너지를 소산하기 때문이지만 설계에서는 평균값이 아니라 최대값을 기준으로 해야 실제 사고 시에도 충분한 안전성을 확보할 수 있다.

도약높이 역시 발생높이가 커질수록 크게 증가합니다. 400kg 암괴는 5m에서 최대 도약높이가 0.68m 수준에 불과하지만, 15m에서는 2.51m, 20m에서는 4.11m까지 증가하였다. 무게가 증가할수록 도약높이도 소폭 증가하여 암괴 무게가 800kg이고 발생높이가 20m인 조건에서는 최대 4.53m까지

발생하였다. 현행 낙석방지울타리의 설계 기준으로 하면 실제 낙석이 낙석방지울타리를 뛰어넘을 위험이 큰 상황이다.

[표 7] 비탈면 1:0.5에서 암괴 발생높이별 낙석에너지 시뮬레이션 결과

[Table 7] Simulation results of rockfall energy by block fall height on a 1:0.5 slope

| 암괴 무게 | | 400kg | 500kg | 600kg | 700kg | 800kg |
|-------|----------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 발생높이 | | | | | | |
| 5m | 최대 낙석에너지 | 6.2kJ | 7.8kJ | 8.9kJ | 10.9kJ | 12.9kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 5.5kJ | 7.1kJ | 8.1kJ | 9.7kJ | 10.8kJ |
| | 최대 도약높이 | 0.68m | 0.72m | 0.75m | 0.83m | 0.91m |
| 10m | 최대 낙석에너지 | 26.9kJ | 35.9kJ | 43.7kJ | 46.7kJ | 53.7kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 23.1kJ | 33.7kJ | 39.4kJ | 43.1kJ | 47.3kJ |
| | 최대 도약높이 | 1.20m | 1.21m | 1.31m | 1.39m | 1.51m |
| 15m | 최대 낙석에너지 | 50.1kJ | 57.3kJ | 74.3kJ | 81.6kJ | 95.4kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 45.1kJ | 49.3kJ | 60.1kJ | 65.2kJ | 70.3kJ |
| | 최대 도약높이 | 2.51m | 2.55m | 2.71m | 2.87m | 3.11m |
| 20m | 최대 낙석에너지 | 57.7kJ | 75.3kJ | 81.4kJ | 101.4kJ | 109.1kJ |
| | 평균 낙석에너지 | 48.9kJ | 67.4kJ | 70.3kJ | 75.4kJ | 80.9kJ |
| | 최대 도약높이 | 4.11m | 4.15m | 4.23m | 4.32m | 4.53m |

전체적으로 ‘MI-66 CRSP v4.0’ 시뮬레이션 결과, 15m의 높이에서 400kg 암괴가 낙석시 50kJ을 초과하는 것으로 나타난 것으로 해석된다.

하지만, 시뮬레이션 결과는 1,000회 시뮬레이션 중 최대 낙석에너지를 비교한 것으로 평균 낙석에너지로 판단할 경우 20m 높이에서 400kg 암괴가 낙석시 50kJ을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

종합적으로 판단해볼 경우, 500kg 이상의 암괴가 낙석시에 50kJ을 초과하는 것으로 해석할 수 있으며, 상기 조건의 암괴가 발생할 수 있는 지점 또는 구간에는 현행 50kJ 수준의 낙석방지울타리의 개선이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서 사용된 ‘MI-66 CRSP v4.0’ 으로 산출하여 50kJ 이상의 운동에너지가 발생할 수 있는 지점에는 다음과 같은 낙석방지울타리 보강이 요구된다.

낙석방지울타리 보강을 위해서는 다음 [표 8]과 같이 50kJ 초과한 낙석에너지를 흡수할 수 있는 규격을 제시할 필요가 있다. 기존 시설물을 변형을 최소화하기 위하여 지주의 간격 및 와이어 로프의 규격은 동일하게 사용하데, 흡수가능 낙석에너지를 향상시키기 위하여 철망을 2중으로 설치하고 지주의 규격을 상행시키는 방법이 바람직하다.

[표 8] 낙석 에너지 초과 구간에 대한 신규 형식(안)

[Table 8] Proposed new design for sections exceeding rockfall energy capacity

| 구 분 | 현 행 | 개선 | | |
|-----------|------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | | 낙석 에너지 50kJ 이하 구간 | 낙석 에너지 50kJ 초과 구간 | |
| 지주 | 간격 | 2.0~3.0m | 2.0~3.0m | 3.0m |
| | 규격 (단부) | H-150×75×5×7 (□-150×150×4.5) | H-150×75×5×7 (□-150×150×4.5) | □-150×150×4.5 (□-150×150×4.5) |
| 와이어 로프 | 규격 | Ø20(6×24) 파단강도18.3t | Ø20(6×24) 파단강도18.3t | Ø20(6×24) 파단강도18.3t |
| | 간격 | 상부 : 30cm 하부 : 20cm | 상부 : 30cm 하부 : 20cm | 상부 : 30cm 하부 : 20cm |
| 철망 | 규격 | Ø4.0×50×50 (심선3.2) | Ø4.0×50×50 (심선3.2) | Ø4.0×50×50-2ea (심선3.2) |

References

- [1] J. I. Lee, C. G. Jung, S. H. Kim, Y. C. Hwang, S. H. Lee, "A Study on the Evaluation of Expanded Metal Characteristics for Application Rockfall Facilities", Journal of the Korean Geo-environmental Society, vol. 12, no. 9, September 2011, pp. 13-20, doi: 10.14481/JKGES.2011.12.9.2.
- [2] K. D. Kim, M. G. Ko, D. S. Kim, K. L. J. Han, "Performance assessment for rockfall protection systems II: Performance assessment criteria", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, vol. 35, no. 1, February 2015, pp. 49-61, doi: 10.12652/Ksce.2015.35.1.0063.
- [3] K. J. Han, B. G. Moon, M. G. Ko, K. D. Kim, "Performance assessment of rockfall protection fence for the rockfall energy of 100 kJ using ETAG 27", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 16, no. 2, April 2016, pp. 247-259, doi: 10.9798/KOSHAM.2016.16.2.247.
- [4] J. H. Lee, H. D. Lee, J. K. Song, J. H. Moon, "A study on finite element analysis for energy absorption ability of each member of rockfall protection fence", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 19 no. 4, August 2019, pp. 179-185. doi: 10.9798/KOSHAM.2019.19.4.179.
- [5] J. H. Seo, Y. C. Hwang, "Field test for absorption energy and displacement of rockfall protection net", Journal of the Korean Geo-environmental Society, vol. 21, no. 12, December 2020, pp. 17-21, doi: 10.14481/jkges.2020.21.12.17.