

낙석해석을 통한 낙석방지울타리의 적성성 검토

유병옥, 심재원, 장현익, 김성환(한국도로공사 도로교통연구원)

1. 서론

절토비탈면의 낙석방지울타리는 낙석에 대한 안정대책으로 많이 사용되어온 방법이나 국내에 사용되어온 낙석방지울타리는 비탈면의 높이나 경사, 울타리의 이격거리 등을 고려하지 않고 표준도에 의한 낙석방지울타리를 사용하고 있는 사용하고 있다. 그러나 낙석발생시 충격에너지가 작아 낙석방지울타리의 구실을 하지 못하는 경우 및 높이가 낮아 울타리를 넘는 경우가 흔하게 발생하고 있는 실정이다.

국내에서 사용되고 있는 낙석방지울타리는 150×75×5×7mm규격의 H형강을 2.5m의 지주로 사용하여 와이어로프로 정착하고 60m마다 단부를 설치하는 형식으로 낙석하중 400kg인 암괴가 12.5m의 높이에서 낙석 될 때를 기준으로 흡수가능 에너지는 약 50kJ 정도를 사용하고 있다.

본 논문은 낙석방지울타리의 적성성을 평가하기 위해 Rockfall Ver.6.0 프로그램을 이용하여 수치해석을 통한 낙석방지울타리의 성능평가를 수행해 보고 개선방안에 대해 언급해 보고자 한다.

2. 낙석운동 메카니즘

낙석피해 예측이나 낙석 대책공의 선정을 위해서는 비탈면에서 대상이 되는 낙석의 형상, 치수, 운동형태, 낙석속도, 도약높이, 이동경로, 낙석에너지 등의 운동 메카니즘을 추정할 필요가 있다.

2.1 낙석의 운동형태

낙석운동은 미끄러짐 운동, 회전운동, 비도운동 등으로 분류하고, 자유낙하, 선 및 포물선운동으로 표현되거나, 낙석형상에 관계없이 사면각도에 따라 자유낙하(Free Falling), 도약(Bouncing), 회전(Rolling), 미끄러짐(Sliding)으로 분류하여 표현하기도 한다(그림 2.1, Ritchie, 1963). 그러나 비탈면경사 및 지형, 낙석종류에 따른 낙석운동의 천이도 시뮬레이션에서 고려되어야 한다.

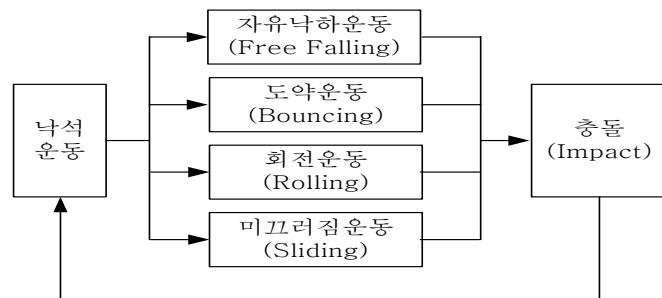


그림 2.1 낙석운동형태의 분류 (Ritchie, 1963)

2.2 낙석속도

낙석속도는 낙하높이에 크게 관계되며 측정된 낙하속도는 자유낙하속도에 잔존계수 α 를 곱하여 결정하고, 경사, 지질, 요철 및 낙석형상 등의 모든 요인을 표현해 준다. 또한, 경사에 영향을 받는 경우가 적어 등가마찰계수($\mu = \tan\theta(1-\alpha^2)$)로 변환하여 사용가능하다(표 2.1).

표 2.1 비탈면 분류와 등가마찰계수(μ)

낙석특성	비탈면 특성	등가마찰계수	등가마찰계수(실험)
球狀	경암, 굴곡이 작고 임목이 없음	0.05	0~0.1
角狀/球狀	연암, 굴곡이 중~대이며, 임목 없음	0.15	0.11~0.2
角狀/球狀	토사에추, 굴곡이 소~중이며, 임목 없음	0.25	0.21~0.3
角狀	애추, 굴곡이 중~대이며, 임목 있음~없음	0.31~(0.4)	0.31~(0.6)

2.3 낙석에너지(E_T)

낙석에너지는 선속도 에너지(E_V)와 회전 에너지(E_r)의 합으로 나타낼 수 있다. 특히, 회전 에너지는 $0.1 E_V$ 로 근사할 수 있다.

$$E_T = E_V + E_r \quad (\text{식 1})$$

여기서, E_V : 선속도 에너지 ($= \frac{1}{2} m V^2$), E_r : 회전 에너지 ($= \frac{1}{2} I \omega^2$)

E_V 는 낙석속도 및 낙석의 질량에 의해 결정할 수 있으며, E_V 와 E_r 의 실험결과에 의해 다음과 같은 관계를 추정할 수 있다.

$$E_r = \beta E_V \approx 0.1 E_V \quad (\text{식 2})$$

따라서 식(2)를 식(1)에 대입하면,

$$E_T = E_V(1 + \beta) = \frac{1}{2} \frac{W}{g} V^2(1 + \beta) \quad (\text{식 3})$$

결국 식(3)에 낙석속도의 식을 대입하여 낙석에너지를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E = \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right) \cdot (1 + \beta) WH \quad (\text{식 4})$$

그러나 $\left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right) \cdot (1 + \beta) \leq 1$ 이 된다.

여기서, E : 낙석에너지, β : 회전에너지에 관한 계수 ≈ 0.1 , μ : 등가마찰계수,
 θ : 사면구배, W : 낙석 중량, H : 사면 높이

2.4 낙석궤적 및 도약높이

낙석중심이 회전에 의한 접지반력과 동일면이면 등고선에 대해서 직각방향으로 낙하한다. 도약높이는 낙석방호공의 위치와 높이의 주 인자로 국내에서는 비탈면 요철이 큰 경우 외에는 2.0m 이하로 간주한다.

3. 낙석방지울타리에 대한 안정성 검토

3.1 낙석방지 울타리

현행 낙석방책은 12.5m에서 400kg 암석이 낙석되는 경우의 구조검토에 근거하여 획일적으로 그림 3.1과 같은 표준도 형태로 설치되고 있다. 일반적으로 절토사면 높이 및 경사각도를 배제하고 설치한 경우, 충격에너지를 넘거나 펜스를 튀어 넘는 경우가 빈번하게 발생되고 있어서 낙석방지 울타리는 지반조건, 비탈면 경사, 높이 등을 고려하여 규격이 결정되어야 한다.

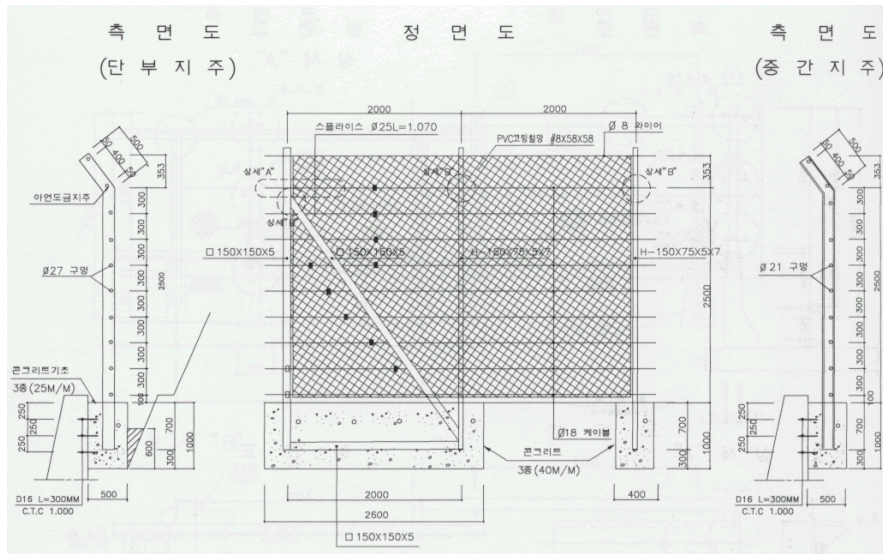


그림 3.1 옹벽용 낙석방지울타리 표준도

3.2 Rockfall hazard Ver.6.0 프로그램에 의한 안정성 검토

본 프로그램은 주어진 현장여건에 대한 낙석 및 낙반 발생확률에 대한 통계분석과 거동을 모델링하기 위해 개발됐으며, 현장의 실제 조사결과에 기초하여 물리적 원리에 입각한 중력 가속도 방정식과 에너지 보존법칙을 적용한다.

(1) 입력변수

상세 암반 비탈면 단면, 노출사면 거칠기, 비탈면피복상태, 표면경도, 암괴 크기와 형상 등 6개 주요 입력변수가 있다(표 3.1). 본 프로그램은 해석하고자 하는 지역에 대한 입력 자료를 사용하여 보호시설이 필요한 곳이나 시설설치를 판단하는데 사용된다.

- ① 단면도 : 직각직경의 낙석들에 대한 낙반거리와 경사변화가 상관관계를 갖는다. 각 경사에 대해서 각도, 거칠기, 경도 미 피복상태 별로 모델링된다.
- ② 암반 비탈면 거칠기(굴곡 정도) : 대개 불규칙하고 노두가 제멋대로 생겨 낙하궤적은 바운드, 롤링, 또는 미끄러짐으로 나타난다. 거동은 낙석형상 및 직경과 직결되며 본 프로그램은 거칠기에 대한 낙석크기에 대해 계산한다. 정확한 파악을 위해 입력 시에 현장조사가 수반되어야 한다.

- ③ 암반 비탈면 피복(D_t : Tangential Damping) : 암반 비탈면 각각의 피복특성을 탄젠트 계수로 정의하며, 토사와 식생 모두를 포함한다. 충격에너지 흡수와 낙석의 사면 내 정지 등에 영향을 미친다.
- ④ 경도(D_n : Normal Damping) : 표면의 딱딱함을 의미하여 정규계수(D_n)로 정의된다. 이 특징은 표면의 충격에너지 흡수특성에 영향을 미친다.
- ⑤ 암괴크기 : 직경 또는 암괴형상에 따른 장·단축으로 표현된다. 형상과 함께 궤적에 영향을 미치며 육면체, 구형 및 판상으로 분류된다. 컴퓨터 모사와 실제 낙석 실험을 병행할 것을 권하며 실제 낙석궤적을 이용한 모델은 시행착오법을 이용하여 특정사면에 대한 사면계수 도출이 가능하다.

표 3.1 프로그램 해석시의 입력변수(프로그램 추천치)

	surface name	R_g	V%	R_n	V%	D_n	V%	D_t	V%	R_w	V%	O_a	O_f
1	Rock-mainly smooth surface	30	5	40	5	0.06	10	0.93	8	0.02	10	0.1	1
2	Rock-rough surface	30	5	40	5	0.06	10	0.93	8	0.05	15	1	2
3	Rock debris covered-wooded	25	0	35	5	0.05	15	0.9	10	0.08	15	0.5	1
4	Rock with a thin soil cover	15	5	30	5	0.035	20	0.8	10	0.1	15	0.2	1
5	Rock debris with a thin soil cover	15	5	35	5	0.04	15	0.85	10	0.15	15	1	1
6	Residual soil-grass covered	15	5	30	5	0.03	10	0.75	10	0.12	15	0.1	1

(2) 가정조건

해석조건은 울타리 높이 2.5m, 낙석하중 200, 400 및 800kg, 울타리 이격거리 0, 1, 2 및 3m, 비탈면 경사 1:1.0, 1:0.7, 1:0.5 및 1:0.3, 비탈면 높이 10, 20,30, 40m를 변수로 하여 낙석에 대한 충격력과 최대 비산높이를 해석하였다.

3.3 해석결과

낙석해석은 비탈면의 높이 10m, 20m, 30, 40m에 대해 낙석중량, 비탈면경사, 울타리와 비탈면간의 이격거리를 변화를 주면서 각 높이별 45회의 해석을 실시하여 대표적인 해석결과를 그림 3.2~3.5에 나타내었다.

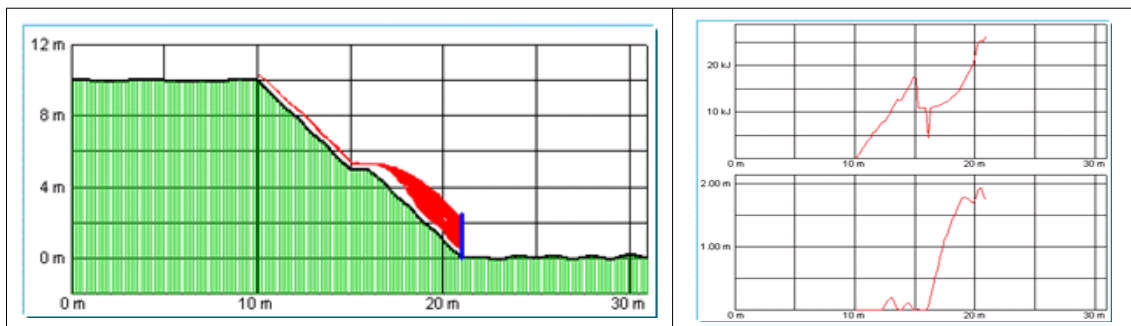


그림 3.2 10m 높이의 비탈면, 1:1.0, 암괴중량 400kg, 이격거리 0m 경우의 해석결과

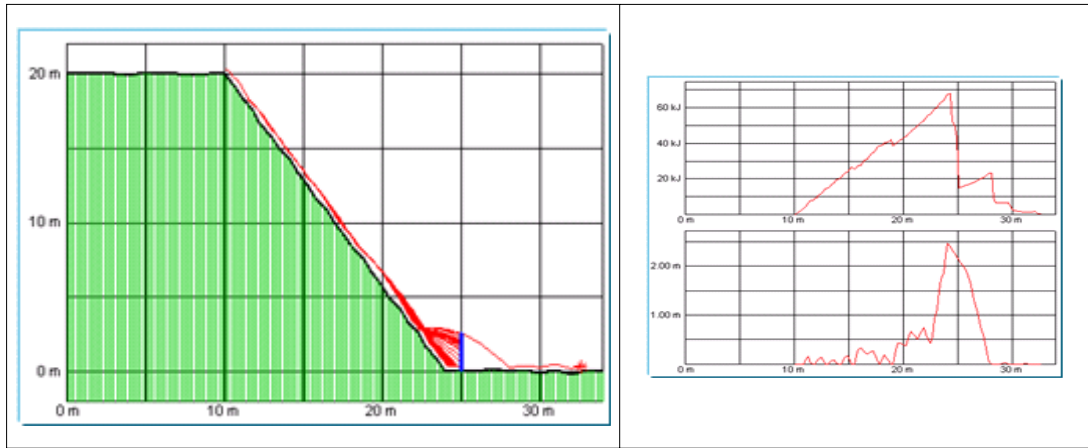


그림 3.3 20m 높이의 비탈면, 1:0.7, 암괴중량 400kg, 이격거리 1m 경우의 해석결과

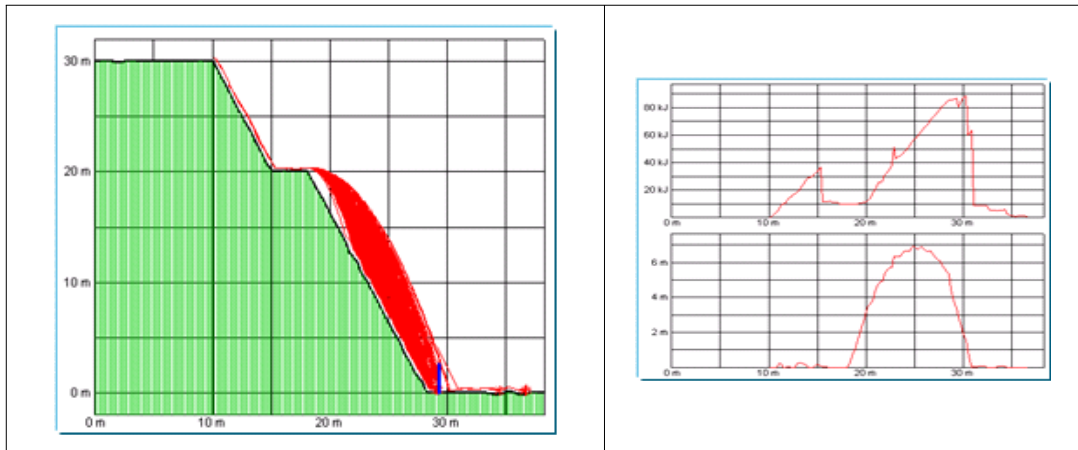


그림 3.4 30m 높이의 비탈면, 1:0.5, 암괴중량 400kg, 이격거리 1m 경우의 해석결과

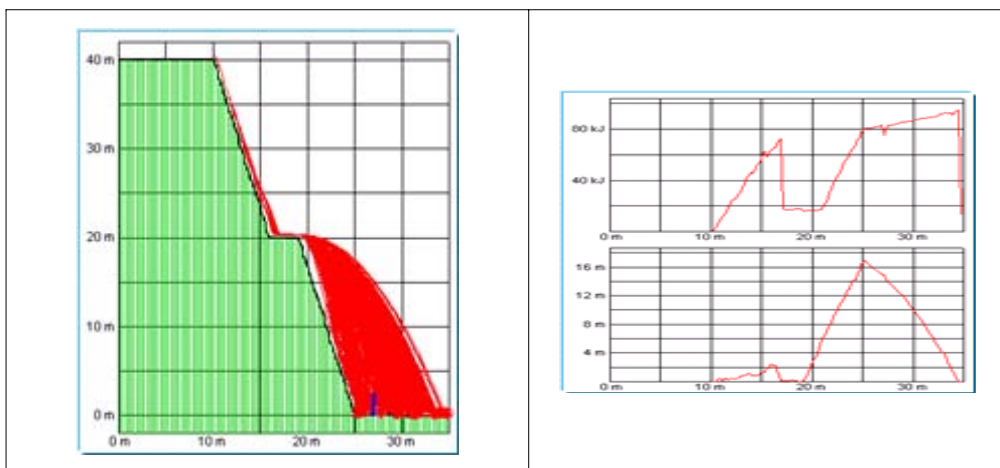


그림 3.5 40m 높이의 비탈면, 1:0.3, 암괴중량 400kg, 이격거리 2m 경우의 해석결과

3.4 낙석방지울타리의 높이 및 충격에너지 적정성 검토

(1) 울타리 높이 및 충격에너지의 적정성

암괴의 중량이 200kg 정도가 낙석이 되는 경우는 울타리의 이격거리가 1m 이상이 확보되고 25m 이하에서는 낙석의 도약높이에 대한 현행 울타리로 안정성이 확보될 수 있으나 25m 이상에서는 도약높이가 높아 울타리를 넘는 경우가 발생하게 된다. 그리고 충격에너지에서는 대부분의 경우가 현행의 낙석방지울타리로 안정성을 확보할 수 있는 것으로 해석되었다(그림 3.6).

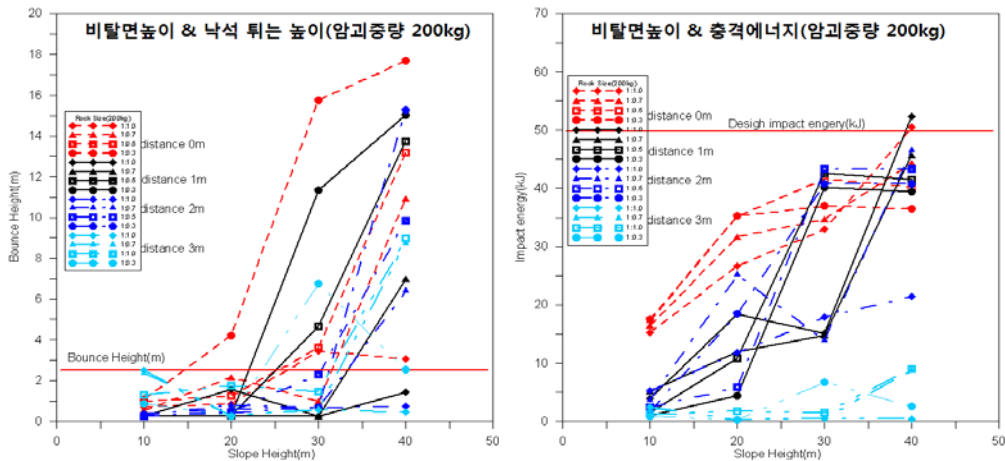


그림 3.6 암괴중량 200kg일 때의 비탈면 높이별 낙석이 튀는 높이 및 충격에너지

암괴의 중량이 400kg 정도(현행 기준)가 낙석이 되는 경우는 울타리의 이격거리가 1m 이상이 확보되고 25m 이하에서는 낙석의 도약높이에 대한 현행 울타리로 안정성이 확보될 수 있으나 25m 이상에서는 도약높이가 높아 울타리를 넘는 경우가 발생하게 된다. 그리고 충격에너지에서는 이격거리가 0m 정도인 경우는 안정성 확보가 어려우나 높이가 30m인 비탈면에서는 낙석방지울타리의 설계 충격에너지 이상으로 현행의 낙석방지 울타리로 안정성 확보가 어려운 것으로 해석되었다(그림 3.7).

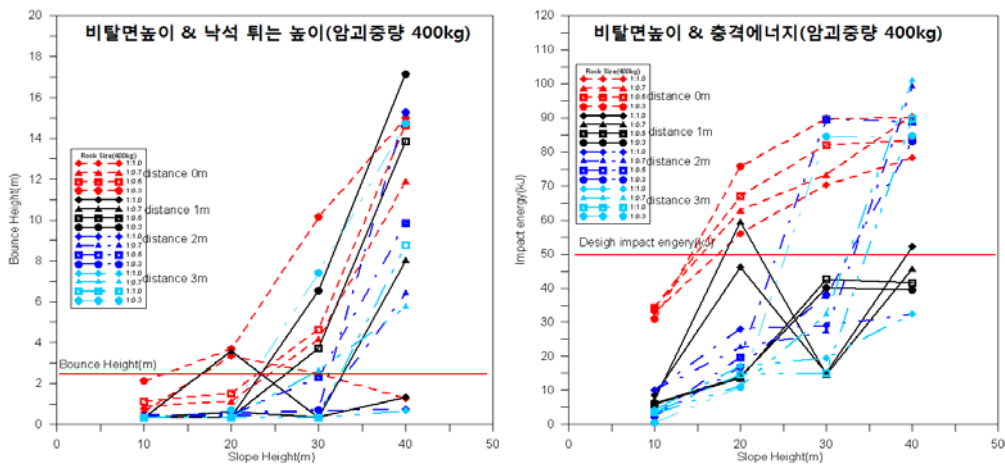


그림 3.7 암괴중량 400kg일 때의 비탈면 높이별 낙석이 튀는 높이 및 충격에너지

암괴의 중량이 800kg 정도가 낙석이 되는 경우는 울타리의 이격거리가 1m 이상이 확보되고 25m 이하에서는 낙석의 도약높이에 대한 현행 울타리로 안정성이 확보될 수 있으나 25m 이상에서는 도약높이가 높아 울타리를 넘는 경우가 발생하게 된다. 그리고 충격에너지에서는 이격거리가 0m 정도인 경우는 안정성 확보가 어려우나 높이가 15m에서는 낙석방지 울타리의 설계 충격에너지 이상으로 현행의 낙석방지 울타리로 안정성확보가 어려운 것으로 해석되었다(그림 3.8).

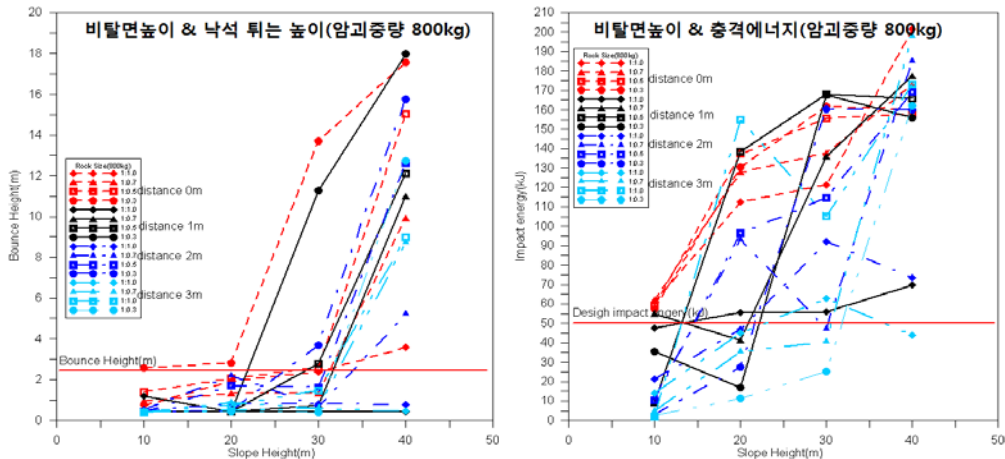


그림 3.8 암괴중량 800kg일 때의 비탈면 높이별 낙석이 튀는 높이 및 충격에너지

(2) 해석결과에 의한 낙석방지울타리 설치위치 높이

국내의 2.5m 낙석방지울타리를 적용하는 경우, 400kg 암괴가 낙석 될 때 비탈면 높이가 20m 이내의 일부를 제외하고 대부분 낙석에 대해 안정성이 확보될 수 있으나, 20m 이상인 경우, 낙석의 튀는 높이가 낙석방지울타리를 넘는 경우가 빈번한 상태이다.

그러므로 이 경우에는 20m 소단부에 낙석방지울타리를 추가하는 것이 낙석에 대한 방지 대책이 될 수 있을 것으로 판단되며 사면높이가 15m 이하이고 이격거리가 1m 이상을 확보할 수 있는 경우에는 울타리 높이를 1.5m 정도까지 낮추어 설치하여도 안정성 확보가 가능할 것으로 판단된다(표 3.2).

낙석방지울타리의 설계시는 지반조건에 따른 낙석의 안정성 검토를 실시한 후에 설치여부를 판단하여 주고, 낙석방지망이 설치되지 않는 경우에는 비탈면의 지반상태를 파악·낙석에 대한 안정성여부를 검토 한 후에 판단한다.

표 3.2 낙석방지울타리 설치위치 및 울타리 높이

이격거리		10m~15m	15m~25m	25m~30m	30m~40m	40m이상
0~1m	하부	2.5m 이상	2.5m 이상	2.5m 이상	2.5m 이상	20m 소단부에 낙석방지울타리
	소단	-	1.5m 이상	1.5m 이상	2.5m 이상	
1m 이상	하부	1.5m 이상	2.5m 이상	2.5m 이상	2.5m 이상	
	소단	-	-	1.5m 이상	2.5m 이상	

4. 결론 및 제언

- 1) 절토비탈면의 낙석방지울타리는 낙석에 대한 안정대책으로 많이 사용되어온 방법이나 국내에 사용되어온 낙석방지울타리는 비탈면의 높이나 경사, 울타리의 이격거리 등을 고려하지 않고 표준도에 의한 낙석방지울타리를 사용하고 있는 사용하고 있으나 낙석발생시 충격에너지가 작아 낙석방지울타리의 구실을 하지 못하는 경우 및 높이가 낮아 울타리를 넘는 경우가 흔하게 발생하고 있는 실정이다.
- 2) 기존의 2.5m 높이의 낙석방지울타리는 설계하중 조건인 400kg 암괴가 낙석 될 때, 비탈면 높이가 20m 이내의 일부를 제외하고 대부분 낙석에 대해 안정성이 확보될 수 있으나, 20m 이상인 경우, 낙석의 튀는 높이가 낙석방지울타리를 넘는 경우가 빈번한 상태이다.
- 3) 비탈면 높이가 30m 이상이 되는 경우, 20m 소단부에 낙석방지울타리를 추가하는 것이 낙석에 대한 방지대책이 될 수 있을 것으로 판단되며 사면높이가 15m 이하이고 이격거리가 1m 이상을 확보할 수 있는 경우에는 울타리 높이를 1.5m 정도까지 낮추어 설치하여도 안정성 확보가 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 낙석방지울타리의 설계 시는 표준도에 준하여 설계하는 방식에 탈피하여 지반조건에 따른 낙석의 안정성 검토를 실시한 후에 낙석 도약높이 및 충격에너지를 평가하여 적절한 낙석방지울타리를 설치하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
- 5) 보다 안정한 도로시설물을 만들기 위해서는 낙석에 대한 지속적인 연구를 통해 향후 낙석방지울타리의 높이 및 충격에너지에 따른 구조형식 등을 검토하여 보완하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 반석기술, 2004, 사면안정처리 (낙석방지) 설계실무편람
2. 한국도로공사, 200도로공사 전문시방서(사면안정공)
3. 건설교통부, 1989, 도로안전시설 설치편람
4. 건설교통부, 1996, 도로공사표준시방서
5. 건설교통부, 1998, 도로부대시설 표준도(배수시설, 안전시설편)
6. 한국건설기술연구원, 1998, 1999, 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(I)(II)
7. 국토해양부, 2006. 6, 건설교통부 건설공사 비탈면 설계기준, 표준시방서, 유지관리 지침, 20장 낙석방지울타리
8. 日本道路協會, 1999, 道路土工 のり面工・斜面安定工指針
9. 재단법인 철도종합기술연구소(일본), 평성 11년, 낙석대책 기술 메뉴얼
10. Richie A. M., 1963, Evaluation of rockfall and its contro, Record 17, Highway Research Board, pp 13~28.