

# 낙석방지울타리 망의 변위량 및 성능검증을 위한 실물낙석시험

## Field Test for Absorption Energy and Displacement of Rockfall Protection Net

서진혁<sup>1)</sup> · 황영철<sup>†</sup>

JinHyuk Seo · Youngcheol Hwang

Received: October 29<sup>th</sup>, 2020; Revised: November 24<sup>th</sup>, 2020; Accepted: November 27<sup>th</sup>, 2020

**ABSTRACT** : Over 60% of South Korea's land consists of mountainous topography, and recently, due to earthquakes, localized heavy rains and road development, the risks of rockfalls are getting higher. As of now, rockfall prevention facilities are being constructed in 70% of Korean roads cut slope and rockfall protections account for about 20% of them. Rockfall protection's supporting capacity is defined by combining performance of wire mesh, pillars and wire ropes. For the existing constructed rockfall protection, standards of pillars that can absorb 48~61 kJ amount of energy, wire ropes and wire mesh are presented in Guidelines for the installation and management of traffic safety facilities, Rockfall prevention facilities by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008). However, each factor's correlation of absorption energy is not presented so it is uncertain. This study will conduct vertical drop test and identify adequacy of rockfall protection net of displacement quantity calculation factor which is delta and evaluate rockfall protection net's absorbable energy through standards of overseas performance evaluation criteria.

**Keywords** : Rockfall protection, Rockfall protection net, Vertical drop test, Displacement

**요지** : 낙석방지울타리의 지지능력은 철망, 지주, 와이어로프의 성능을 합친 것으로 정의되며, 기존에 시공되고 있는 낙석방지울타리는 도로안전시설 설치 및 관리지침 중 낙석방시설 편에는 48~61kJ의 에너지를 흡수할 수 있는 지주, 와이어로프, 철망의 규격이 제시되어 있다. 그러나 흡수에너지에 대한 각 요소들의 상관관계가 명확하게 제시되어 있지 않아 불확실하다(Ministry of Land, 2008). 본 논문에서는 수직 낙하시험을 이용하여 낙석방지울타리의 성능평가 시험을 수행하던 중 복잡한 꼬임으로 이루어져 체결 조건 등이 중요한 낙석방지망이 흡수하는 에너지를 확인하기 위해 실물낙석시험을 수행하였다. 시험결과를 이용하여 낙석방지망의 변위량 산정요소인  $\delta$ 의 적절성을 판단하고 국외 성능평가 기준을 이용하여 낙석방지망의 흡수가능에너지를 평가하였다. 변위량  $\delta$ 의 경우 명시되어 있는 1/4보다 1/2로 사용하는 것이 적합하다고 판단되며, 낙석방지망은 30kJ 정도의 에너지를 흡수한다는 결과를 도출하였다.

**주요어** : 낙석방지울타리, 낙석방지망, 수직 낙하시험, 변위량

## 1. 서론

현재 국내에서는 지역균형 개발 및 사회간접자본 확충을 위한 도로의 확장과 연장으로 인해 사면을 절토하는 규모가 증가하고 있다. 또 한 최근 기상변화로 인한 강우 강도의 증가 집중 호우와 같은 자연재해, 지진 등의 발생이 증가함에 따라 낙석사고의 발생 가능성이 증가하고 있다. 이러한 낙석으로 인한 피해는 경제적 손실과 인명피해와 직접적으로 연관될 수 있어 다양한 낙석방시설물이 설치되어 있으며, 시설물의 종류에 따라 방지할 수 있는 기능이 다르므로 적절한 현장에 맞게 설치하여야 한다. 현재 낙석방지를 위해 설치되는 방시설의 종류로는 낙석방지망, 낙석방지울

타리, 낙석방지옹벽, 피암터널 등이 있으며, 보강공법은 낙석이 예상되는 대상의 발생 전 대책으로 록 앵커, 록 볼트, 숏크리트, 배수공법 등이 있다. 낙석방시설 중 낙석방지울타리는 와이어로프, 지주, 철망의 규격등이 제시되어 있으나, 상관관계가 명확하게 제시되어 있지 않다(Ministry of Land, 2008). 설계 시, 흡수에너지에 대한 설계가 우선되어야 하나 국내에는 흡수에너지를 평가할 수 있는 설계법과 시험법이 개발되어 있지 않다. 현재 절개면 혹은 낙석방지울타리에 설치되고 있는 낙석방지망은 대부분 PVC코팅망으로 저항할 수 있는 한계 에너지는 400kg 낙석 발생 시 약 28.9kJ로 명시되어 있으나, 지지능력을 발휘하지 못하는 사례가 발생함에 따라 더 높은 에너지를 흡수할 수 있는 낙석

1) Post graduate Research Student, Department of Civil Engineering, Sangji University

† Professor, Department of Civil Engineering, Sangji National University (Corresponding Author : ychwang@sangji.ac.kr)

방지망에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

본 논문에서는 낙석방지울타리의 성능을 평가하기 위해 실물낙석시험을 수행하던 중, 각 부재가 흡수하는 능력을 확인하기 위하여 낙석방지망의 성능평가시험을 수행하였다. 시험을 통해 국토교통부 지침서 중 낙석방지시설편에 명시되어 있는 철망의 변위량( $\delta$ )의 적절성을 평가하고 국내 낙석의 평균 중량인 400kg 낙석 발생 시 변위량을 통해 철망의 흡수에너지를 검증하고자 한다. 그 결과, 향후 낙석방지망의 성능을 평가 혹은 새로운 낙석방지망 개발을 위한 중요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단하였다.

## 2. 성능평가 방법 및 계산공식

### 2.1 시험성능평가 방법

현재 국내에는 낙석방지시설을 평가할 수 있는 평가방법 및 구체적인 시험법 등이 제시되어 있지 않은 상황이다. 따라서, 국외에서 가장 널리 사용되고 있는 유럽의 규정 ETAG-27의 규정을 따르고자 한다. ETAG-27의 시험 종류로는 SEL 시험과 MEL 시험이 있다. SEL 시험은 성능등급별 최대낙석에너지의 1/3 에너지로 1차 충돌시험을 실시하고, 낙석을 제거한 후 낙석방지울타리의 유지보수 없이 잔여 높이 1/2 지점에 2차 충돌을 실시한다. MEL 시험은 SEL 시험에 사용된 낙석방지울타리를 보수 혹은 새로 설치하여 성능등급별 최대낙석에너지를 사용하여 실시하는 시험이다. 측정항목은 낙석의 관통 여부, 충돌 후 망의 크기, 충돌 후 시설물의 잔여 높이 70% 이상으로 규정하고 있다. 추가적으로 충돌 후 잔여 높이를 Class A,B,C로 판정하고 판정결과를 시험 성적서에 기록하게 되어있다.

Table 1. Performance ration of rockfall protection

Type	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL	-	85	170	330	500	660	1,000	1,500	>1,500
MEL	100	250	500	1,000	1,500	2,000	3,000	4,500	>4,500

### 2.2 낙석에너지 계산공식

낙석에너지 산정을 위해서는 낙석의 크기, 절개면의 거칠기, 반발계수 등 많은 변수의 고려가 필요하다. 낙석의 중량은 낙석의 체적  $\times 2.65t/m^3$ 을 사용해 추정하며, 추정이 어려우면 국도에서 발생한 낙석 발생지점 275개소로부터 관찰된 낙석자료를 토대로 국내 낙석의 평균 중량인 400kg을 대신하여 사용할 수 있다. 낙석의 에너지는 다음 Eq. (1)과 같다.

$$E_i = \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right) \cdot (1 + \beta) \cdot m \cdot g \cdot H \quad (1)$$

$E_i$  = 낙석에너지(kJ)

$\mu$  = 낙석의 등가마찰계수

$\beta$  = 회전에너지 계수(대개 0.1을 사용함)

$m$  = 낙석의 중량(t)

$H$  = 낙석의 낙차(m)

$g$  = 중력가속도( $9.8m/s^2$ )

### 2.3 철망의 흡수에너지 계산공식

낙석방지망의 흡수에너지 계산공식은 다음 Eq. (2)와 같다. 철망의 최대 하중에서 변형량( $\delta$ )은 과거의 시험결과를 통해 대략 경간의 1/2로 고려되나, 철망의 흔들림을 감안하여 경간의 1/4로 생각한다. 또 한 철망에 발생하는 에너지는 낙석의 크기 즉, 질량에 따라 다르며, 낙석의 직경을  $D$ 로 한다면, 철망에는  $1.5D$  폭에 영향을 미친다고 생각할 수 있으므로 이것을 식으로 표현하면 Eq. (3)과 같다. Table 2는 위 식을 결과로 정리한 것을 나타내고 있다.

$$\delta = \frac{h}{4}, \tan\theta = \frac{\delta}{h/2} = \frac{1}{2} \quad (2)$$

$E_N$ 은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$E_N = 2P\sin\theta \times \delta = 0.22P \times h$$

$E_N$  = 철망의 흡수에너지

$P$  = 철망에 발생하는 인장력

$\delta$  = 철망의 변위량

$h$  = 로프 간격

$$P = 1.5D \times p$$

$p$  = 폭 1m당 철망의 강도

Table 2. Tensile force of net according to the mass of rock

Mass of rock	Diameter (m)	p (kN/m)	P (kN)	$E_N$
0.3	0.596	26.5	24.01	26.51
0.4	0.661	26.5	26.2	28.9
0.5	0.707	26.5	28.46	31.31
1.0	0.891	26.5	35.85	39.44
1.5	1.020	26.5	41.02	45.12
2.0	1.123	26.5	45.16	49.68
2.5	1.209	26.5	48.65	53.52
3.0	1.302	26.5	51.75	56.93

### 3. 실물낙석시험

#### 3.1 시험장비 및 조건

본 연구를 위해 수행된 실물낙석시험은 상지대학교 낙석 시험장에서 수행되었으며, 시험에 사용된 시험장비는 크게 낙석 볼과 크레인, 초고속 카메라로 구성된다. 낙석 볼은 콘 크리트 재질로 원형과 육면체의 중간형상으로 Fig. 1과 같이 제작하였으며, 낙석의 무게는 400kg, 단위 중량은  $2.5t/m^2$ 이다. 실물 낙석시험은 크게 사면낙석시험, 펜듈럼시험, 론칭시험, 수직 낙하시험이 있으며, 본 연구에서는 낙석의 낙하속도 및 타격 위치 조정이 용이한 수직 낙하시험을 이용하여 시험을 수행하였다. 정확한 높이 조정이 가능한 크레인을 사용하였으며, 타격 위치 제어장치를 제작하여 Fig. 2와 같이 체결한다. 낙석의 충돌 후 망의 변위측정을 위하여 초고속 촬영이 가능한 캠코더로 촬영하였으며, 제품의 사양은 Table 2와 같다. 낙석방지망은 한국도로공사 표준도에 명시된 규격을 사용하였다(Ministry of Land Transport and maritime Affairs, 2009). PVC코팅망(KS D 7018VS2 56mm  $\times$  56mm)을 사용하였고, 지주는 KS D 3030 용융 아연 알루미늄 마그네슘 합금 도금 강관으로 제작한 강재 각형강관으로



Fig. 1. Rock made from concrete



Fig. 2. Strike position control device



Fig. 3. Connection between square steel tubular column and net

로 규격은  $\square 200 \times 100 \times 4.5t$ 를 사용하였으며 지주의 휨 방지를 위해 고정대를 제작하여 지면에 부착시켰다. 본 시험은 낙석방지망의 흡수에너지를 평가하는 시험이기 때문에 지주와 와이어로프의 체결 조건이 중요하므로 Fig. 3과 같이 특수제작한 판을 이용하여 볼트와 너트로 체결하였다.

#### 3.2 시험방법

시험방법은 크게 4단계로 분류하여 시험을 진행하였으며, 순서는 다음과 같다.

- ① 각형강관 및 낙석방지망 설치
- ② 초고속 카메라 설치
- ③ 낙석 볼 낙하
- ④ 데이터 측정

위 순서로 수행하였다. 시험은 지침서에 명시된 400kg 낙석 발생 시 28.9kJ의 낙석에너지를 흡수한다고 표기되어 있다(Ministry of Land, 2008). 따라서, 25kJ과 30kJ의 에너지로 수행되었으며, 시험의 중점요소인 정확한 변위 값 측정을 위하여 카메라의 촬영 높이를 망의 높이와 동일하게 촬영하였으며, 정면과 측면에 총 2대를 설치하였다. 정확한 타격을 위해 사전에 충분한 연습을 수행하였으며, 낙석의 충돌 후 변위 값 측정을 위하여 2차원 공간에서 운동하는 물체의 위치를 분석할 수 있는 Traker 프로그램을 이용하여 낙석의 직경을 기준으로 망의 변위를 측정하였다. 시험 후 변위량  $\delta = h/4$ 와 시험을 통해 측정된 실제 변위 값과 비교 분석한다. 낙석방지망의 성능평가는 유럽 전역에서 수행되고 있는 성능평가 방법인 ETAG27의 규정을 따르고자 한다(Korea infrastructure safety corporation, 2013). 그러나 ETAG27은 낙석의 속도를 제어할 수 있는 시험장을 보유하고 있으나 국내에서는 수행하기 어려워 판정기준인 잔여 높이 70% 이상인 규정만을 따르고자 한다.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 실물낙석시험(25kJ)

실물낙석시험의 지주로 사용된 각형강관 □200×100×4.5t 사이의 거리는 3m이며, 낙석방지망인 PVC 코팅망(KS D 7018VS2 56mm×56mm)을 체결한 후 400kg 낙석을 25kJ에 해당하는 높이 6.37m에서 낙하시켰다. 시험과정은 초고속 카메라로 촬영하였으며, 촬영 후 변위 값 분석 결과 망의 최대변위는 1.339m가 생기며 낙석 정지 후 최종변위는 1.26m가 생기는 것을 확인하였다. 실험조건 중 각형강관간의 거리는 3m이므로 변위량  $\delta=h/4=0.75m$ 이다.  $\delta=h/4$ 의 경우 실제 변위량과 0.589m 약 78%정도 차이가 나는 것을 확인하였다. Fig. 4는 낙석의 거동단계 중 순간 최대변위이며, Fig. 5는 낙석 정지 후 최종변위를 나타낸 것이다.



Fig. 4. Instantaneous maximum displacement (25kJ)



Fig. 5. Final displacement (25kJ)

### 4.2 실물낙석시험(30kJ)

다음 시험 역시 25kJ과 동일한 조건인 지주로 각형강관 □200×100×4.5t와 낙석방지망인 PVC 코팅망(KS D 7018VS2 56mm×56mm)을 체결하여 30kJ에 해당하는 높이 7.65m에서 낙하시켰다. 시험과정은 초고속 카메라로 촬영하였으며,

촬영 후 변위 값 분석 결과 망의 최대변위는 1.475m가 생기며 낙석 정지 후 최종변위는 1.408m가 생기는 것을 확인하였다. 실험조건 중 각형강관간의 거리는 3m이므로 변위량  $\delta=h/4=0.75m$ 이다.  $\delta=h/4$ 의 경우 실제 변위량과 0.725m 약 103%정도 차이가 나는 것을 확인하였다. Fig. 6은 낙석의 거동단계 중 순간 최대변위이며, Fig. 7은 낙석 정지 후 최종변위를 나타낸 것이다. Table 3은 25kJ과 30kJ 시험의 변위량  $\delta$ 와 실제 변위 값을 비교한 것이다.

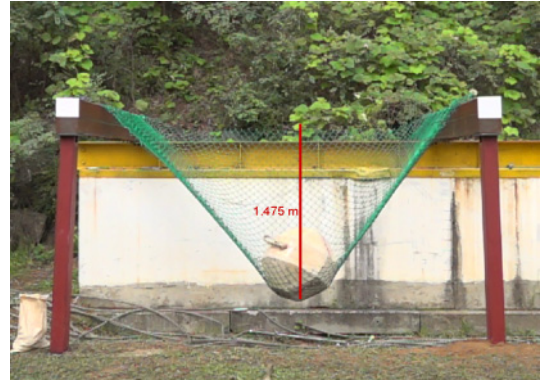


Fig. 6. Instantaneous maximum displacement (30kJ)

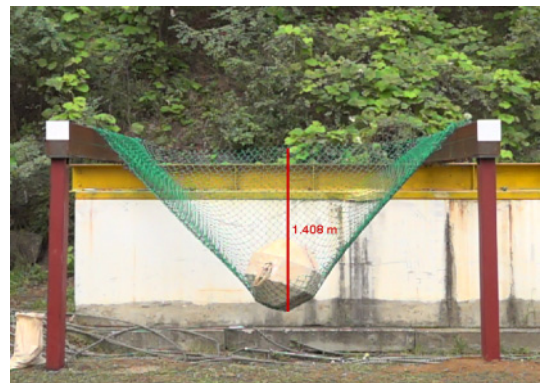


Fig. 7. Final displacement (30kJ)

Table 3. Comparison of displacement delta with actual displacement

Test	Maximum displacement (m)	$\delta=h/4$	$\delta=h/2$	Difference
25kJ	1.339	0.75	1.5	$\delta=h/4$ : 75% $\delta=h/2$ : 11%
30kJ	1.475	0.75	1.5	$\delta=h/4$ : 103% $\delta=h/2$ : 1.7%

### 4.3 시간에 따른 변위량 비교

25kJ과 30kJ의 두 시험 중 낙석방지망이 변형되는 형상을 비교해보기 위하여 변위량을 시간을 기준으로 비교하였다. Fig. 8은 두 시험을 0초에서 0.5초 사이의 낙석방지망의 최대변위 및 최종변위를 나타낸 그래프이다. 25kJ 시험의

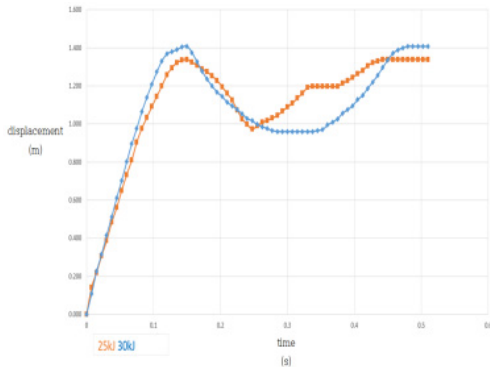


Fig. 8. Time based displacement comparison

경우 낙석이 충돌 후 최종변위까지 0.43초가 소요되었으며, 30kJ의 경우 0.48초가 소요되었다. 25kJ의 경우 낙석의 리바운드가 크게 발생하였고, 30kJ의 경우 낙석의 리바운드 발생에도 불구하고 낙석방지망의 변위는 다시 줄어들지 않는 형태를 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 국토교통부 지침서에 명시되어 있는 철망의 변위량  $\delta$ 를 검증하고 철망의 흡수에너지를 충분히 흡수하는지 검증하고자 실물 낙석시험을 수행하였다. 연구 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 실물 낙석시험을 통해 400kg 낙석을 낙석방지망에 25kJ의 에너지로 낙하시킨 결과, 순간 최대변위는 1.339m이며 낙석 정지 후 최종변위는 1.26m가 발생하는 것으로 확인되었다.
- (2) 실물 낙석시험을 통해 400kg 낙석을 낙석방지망에 30kJ의 에너지로 낙하시킨 결과, 순간 최대변위는 1.475m이며 낙석 정지 후 최종변위는 1.408m가 생기는 것을 인하였다.
- (3) 철망의 흡수에너지 계산공식 중 변위량  $\delta$ 에 의하면 철

망의 흔들거림을 감안하여  $h/4$ 로 생각한다고 명시되어 있으나 지주간의 간격을 3m로 설치하여 실물낙석시험을 수행한 결과 25kJ의 경우  $\delta=h/4$ 와 75%의 차이가 있으며,  $\delta=h/2$ 의 경우 11%의 차이가 나는 것을 확인하였고, 30kJ의 경우  $\delta=h/4$ 와 103%의 차이,  $\delta=h/2$ 의 경우 1.7%의 차이가 나는 것을 확인하였다. 두 시험 모두  $h/2$ 에 가까운 변위량이 나타나는 것을 확인하였다. 따라서, 변위량  $\delta$ 는  $h/2$ 로 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

- (4) 국토교통부지침서 낙석방지시설편 중 낙석 질량에 따른 철망의 장력을 확인하기 위해 실물낙석시험을 수행한 결과, 국외 허용 판정기준을 바탕으로 국내에서 사용 중인 PVC 코팅망의 흡수가능에너지는 30kJ 정도인 것으로 판단된다.
- (5) 따라서, 이 결과는 본 연구에서 수행한 수직 낙하시험을 바탕으로 나온 변위 값이기 때문에 다양한 시험방법을 실시하고 분석하여 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2018년도 상지대학교 교내 연구비 지원과 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(비탈면 대상 조사·점검 개선 및 보강시설 노후화 대응 기술 개발, 20SCIP-C151408-02)의 지원이 되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Korea infrastructure safety corporation (2013), Efficient design and application of slope protection facilities, pp. 93~94.
2. Ministry of Land (2008), Road safety Facility installation and management guideline for rockfall protection, pp. 1~71.
3. Ministry of Land Transport and maritime Affairs (2009), guideline for rockfall protection, pp. 4~11.