

## 신뢰성지수를 고려한 낙석방지울타리 설계기준 고찰

석재욱, 이종건\*, 김용수, 문준식

## A Study on Design Criteria of Rockfall Protection Fence Considering Reliability Index

JaeWook Suk, JongGun Lee\*, YongSoo Kim, JoonShik Moon

**Abstract** The performance criteria of rockfall protection fence and reliability index were investigated considering characteristic of rockfall energy occurred at 160 cut slopes in national highway. As a result of study on statistic of variables that decide rockfall energy using Monte-Carlo simulation, the degree of slope was normal distribution type, mass of rockfall and height of slope was lognormal distribution type. The rockfall energy follows lognormal distribution because of statistical characteristic of mass of rockfall. The reliability index of rockfall protection fence was 0.678 and the failure probability of was very high as 24.9%. Proposed performance criteria of rockfall protection fence considering the scale of domestic rockfall energy is maximum 500 kJ and the range of reliability index was from 1.028 to 1.956. the failure probability of rockfall protection fence was from 14.8 to 2.5 percent if applying the performance criteria using the reliability index.

**Key words** Rockfall protection fence, Rockfall energy, Monte-carlo simulation, Reliability index, Failure probability

**초 록** 국내 국도에 분포하는 160개 비탈면에서의 발생한 낙석에너지의 특성을 고려하여 신뢰도지수를 산정하고 낙석방지울타리의 요구성능을 고찰하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 낙석에너지를 결정하는 변수의 통계적 특성을 고찰한 결과 비탈면 경사는 정규분포형태이며, 낙석중량과 발생높이는 대수정규분포형태인 것으로 나타났다. 낙석에너지는 대수정규분포형태인 것으로 나타났으며 이는 낙석중량에 영향을 받은 결과로 판단된다. 낙석방지울타리의 신뢰성지수는 0.678이며 파괴확률은 24.9%로 매우 높은 것으로 나타났다. 국내의 낙석에너지 규모를 고려하여 제시된 낙석방지울타리의 요구성능은 최대 500kJ 수준이며 신뢰성지수의 범위는 1.028~1.956으로 분석되었다. 제시된 신뢰도지수를 통해 비탈면의 낙석에너지가 고려된 요구성능을 적용할 경우 낙석방지울타리의 파괴확률은 14.8~2.5% 수준인 것으로 분석되었다.

**핵심어** 낙석방지울타리, 낙석에너지, 몬테카를로 시뮬레이션, 신뢰도지수, 파괴확률

## 1. 서 론

국내에 분포하는 비탈면은 산업 및 도시의 발달에 의해 지속적으로 증가하여 현재 일반국도와 고속국도 상에 약 37,000여 개소가 분포하고 있다. 최근 정부에 의

한 체계적인 관리로 인해 붕괴사례는 지속적으로 감소하고 있으나 기상이변과 같은 위험요인의 불확실성에 의해 낙석과 같이 비탈면에서 발생할 수 있는 위험은 항상 존재하고 있다.

비탈면에서 발생하는 낙석에 대비한 낙석방지시설은 전체 위험절개면 대책공법 중 70% 이상을 차지하고 있으며 이중 낙석방지울타리는 약 20% 정도를 차지하고 있다(KICT, 1999). 현재 낙석방지울타리의 성능 기준은 국도용 낙석방지울타리(국토교통부, 2008a)와 고속도로용 낙석방지울타리(국토교통부, 2008a)에서 50 kJ 정도의 낙석에너지를 방호할 수 있는 수준으로 제시되어 있다. 이 기준은 하중 3.92 kN인 암괴가 12.5 m의

**Received:** Jun. 25, 2014

**Revised:** Jun. 22, 2014

**Accepted:** Jun. 22, 2014

**\*Corresponding Author:** JongGun Lee

Tel) +82319104292, Fax) +82319104181

E-Mail) gun5f@kistec.or.kr

Korea Infrastructure Safety Coporation 315, Goyang-Daero, Ilsanseo-Gu, Goyang-City, Gyeonggi-Do 411-758, Korea

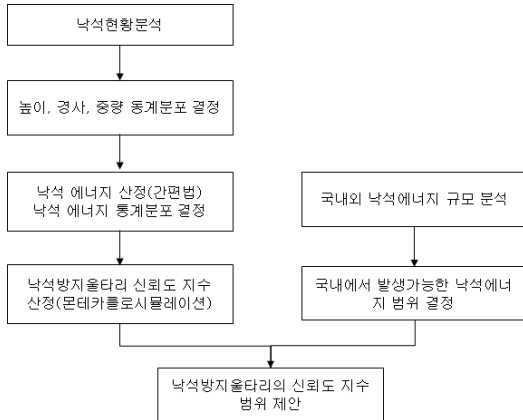


Fig. 1. Flow chart

높이에서 낙석될 때의 에너지를 표현한 것이다. 그러나 이 기준은 국외의 성능기준을 인용한 것으로 국내에서 발생하는 낙석의 특성을 고려하지 않아 많은 연구자들에 의해 개선의 필요성이 언급되었다. 이와 관련된 연구는 크게 낙석에너지 규모와 낙석방지울타리 성능에 관한 연구로 나누어진다. 낙석에너지에 관한 연구로는 국내 도로에서 발생한 붕괴사례를 통해 낙석에너지의 규모를 예측하고(Bae et al., 2002), 낙석에너지 현장시험을 통해 낙석방지울타리의 성능을 제시하는 연구가 수행되었다(Koo et al.,2001).

낙석방지울타리의 성능과 관련해서는 현장시험과 시뮬레이션 등의 다양한 방법을 통하여 연구가 진행되었으며(Kim, 2010 ; You et al., 2011, Koo et al., 2001), 최근에는 낙석방지울타리의 성능평가 방법 및 개선방안에 대한 연구가 수행되어졌다(Moon, 2013).

이 연구에서는 낙석방지울타리 성능의 기준 제시를 위해 고려되어야 할 낙석규모의 특성에 대하여 고찰하였다. 낙석에너지의 특성을 분석하기 위해 2010~2012년간 국도 상에서 발생한 낙석의 규모, 사면현황 및 울타리 파손 유무 등을 분석하였다. 또한 현장조사결과와 기존연구에 의해 규명된 낙석에너지의 특성을 고려하여 신뢰도지수를 산정하고 낙석방지울타리의 요구성능 범위를 제시하고자 하였다(Fig. 1).

2. 낙석발생 현황

경기일부, 경남, 경북, 강원도 내 국도 인근에 분포하는 160개의 깎기비탈면에서 최근 3년간 발생한 낙석사례를 분석하였다. 조사된 비탈면은 화성암, 퇴적암, 변성암 등 다양한 암종으로 구성되어 있다. 비탈면에서 암

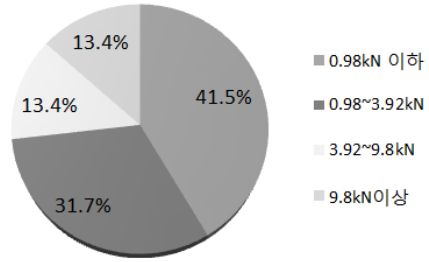


Fig. 2. Distribution of rockfall weight

반이 탈락하여 발생한 낙석의 발생 높이, 발생 위치의 경사, 울타리 손상여부, 규모 등을 조사하였다. 소규모의 낙석 더미 혹은 토사유출의 경우는 에너지를 산정하기 위한 충분한 정보가 확보되지 않아 본 연구범위에서는 제외하였다. 조사된 낙석 발생 평균 높이는 15.6 m이며 평균 비탈면 경사는 약 55°이다. 낙석에너지에 가장 큰 영향을 미치는 낙석 무게의 분포를 검토한 결과 평균 무게는 약 428 kN이며, 0.98 kN 이하 및 0.98~3.92 kN의 규모가 73.2%의 빈도를 보이는 것으로 나타났다. 3.92 kN 이상인 낙석은 약 26%의 빈도를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 2).

3. 낙석에너지 통계분포

낙석은 비탈면에서 분리된 암편이 중력에 의해 비탈면을 따라 운동하는 것을 의미하며 에너지로 규모를 표현한다. 국내에서 주로 활용되는 낙석에너지 산정방법으로는 상용프로그램인 ‘ROCKFALL’ 및 일본도로협회에서 제안한 간편식 등이 있다. ‘ROCKFALL’은 낙석에너지에 영향을 줄 수 있는 다양한 변수를 고려할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면 변수의 산정에 많은 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다(Koo, et al., 2001). 이 연구에서는 간편식을 사용하여 낙석에너지를 산정하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$E_i = (1 - \frac{\mu}{\tan\theta}) \times (1 + \beta) \times m \times g \times H \tag{1}$$

여기서,  $E_i$  = 낙석에너지(kJ),  $\theta$  = 절리면의 경사도,  $\mu$ =낙석의 등가마찰계수,  $\beta$  = 회전에너지계수(0.1),  $m$  = 낙석의 중량(t),  $H$  = 낙석의 높이(m),  $g$  = 중력가속도(9.8 m/s<sup>2</sup>)

등가마찰계수와 회전에너지계수는 상수로서 각각 0.15와 0.1을 적용하였다. 따라서 낙석에너지를 결정하는

**Table 1.** Summary statistics of the random variable obtained from MCS

	Distribution	Parameters
Degree of slope (°)	Normal	Mean 54.55 Std. Dev. 9.29
Height (m)	Lognormal	Mean 15.00 Std. Dev. 8.38
Mass (ton)	Lognormal	Mean 0.60 Std. Dev. 2.88

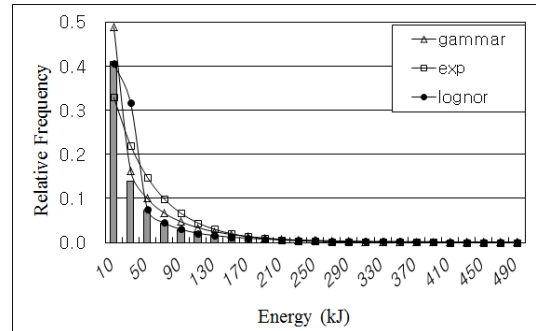
변수는 경사도, 중량, 높이이다.

160개소의 비탈면에서 획득된 자료를 바탕으로 보다 신뢰성있는 표본을 산출하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션(MCS, Monte Carlo simulation)을 수행하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 상태함수 계산시 사용되는 확률변수에 대한 정확한 정보, 즉 확률분포, 평균, 표준편차 등이 제공되기 때문에 확률론적 해석기법 중 유효한 방법으로 알려져 있다(Harr, 1987; Li and Lo, 1993 and Vaecher and Christian, 2003 ; Park et al., 2010). 이와 같은 특징에 의해 지반 및 암반분야에서도 MCS를 활용한 연구가 활발히 진행중이다(Lee et al., 2005; Choi and Chung, 2004, Park, 2010). MCS를 위한 확률변수는 낙석발생높이, 낙석크기, 절리면의 경사로 결정하고 각각에 대한 통계분포형태를 규정하였다. 확률변수에 대한 분포함수를 파악한 결과 사면의 경사는 정규분포(평균 54.55, 표준편차 9.29), 높이는 대수정규분포(평균 15.00, 표준편차 8.38) 낙석크기는 대수정규분포(평균 0.6, 표준편차 2.88) 형태인 것으로 분석되었다(Table 1).

MCS의 상태함수는 식 (1)을 사용하였으며, 전 분포 영역에 걸쳐 치우침이 없이 효율적인 표본추출을 위해 LHS(Latin Hypercube Sampling)를 사용하여 낙석에너지 10,000회 샘플링하였다.

최근 연구에서 낙석 성능등급을 결정하기 위하여 낙석에너지를 감마분포곡선으로 간주한 바 있다(Moon, 2013). 이 연구에서는 MCS를 통해 산출된 낙석에너지의 히스토그램을 통해 분포형태가 가장 유사한 것으로 여겨지는 감마분포, 지수분포, 대수정규분포에 대하여 K-S검정을 수행하였다. 낙석에너지는 대수정규분포(평균 85.55, 표준편차 360.55)로 분석되었다(Fig. 3, Table 2). 이는 확률변수 중 대수정규분포 형태로 나타나는 낙석크기에 영향을 받은 것으로써 모든 낙석에너지가 음의 값을 가질 수 없다는 점에서 대수정규분포 형태로 표현하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

MCS에 의해 산정된 낙석에너지 중 현재 낙석방지울타리의 설계기준인 50 kJ보다 높은 낙석에너지는 약

**Fig. 3.** Histogram of Rockfall Energy**Table 2.** Summary statistics of the rockfall energy obtained from MCS

Distribution	parameter	K-Sstat.	p-value
exponential	$\lambda=0.02$	0.2304	> 0.2
Gamma	$\mu=2.7$ $\alpha=1.67$	0.0890	> 0.2
Lognormal	$\alpha=0.521$ $\beta=85.49$	0.0185	> 0.2

Note : K-Sstat=Kolmogorov-Smirnov goodness-of fit statistics. A minimum P value of 0.05 is required to accept the probability distribution.

26%의 발생확률을 가지는 것으로 분석되었다. 따라서 이를 반영한 낙석방지울타리의 요구성능이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4. 신뢰성 지수(Reliability Index)

최근 구조물 설계를 위해 신뢰성이론을 사용한 새로운 설계기준이 사용되고 있다. 신뢰성이론은 신뢰성지수(reliability index ;  $\beta$ )를 구조물에 적용함으로써 강도와 하중의 가변성에 상관없이 요구되는 파괴확률을 갖도록 하는 것이다. 신뢰성지수는 공학적인 문제에서 필연적으로 발생하는 불확실성을 정량적으로 고려하여 파손가능성을 확률로서 제시하는 방법으로 안전율과 더불어 구조물의 안정성을 의미하는 지표로 활용되며 일반적으로 양의 값이면 안정한 상태를 의미한다(Hasofer and Lind, 1974).

이 연구에서는 발생 가능한 모든 낙석규모로부터 설계 목적상의 기능을 유지하여 낙석이 도로로 유입되지 않고 안정성을 확보할 수 있는 확률을 낙석방지울타리의 신뢰성으로 정의하고 이를 위해 울타리 한계상태의 파괴확률을 정량적으로 제시하고자 “신뢰성 지수”를 적용하였다.

신뢰성지수법은 무작위변수(Random Variables)의 확률분포함수를 단순화하기 위해서 Comell(1969)에 의해 처음 제안되었으며 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (2)$$

여기서,  $\beta$  = 신뢰성지수,  $\mu_z$  = 무작위변수 Z의 평균값,  $\sigma_z$  = 무작위변수 Z의 표준편차

낙석에너지와 같이 확률분포가 대수정규 형태인 경우는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = \frac{\lambda}{\sigma} = \frac{\ln \left[ \frac{\mu}{\sqrt{1+V^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1+V^2)}} \quad (3)$$

여기서  $\beta$  : 신뢰성 지수,  $\mu$  : 안전영역의 평균,  $V$  : 안전영역의 C.O.V

### 5. 낙석울타리의 신뢰성 지수 산정

신뢰성 해석을 수행하기 위한 구조물의 안전(success)과 파괴(failure)를 판단할 수 있는 안전여유 Z(margin of safety)는 구조물에 가해지는 하중요소(load factor) L과 그에 저항하는 구조물의 저항요소(resistance factor) R로 다음과 같이 표현된다.

$$Z = R - L \quad (4)$$

여기서  $R > L$ 이면 구조물이 안전한 경우이고  $R < L$ 이면 구조물의 파괴가 발생한 경우이다.  $Z = 0$  인 경우는 구조물의 안전과 파괴의 경계를 의미한다.

현재 시설된 낙석방지울타리의 안전여유는 설계기준인 50 kJ을 저항요소(R)로 하고 낙석방지울타리에 가해지는 낙석에너지를 하중요소(L)로 하여 산정가능하다.

신뢰성지수는 낙석방지울타리의 파괴확률을 대변하는 값으로서, 낙석에너지를 결정하는 비탈면의 지반공학적 특성을 고려하여 낙석방지울타리의 목표 신뢰성지수가 제시되어야 한다.

Fig. 4에서 Z의 평균인  $m_z$ 로부터 파괴영역까지 떨어진 거리( $Z=0$ )는 Z의 표준편차인  $\sigma_z$ 와 신뢰지수  $\beta$ 의 곱으로 표시된다(식 5). 여기서 신뢰지수  $\beta$ 는 Z 확률밀도함수의 중심에서 파괴영역까지 거리  $m_z$ 를 Z의 표준편차  $\sigma_z$ 로 정규화하여 표현한 것이며 이것은 구조물의 안

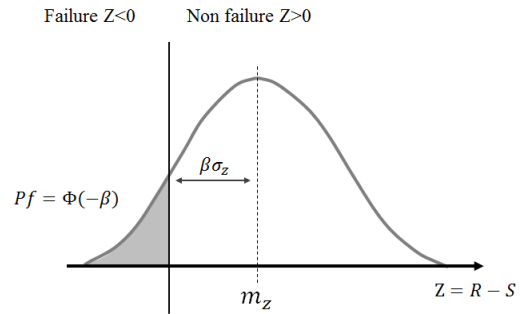


Fig. 4. Reliability index

전도를 나타내는 지수로 사용한다. 즉 Fig. 4에서 신뢰지수  $\beta$ 가 커질수록 시스템의 파괴확률은 더 작아지게 된다.

$$Z = m_z - \beta \sigma_z = 0 \quad \text{즉,} \quad \beta = m_z / \sigma_z \quad (5)$$

$$m_z = m_r - m_s \quad (6)$$

$$\beta = (m_r - m_s) / \sigma_z \quad (7)$$

여기서,  $\beta$  : 신뢰지수,  $m_r$  : 저항항의 평균,  $m_s$  : 하중항의 평균,  $\sigma_z$  : Z의 표준편차

낙석방지울타리의 신뢰지수를 산정하기 위해 낙석에너지의 안전여유 Z를 산정하였다. 낙석에너지의 통계분포가 대수정규분포로 나타남에 따라 이를 정규분포 형태로 표현하여 안전여유를 산정하였다.

$$Z = \ln 50 - \ln E_i \quad (8)$$

표본추출을 위해 식 (8)을 상태함수로 정의하고 낙석크기, 비탈면 경사, 높이를 확률변수로 정의하여 MCS를 수행하였다. 총 50,000회의 걸친 표본 산출을 통한 안전영역 분포 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 50 kJ의 설계기준에 의해 설치된 낙석방지울타리의 신뢰성지수는 0.678으로 산정되었으며 파괴확률은 24.9%인 것으로 나타났다. 설계기준을 500 kJ로 가정하여 산정된 낙석방지울타리의 안전영역 분포 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 파괴확률을 약 2.6%이며 신뢰성지수는 1.956으로 산정되었다.

일반적으로 설계하중을 결정하기 위해 신뢰성지수는 3(파괴확률 0.1%), 1.96(5%), 1.28(10%)을 사용하는 것으로 알려져 있다(Kevin, 2000). 그러나 현재 국내에서 낙석방지울타리의 설계하중 결정과 관련된 자료가 매우

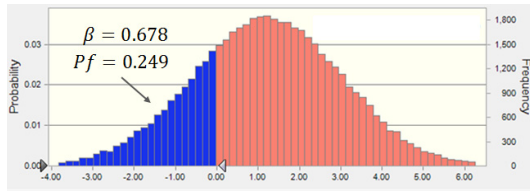


Fig. 5. PDF for resistance force 50 kJ

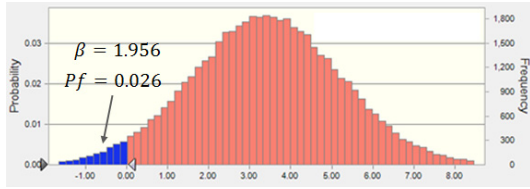


Fig. 6. PDF for resistance force 500 kJ

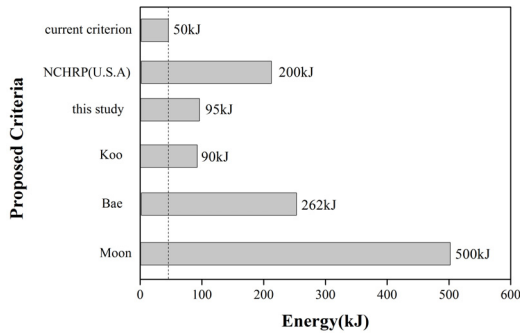


Fig. 7. Proposed criteria

부족하여 신뢰성지수 기준을 제시하기에는 어려움이 따른다. 따라서 이 연구에서는 낙석규모에 대한 기존 연

구자료를 활용하여 낙석방지울타리가 보유해야하는 신뢰성지수의 범위를 제시하고자 하였다.

160개 비탈면에서 도출된 평균낙석에너지는 약 95 kJ이다. Koo et al.(2001)는 국내 국도 주변의 낙석 발생 지점 275개소의 낙석 평균규모(0.4톤)로부터 낙석방지울타리의 흡수가능 에너지가 90 kJ 정도가 필요하다고 제안하였다. Bae(2002)는 국내에 발생가능한 최대 에너지가 약 1200 kJ이고 평균이 262 kJ로 분석하였다

Moon(2013)에 의하면 낙석 발생확률은 500kJ 이하에서 80%이상 집중되어 있는 것으로 보고하였다. 또한 미국의 NCHRP report 20-07(TRB, 2003)은 낙석의 무게 3920 kN 기준으로 약 250 kJ을 낙석방지 울타리의 기준흡수가능에너지로 제시하고 있다(Fig. 7).

기존 연구에 의한 낙석에너지의 규모를 살펴보면 대부분 현재의 설계기준인 50 kJ을 상회하고 있으며, 연구결과에 따라 매우 큰 편차를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 낙석 발생 지역의 암종, 지반상태, 조사방법 및 낙석에너지의 산정방법 등의 차이에 의한 것으로 향후 이와 관련된 연구가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

낙석방지울타리의 신뢰도지수를 산정하기 위한 저항요소 R은 현재 설계기준인 50 kJ부터 가장 높은 500 kJ까지 등간격으로 적용하였으며 기존 연구결과에 의한 낙석에너지 규모를 반영하여 100~500 kJ에 대한 신뢰도지수를 검토하였다(Fig. 8). 설계기준에 따른 안전여유의 평균, 표준편차, C.O.V 및 그에 따른 신뢰도지수와 파괴확률을 Table 4에 나타내었다. 이 때 활용된 낙석에너지의 통계특성은 이 연구에서 활용한 160개의 비탈면 낙석발생 데이터를 반영하였다.

신뢰도지수  $\beta$ 는 1.044~1.956의 범위에서 결정될 수 있으며 이 때의 파괴확률은 2.5~14.8% 수준인 것으로

Table 3. The statistic result according to resistance factors

Resistance factor R	Means of Z	Standard deviation	C.O.V	Reliability index	Failure Probability	Failure Probability by MCS
50	1.22	1.80	1.475	0.678	0.249	0.251
100	1.89	1.81	0.958	1.044	0.148	0.147
150	2.32	1.79	0.772	1.296	0.097	0.099
200	2.61	1.81	0.693	1.442	0.075	0.073
250	2.82	1.8	0.638	1.567	0.059	0.060
300	3.00	1.79	0.597	1.676	0.047	0.048
350	3.17	1.79	0.565	1.771	0.038	0.038
400	3.29	1.8	0.547	1.828	0.034	0.034
450	3.41	1.8	0.528	1.894	0.029	0.029
500	3.52	1.8	0.511	1.956	0.025	0.026

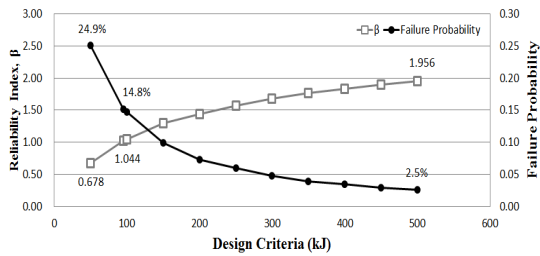


Fig. 8. Reliability index for Design criteria

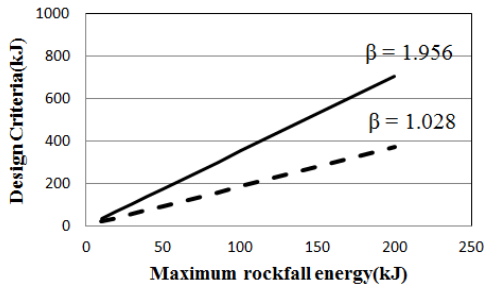


Fig. 9. Reliability index for Design Criteria

나타났다.

신뢰도지수  $\beta$ 가 각각 1.956, 1.028일 경우 최대낙석에너지 규모와 그에 따른 낙석방지울타리의 설계기준을 Fig. 9에 도시하였다. 이 도표를 통해 비탈면에서 예상되는 낙석에너지 규모에 따라 낙석방지울타리의 요구성능을 결정할 수 있다. 제시된 신뢰도지수는 기존 연구결과에 의해 국내에서 분포하는 낙석에너지 규모를 반영한 것으로 낙석방지 울타리의 파괴확률이 14.8~2.5% 수준으로 설계됨을 의미한다. 비탈면에서 발생하는 낙석에너지의 범위는 비탈면의 상태에 따라 큰 편차를 가지고 있으므로 낙석방지울타리의 설계기준은 이를 고려하여 결정되어야 하며 이 연구에서 제시한 신뢰도지수는 설계기준의 결정을 위한 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 제언

국내 국도에 분포하는 160개 비탈면에서의 발생한 낙석에너지의 특성을 고려하여 신뢰도지수를 산정하고 낙석방지울타리의 요구성능을 고찰하였다. 상기 과정을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 낙석에너지를 결정하는 변수의 통계적 특성을 고찰한 결과 비탈면 경

사는 정규분포형태이며, 낙석중량과 발생높이는 대수정규분포형태인 것으로 나타났다. 낙석에너지는 대수정규분포형태인 것으로 나타났으며 이는 낙석중량에 영향을 받은 결과로 판단된다.

2. 낙석방지울타리의 신뢰성지수는 0.678이며 파괴확률은 24.9%로 매우 높은 것으로 나타났다. 국내의 낙석에너지 규모를 고려하여 제시된 낙석방지울타리의 요구성능은 최대 500 kJ 수준이며 이를 고려한 신뢰성지수의 범위는 1.028~1.956으로 분석되었다. 제시된 신뢰도지수를 통해 비탈면의 낙석에너지가 고려된 설계기준을 결정할 경우 낙석방지울타리의 파괴확률은 14.8~2.5% 수준으로 분석되었다.
3. 이 연구에서 산정한 낙석에너지는 현장의 지형적 조건을 고려하지 않은 것으로 향후 이격거리 및 낙석에너지 저항 등을 고려한 연구결과가 수행된다면 보다 체계적인 설계기준 제시방법이 될 수 있을 것으로 예상된다.

## Reference

1. 국토해양부, 2008, 도로안전시설 설치 및 관리지침 통합편, 낙석방지시설편
2. Baecher, G.B and Christian, J.T., 2003, Reliability and statistics in geotechnical engineering, John Wiley and Sons, pp. 605.
3. Bae, G. J., Koo, H. B. and Back, Y. 2002, Study on suggestion a standard installation for damage reduction alarm system using cut-slope data, J. of engineering geology, Vol. 12, No. 1, pp. 53-61.
4. Choi, S. O. and Chung, S. K., 2004, Assessment of RMR with the Monte Carlo Simulation and Stability Analysis of Rock Slopes, Tunnel & Underground Space, Vol. 14, No. 2, pp. 97-107.
5. Cornell, C. A. 1969, A Probability-based structural code, Journal Proceedings, Vol 66, No. 12, pp. 974-985.
6. Hasofer, A.M., and N.C. Lind, 1974, Exact and invariant second moment code format, J. of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 100, No. EM1, pp.111-121.
7. Kevin C., 2000, Reliability of Structures 624, McGraw-Hill, pp. 45.
8. Kim, K. S., 2010, Contemplation of rockfall simulation parameters and design of rockfall fence, Geo-environmental and slope stability conference 2010, pp. 344-350.
9. Koo, H. B., Park, H. J. and Paik, Y. S., 2001, Characteristics and energy absorbing capacity for rockfall protection fence from in-situ rockfall tests, Geotechnical engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 111-121.
10. Korea institute of construction technology, 1999, Development and operation of road cut-slope management system, Ministry of Construction & Transportation.
11. Lee, S. E., Jun, S. K. and Kang, S. J., 2005, A Study



- on the Uncertainty of the Classification of Rock Mass Rating, Tunnel & Underground space, Vol. 15, No. 6, pp. 441-451.
12. Moon, B. K. 2013, Performance assessment and improvement scheme for domestic rockfall barriers, A doctoral dissertation KongJu Univ.
  13. Park, S. W. and Park. H. J., 2010, Probabilistic stability and sensitivity analysis for a failed rock slope using a Monte carlo simulation, J. of engineering geology, Vol. 20, No. 4, pp. 437-447.
  14. Park, S. W., 2010, Probabilistic Analysis of rock slope stability using terrestrial LiDAR data, A doctoral dissertation SeJong-Univ.
  15. You, B. O., Han, W. J., Lee, S. D. and Shim, J. W., 2011, A study on bounce height and impact energy considering slope height, rockfall weight using rockfall program, Korea geo-environmental society, Vol. 12, No. 3, pp. 47-54.
  16. Li, K.S and Lo, C.R, 1993, Probabilistic methods in geotechnical engineering, Balkema A.A., pp.333.

**석재욱**



2006년 부경대학교 환경해양대학 환경  
탐사공학과 공학사  
2008년 부경대학교 대학원 에너지자원  
공학과 공학석사  
2013년 부경대학교 대학원 에너지자원  
공학과 공학박사

Tel: 031-910-3648  
E-mail: stonely@kistec.or.kr  
현재 한국시설안전공단 시설안전연구소  
선임연구원

**김용수**



1993년 중앙대학교 토목공학과 공학사  
1995년 중앙대학교 토목공학과 석사  
2002년 중앙대학교 토목공학과 박사

Tel: 031-910-4257  
E-mail: yskim@kistec.or.kr  
현재 한국시설안전공단 시설안전연구소  
수석연구원

**이종건**



2005년 경북대학교 지질학과 공학사  
2007년 경북대학교 대학원 지질학과  
이학석사

Tel: 031-910-4292  
E-mail: gun5f@kistec.or.kr  
현재 한국시설안전공단 시설안전연구소  
선임연구원

**문준식**



1996년 연세대학교 토목공학과 공학사  
1998년 연세대학교 토목공학과 석사  
2007년 Univ. of Illinois at Urbana-  
Champaign 박사

Tel: 053-950-7563  
E-mail: j.moon@knu.ac.kr  
현재 경북대학교 토목공학과 교수