

## 울릉도 화산암류의 낙석 규모 및 거동 분석

문기봉<sup>1</sup> · 유영민<sup>2</sup> · 윤현석<sup>1</sup> · 서영호<sup>3</sup> · 서용석<sup>1\*</sup> · 백 용<sup>4</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>평화지오택(주), <sup>3</sup>현대건설주식회사, <sup>4</sup>한국건설기술연구원

### Analysis of Magnitude and Behavior of Rockfall for Volcanic Rocks in Ulleung-Do

Gi-Bong Moon<sup>1</sup>, Young-Min You<sup>2</sup>, Hyun-Seok Yun<sup>1</sup>, Young-Ho Suh<sup>3</sup>,  
Yong-Seok Seo<sup>1\*</sup>, and Yong Baek<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

<sup>2</sup>Pyonghwa Geotec Co. Ltd.

<sup>3</sup>Hyundai Engineering & Construction

<sup>4</sup>Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

Received 14 August 2014; received in revised form 29 August 2014; accepted 1 September 2014

낙석은 형상, 체적 및 중량 등 그 규모를 예측하기 어렵고 비탈면의 높이 및 경사 등 기하학적 형상 등에 따라 불규칙적인 거동을 보인다. 본 연구에서는 해안도로를 따라 낙석이 빈번하게 발생하는 울릉도의 비탈면을 대상으로 현장조사를 수행하여 낙석의 유형을 분류하고 규모를 산정하였다. 또한 시뮬레이션 기법을 적용하여 도로에 영향을 미치는 낙석의 거동을 분석하였다. 연구지역에 분포하는 집괴암과 조면암질암은 각각 탈락형과 바리형의 낙석 유형을 보이며, 낙석의 규모는 조면암질암이 집괴암에 비해 상대적으로 2~3배 크게 분포하는 것으로 나타났다. 시뮬레이션을 이용한 낙석의 거동을 분석한 결과, 도로에 작용하는 충격 에너지가 표준 낙석방지울타리의 흡수 가능 운동에너지의 범위를 초과하여 고강도특수망을 적용할 경우 안정성이 확보되는 것으로 나타났다.

**주요어** : 화산탄, 조면암질암, 낙석 규모, 시뮬레이션, 방호대책공

It is difficult to predict the magnitude of a rockfall with respect to the shape, volume, and weight of the rock mass, as a rockfall exhibits erratic behavior that depends on the slope geometry, such as the height and dip of the slope. In this study, a field survey was conducted on the slopes of Ulleung-Do, South Korea, where rockfalls frequently occur along coastal roads, to classify the mode of rockfalls and estimate their magnitude. This study also analyzed the effects of rockfall behavior on roads by applying a simulation technique. Agglomerate and trachytic rocks distributed across the study area produce rockfalls in a differential weathering rockfall mode and a toppling rockfall mode. In terms of rockfall weight, trachytic rockfalls were 2-3 times heavier than agglomerate rockfalls. An analysis of rockfall behavior from the simulation indicates that the impact energy on the road exceeded the absorbing energy of a standard rockfall protection fence; however, the rockfall was secured when a ring-net was applied.

**Key words** : volcanic bomb, trachytic rock, rockfall magnitude, simulation, protection measure

\*Corresponding author: ysseo@cnu.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

낙석은 일반적으로 암반 내 분포하는 불연속면의 이완으로 암편 및 암석이 암반과 분리되어 중력방향으로 낙하하는 현상을 말한다. 낙석의 원인은 지질학적 요인인 절리, 단층 및 층리 등과 같은 불연속면이 잘 발달하는 암반에서 장기간에 걸친 풍화나 지하수 등의 영향으로 저항력이 저하되거나, 비탈면 깎기, 발파 작업 등으로 응력의 균형이 무너지면 발생한다. 낙석은 비탈면의 경사에 따라 자유낙하(free falling), 도약(bouncing), 회전(rolling), 미끄러짐(sliding)과 같은 여러 운동 형태로 발생하고(Ritchie, 1963), 낙석의 형상 및 규모가 다양하며, 높이, 경사, 요철, 식생 등 비탈면의 특성에 따라 불규칙한 거동을 보이기 때문에 낙석의 거동을 예측하는 것은 어렵다. 이러한 이유로 낙석에 대한 방호대책 설계는 해당 현장에서 직접 시험을 수행하여 이루어져야 하지만, 다양한 상황에 대한 현장시험의 수행이 실질적으로 어렵고 최적화된 예측이 쉽지 않다. 따라서 최근에는 현장의 지질학적, 지형학적 특성을 반영한 시뮬레이션 기법을 통하여 낙석거동 분석을 수행하고 이를 방호대책 설계에 반영하고 있다(Rhee et al., 2004; Cho and Kim, 2010; Kim, 2010; You et al., 2011).

본 연구에서는 낙석에 대한 방호대책 설계를 수행하기 위하여 일주도로 건설공사가 계획된 울릉도 동북부의 약 4.7km 구간에 위치하는 비탈면을 대상으로 화산암의 지질학적 및 불연속면 발달 특성을 조사하여 낙석의 규모를 산정하였으며, 주요 위험 비탈면 11개 구간을 선정하여 낙석 시뮬레이션을 이용한 거동분석을 실시하여 낙석유형을 분류하고, 도달거리 및 충격에너지 등을 계산하였다.

## 연구지역의 지질

울릉도는 신생대 제3기 말인 플라이오세에서 제4기 홀로세까지의 활동에 의해 형성된 중상화산섬으로(Jin et al., 2005), 해저산체를 이루고 있는 현무암과 그 위를 덮고 있는 조면암, 안산암, 응회암 등으로 구성되어 있다. 연구 지역은 해안선을 따라 현무암질 집괴암층이 분포하고, 그 상부에 조면암 또는 조면암질 집괴암으로 구성된 조면암류가 급경사를 이루고 있으며, 최상부에 후기의 조면암질 미고결 분출물 층이 넓은 지역을 덮고 있다(Fig. 1). 조면암은 점성이 큰 분출암으로서 괴상의 암주상으로 잘 나타난다. 이와는 달리 집괴암 내에는 현

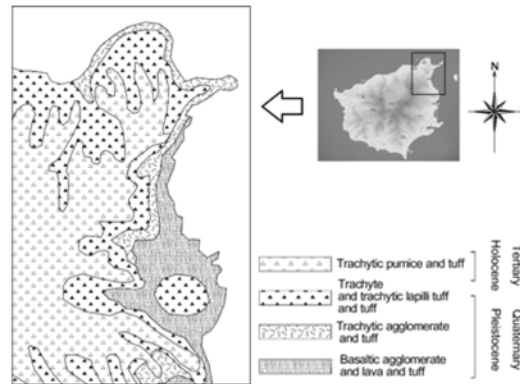


Fig. 1. Geologic map of the Ulleung-Do study area (modified after Kim and Kim, 1977).

무암질 또는 조면암질 각력 및 화산탄들과 응회질 물질들이 포함되어 있기 때문에(Song et al., 2006) 상대적으로 풍화에 약하여 잘 부서지며 주로 화산암괴나 화산탄들이 낙석 물질로 나타난다.

## 연구지역의 낙석

### 낙석의 유형

울릉도 해안가에는 30~60m 높이의 가파른 절벽이 많이 분포하며, 서남 및 동남 해안은 90m에 이르는 절벽이 발달하고 있어 호우시 해안도로 내 낙석 및 붕괴 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 최근 10여 년간 언론에 보도된 울릉도 내의 낙석 및 암반 붕괴 사례를 살펴보면 약 75%가 해안도로에 위치하고 있다. 이러한 이유로 Seo et al. (2012)는 울릉도의 해안가에 위치하는 27개 비탈면을 대상으로 낙석의 위험도를 평가하여 낙석재해 위험도를 작성한 바 있다.

연구지역에서 나타나는 낙석의 유형은 Japan Road Association (JARA, 2000)이 제시한 유형 중 크게 탈락(전석)형과 박리(부석)형으로 구분된다. 먼저 주로 단구 및 화산 쇄설암 등에서 나타나는 탈락형 낙석(Fig. 2a,b)은 비교적 강도가 높은 역, 화산탄 등을 함유한 부분과 저고결의 기질부로 구성된다. 연구지역 내 분포하는 집괴암 내지 각력질 응회암은 탈락형 낙석에 해당하는 것으로 절리가 발달하지 않은 괴상의 암체로 비탈면을 형성하고 있으며, 풍화 및 침식에 매우 취약한 미고결 상태의 화산회가 기질부를 형성하고, 직경 10~20cm의 타원체에 가까운 화산암괴와 화산탄을 포함하고 있다. 두 번째로 박리형 낙석(Fig. 2c,d)은 주로 절리에 지

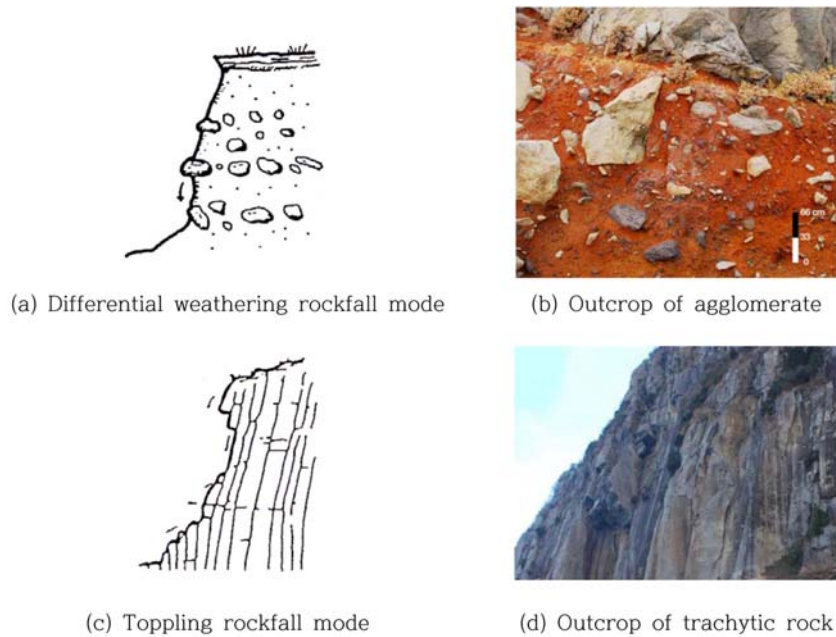


Fig. 2. Rockfall modes and outcrops observed at Ulleung-Do (Seo et al., 2012).

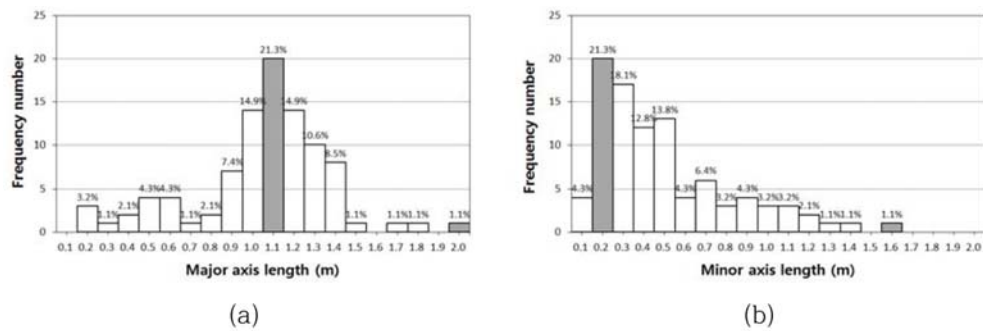


Fig. 3. Distribution of the lengths of major and minor axis of volcanic bombs of the agglomerates slopes.

배를 받는 암반 비탈면에서 발생하는 유형으로 불연속면이 고각의 경사를 가지는 경우 전도로 인해 낙석이 발생하는 형태이다. 연구지역 내 박리형 낙석의 유형은 두 조의 수직 주상절리와 한 조의 수평절리가 잘 발달된 조면암질암에서 나타나고 있다.

**낙석의 크기와 중량**

낙석의 크기와 중량은 낙석 운동에 크게 영향을 미치는 요인 중 하나이다. 본 연구에서는 연구지역에 분포하는 비탈면의 지질학적 특성과 불연속면 분포를 조사하여 유형별로 낙석의 크기와 중량을 결정하였다. 집괴암 비탈면에서 발생하는 낙석의 경우 연약한 기질부는 풍

화 또는 운반과정에서 분해 또는 탈락하게 되고 최종적으로 타원체에 가까운 구(球)의 형상으로 화산암괴 또는 화산탄이 낙하하는 경우가 많다. Fig. 2 b를 보면 집괴암 노두에서 타원형의 화산탄들이 기질부 내에 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 집괴암 노두상에서 관찰되는 화산탄 또는 화산암괴의 타원체에 대한 장축과 단축을 측정하여 낙석의 크기를 결정하였다. 타원체의 장축의 경우 최대 길이와 분포비율은 2.0 m (1.1%), 최빈(最頻)값은 1.1 m (21.3%)를 보이며, 단축은 최대 길이 및 분포비율 1.6 m (1.1%), 최빈값은 0.2 m (21.3%)로 조사되었다(Fig. 3).

조면암질암의 경우는 집괴암과는 달리 두 조의 수직

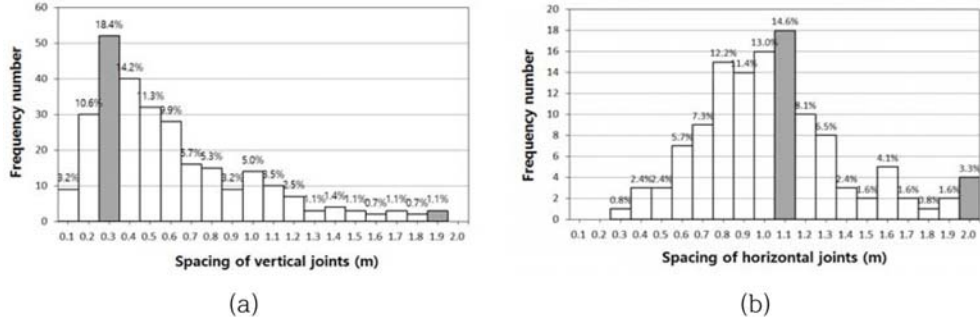


Fig. 4. Distribution of the spacing of vertical and horizontal joints on trachytic rock slopes.

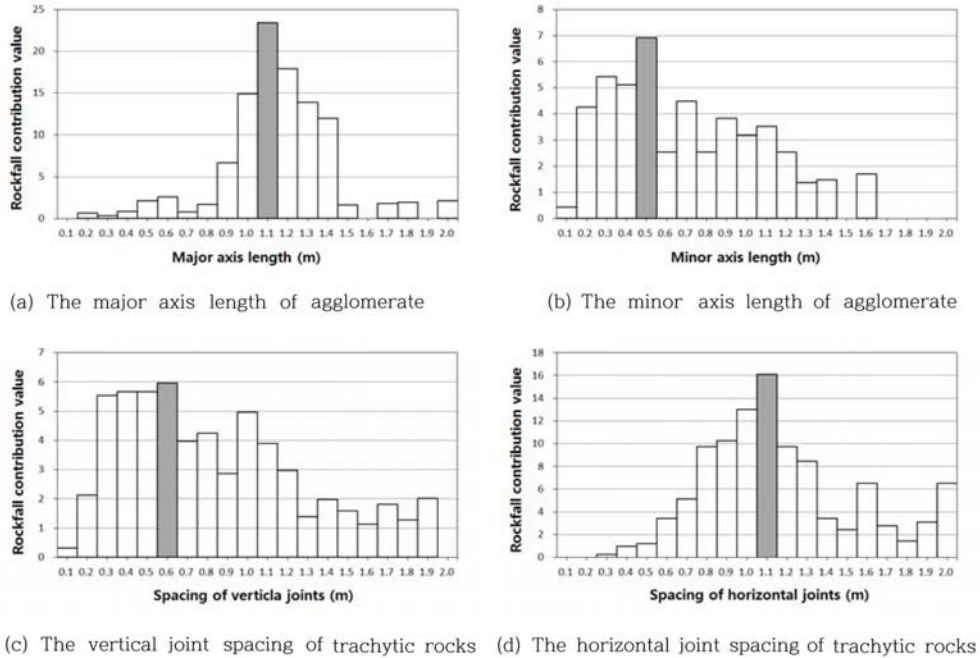


Fig. 5. The rockfall contribution values of volcanic bomb axis lengths and joint spacing in trachytic rocks.

절리와 한 조의 수평 절리가 잘 발달하고 있고 이들에 의하여 블록이 형성되므로(Fig. 2 d), 절리면 조사에 일반적으로 적용되는 스캔라인법을 이용하여 절리의 간격과 발생빈도를 조사하였다. 수직 절리 간격과 분포비율은 최대 1.9 m (1.1%), 최빈값은 0.3 m (18.4%)로, 수평 절리의 간격은 최대값 2.0 m (3.3%), 최빈값 1.1 m (14.6%)로 조사되었다(Fig. 4).

낙석에 대한 방호대책공 설계를 실시할 때 앞에서 조사된 최대값과 최빈값만을 가지고 낙석의 체적과 중량을 구하여 낙석충돌에너지, 최대 도약 및 최대 도달거리 등을 검토하면 너무 과다하거나 다소 미진하게 계산

되어 현실적이지 못한 방호대책이 설계에 반영될 수 있다. 따라서 분포비율을 고려한 평균값을 산출해 보기 위하여 낙석의 장, 단축 길이에 분포비율을 곱하여 각 측정치의 빈도를 고려한 평균 기여값을 산정하였다. 즉 절리의 간격과 화산탄의 축길이를 10 cm 단위로 분류하고, 각 간격별 분포비율을 구한 후, 해당 길이와 분포비율을 곱하여 산출되는 값이 분포확률을 고려한 평균값에 대한 기여값이며 이를 도시하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 음영으로 처리된 측정값이 기여평균이다. 집괴암의 최대기여 장축길이는 1.1 m로서 조사결과의 최빈값과 동일하며, 단축길이는 0.5 m로서 최빈값인 0.2m보다

**Table 1.** Volume and weight of volcanic bombs and blocks for agglomerate and trachytic rock.

Rock type	Parameter	The maximum observed value (MOV)	The mode of observed values	The maximum contribution value (MCV)
Agglomerate	Major axis length (m)	2.0	1.1	1.1
	Minor axis length a (m)	1.6	0.2	0.5
	Unit weight (ton/m <sup>3</sup> )	2.240	2.240	2.240
	Volume (m <sup>3</sup> )	3.217	0.028	0.173
	Weight (ton)	7.206	0.062	0.387
Trachytic rocks	Height (m)	2.0	1.1	1.1
	Width (m)	1.9	0.3	0.6
	Unit weight (ton/m <sup>3</sup> )	2.580	2.580	2.580
	Volume (m <sup>3</sup> )	7.220	0.099	0.396
	Weight (ton)	18.628	0.255	1.022

크게 나타났다. 조면암질암 수직절리의 최대기여 간격은 0.6 m로서 조사결과인 0.3 m 보다 크게 나타났으며, 수평절리의 경우 조사결과와 동일한 1.1 m로 나타났다.

낙석의 중량은 식 (1)을 이용하여 계산하였으며, 낙석의 체적은 구와 육면체로 가정하여 산정하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012). 연구지역의 집괴암은 타원형에 가까운 형태를 보이므로 타원형 입방체로 가정하여 체적을 구하였으며, 표면에 화산회 등의 기질물질이 다소 남아있는 형태로 나타나므로 산정된 체적에 1.2를 곱하여 결정하였다(식 2). 또한 집괴암의 단축 길이는 노두에서 한방향의 축만 노출되는 관계로 정확한 조사가 불가하여 조사된 단축길이를 두 단축길이를 적용하였다. 조면암질암의 경우 육면체로 가정하여 높이와 폭을 각각 수평 절리와 수직 절리의 간격으로 적용하였다(식 3). 낙석의 무게산정을 위한 암석의 단위중량은 실내시험을 통하여 측정하였다.

$$\text{낙석의 중량} = \text{낙석의 체적(m}^3\text{)} \times \text{단위중량(t/m}^3\text{)} \quad (1)$$

$$\text{집괴암의 체적} = \frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{1}{8} \times \text{장축길이} \times 2 \cdot \text{단축길이}\right) \times 1.2 \quad (2)$$

$$\text{조면암질암의 체적} = \text{수평절리 간격} \times 2 \cdot \text{수직절리 간격} \quad (3)$$

Table 1은 집괴암과 조면암질암에서 산정된 낙석의 규모를 정리한 것이다. 집괴암과 조면암질암의 체적은 각각 0.028~3.217 m<sup>3</sup>, 0.099~7.220 m<sup>3</sup>이며, 중량은 각각 0.062~7.206 ton, 0.255~18.628 ton으로 산정되어 집괴암에 비해 조면암질암이 약 2.2~3.5배 큰 값을 보인다.

낙석의 거동을 파악하기 위하여 실시하는 시뮬레이션

에 최대중량인 7.2 ton과 18.6 ton을 적용하면 산정되는 충돌에너지가 과다하고, 약 1~3% 내외의 낮은 분포율을 보이는 간격과 길이를 바탕으로 산정하였기 때문에 발생확률이 매우 낮다. 따라서 최빈값보다 다소 높게 산정된 기여평균값을 적용하여 산정된 낙석의 중량을 시뮬레이션에 적용하였다.

### 낙석 시뮬레이션

연구지역내 위치하는 비탈면 중 낙석이 예상되는 11개 구간을 대상으로 각 1,000회씩 낙석 시뮬레이션을 수행하였다. 낙석 시뮬레이션은 충돌에너지, 속도, 도약 높이, 이동거리 등을 분석하는 프로그램인 Rocfall을 이용하였다. Rocfall은 확률론적 질점계 해석법을 적용하는 프로그램으로 신속하고 다양한 통계처리에 효과적인 장점이 있다(Lee and Park, 2003).

#### 입력변수

낙석을 시뮬레이션 하는데 있어 가장 중요한 입력변수인 반발계수(restitution coefficient)는 접선방향(tangential direction)과 연직방향(nomal direction)의 입사속도와 반사속도의 비율을 이용하여 계산된다(Pfeiffer and Bowen, 1989). 반발계수의 산정은 식 (4)와 같으며, 비탈면의 구성 물질에 따라 값이 달라진다.

$$R_t = \frac{V_{tr}}{V_{ti}}, \quad R_n = \frac{V_{nr}}{V_{ni}} \quad (4)$$

여기서,  $R_t$ 는 비탈면의 접선방향 반발계수,  $R_n$ 는 비탈면의 연직방향 반발계수,  $V_{tr}$ ,  $V_{nr}$ 는 접선방향 반사속도와 입사속도,  $V_{ti}$ ,  $V_{ni}$ 는 연직방향 반사속도와 입사속도를 나타낸다.

Labiouse and Heidenreich (2009)는 낙석에 대한 반발계수를 결정하는데 있어 동일한 지점이라도 비탈면의 구성물질에 따라 변동성 있는 반발계수를 사용하거나 유사한 조건에서의 실험값을 적용해야함을 실험적 연구를 통하여 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 비탈면 하부에 테일러스가 분포하는 일부 구간은 상부의 기반암과 구분하여 반발계수를 적용하였으며, 암반과 토사 비탈면에서의 반발계수를 정리한 Chau et al. (2002)의 반발계수 분포도와 일본의 현장시험을 통한 평균값(JARA, 2000), Rocfall 프로그램에서 제시한 값을 비교분석하여 반발계수를 결정하였다.

Fig. 6은 Chau et al. (2002)이 발표한 반발계수 분포도에 일본의 현장시험 평균값과 Rocfall 프로그램에서 제시한 값을 추가하여 나타낸 것이다. 암반 비탈면의 경우 연직반발계수는 Chau et al. (2002)의 범위 내에 일본의 현장시험 평균값 0.55와 Rocfall이 제시하고 있는 값 0.53이 분포하고 있어 서로 유사한 값을 보이나, 접선반발계수는 일본의 현장시험 평균값이 0.58, Rocfall은 0.99로 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 테일러스 비탈면의 경우 연직반발계수와 접선반발계수는 일본의 현장시험 평균값이 각각 0.28과 0.78로 Rocfall이 제시한 0.32와 0.82에 비해 다소 낮은 값을 보인다.

본 연구에서는 연구지역 내에 분포하는 테일러스의

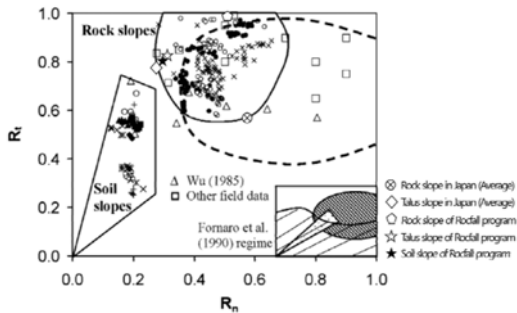


Fig. 6. Coefficients of restitution for rock, soil and talus slopes plotted in the  $R_t R_n$  space (modified by adding restitution coefficients of JARA (2000) and the Rocfall program to those of Chau et al. (2002)).

경우 강도가 높은 조면암질암으로 구성되어 있어 비교적 높은 값인 Rocfall program이 제시한 반발계수를 적용하였으며, 경암에 해당되는 조면암질암의 반발계수는 일반적인 암반의 분포범위(Fig. 6 참조) 내에서 연암에 속하는 집괴암의 반발계수보다 다소 높게 결정하였다. 낙석의 마찰각은 현장에서 채취한 암석시료의 기울임시험(tilt test) 결과를 바탕으로 집괴암과 조면암질암은 35°, 테일러스는 30°로 결정하였다. 초기 수평속도와 기타 입력변수는 Rocfall의 추천값을 사용하였다. 시뮬레이션을 위해 적용된 입력치를 정리하면 Table 2와 같다.

**비탈면**

Table 3은 시뮬레이션 대상 비탈면의 암종, 경사, 낙석이 발생하는 위치 등을 정리한 것으로 비탈면의 경사는 46~76°의 고각으로 이루어져 있으며, 낙석의 발생 높이는 비탈면의 높이와 불연속면의 분포를 고려하여 24~160m로 설정되었다.

**결과 및 토의**

시뮬레이션 결과를 토대로 대상 비탈면에서 발생한 낙석의 도달거리와 도로에 영향을 미치는 낙석의 개수를 나타내면 Fig. 7과 같다. 총 11개의 비탈면 중 S-7과 S-8에서 150m 이상의 도달거리를 보여 가장 멀리 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 또한 도로로 떨어지는 낙석의 개수는 S-7에서 약 950개로 가장 많이 발생하나 S-8은 도로까지 도달하는 낙석이 없다. 이는 S-8의 경우 낙석의 발생위치와 도로의 이격거리가 255m로 최대 도달거리가 150m인 낙석이 도로까지 도달하지 않기 때문이다. S-10의 경우는 도로에 도달하는 낙석이 3개로 낙석이 도로에 영향을 주는 비탈면 중 가장 작은 값을 보인다.

낙석이 도로에 영향을 미치는 비탈면을 알아보기 위해 낙석의 최대 도달 거리와 도로까지의 이격거리(Table 3)를 비교하면 도로로 낙석이 떨어지는 비탈면은 S-1과 S-4, S-5, S-6, S-7, S-10으로 나타났다.

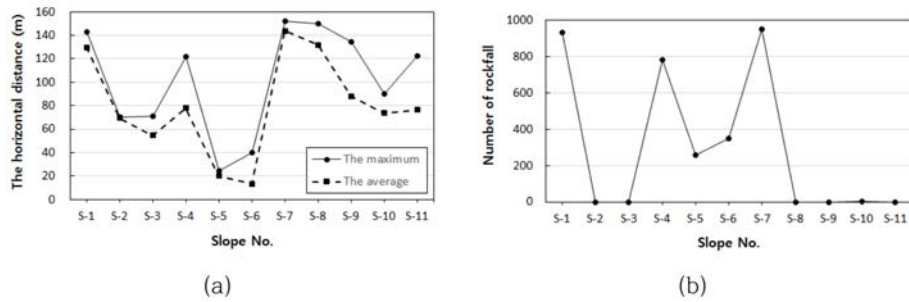
Table 2. Simulation input parameters for the Rocfall program in this study.

Rock type	$R_t$	$R_n$	Standard deviation	Friction angle (°)	Horizontal velocity (m/s)
Agglomerate	0.85	0.55	0.04	35.0 ± 5.0	1.5 ± 0.15
Trachytic rock	0.90	0.60	0.04	35.0 ± 5.0	1.5 ± 0.15
Talus	0.82	0.32	0.04	30.0 ± 2.0	-

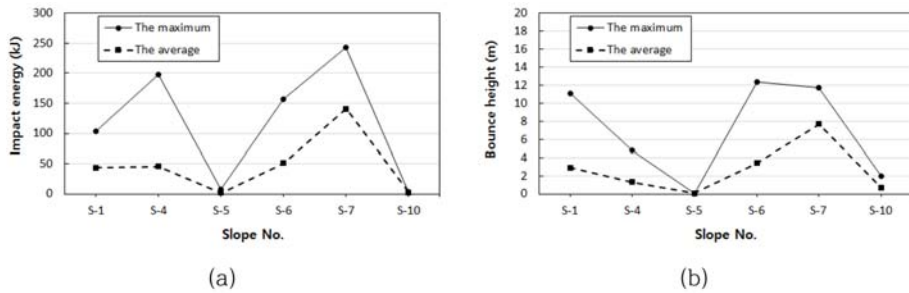
**Table 3.** Geological and geomorphological features of the simulated slopes.

Slope No.	Location	Rock type*	Falling point		Average angle of slope (°)
			Height (m)	Horizontal distance from road (m)	
S-1	Jeodong-ri	A	127	120	69
S-2	Jeodong-ri	A&T	113	110	65
S-3	Jeodong-ri	A&T	70	90	46
S-4	Cheonbu-ri	A	92	81	56
S-5	Cheonbu-ri	A	24	20	52
S-6	Cheonbu-ri	T.R	27	22	73
S-7	Jeodong-ri	A&T	134	85	66
S-8	Jeodong-ri	T.R&T	198	255	54
S-9	Jeodong-ri	A&T	114	142	49
S-10	Jeodong-ri	A&T	90	82	76
S-11	Jeodong-ri	A&T	154	186	63

\*A, agglomerate; T.R, trachytic rock; T, talus



**Fig. 7.** Results of rockfall simulation. (a) Horizontal distance from falling point to the reaching point; and (b) number of rockfall reaching road.



**Fig. 8.** Impact energy and bounce height of each slopes calculated by Rockfall simulations.

낙석이 도로에 영향을 미치는 상기 6개의 비탈면을 대상으로 방호대책공 설계를 수행하기 위하여 도로 또는 구조물에 작용하는 충격에너지 및 도약고의 최대값과 평균값을 분석하면 Fig. 8과 같다. 도로에 작용하는 충격 에너지는 S-7에서 최댓값 243 kJ, 평균값 141 kJ로 가장 크게 나타났으며, 3개의 낙석만이 도달하는 S-10

의 경우 최대 충격에너지가 4.2 kJ로 가장 작은 값을 보인다. 또한 최대 도약 높이는 S-6에서 약 12 m로 가장 높게 발생하는 것으로 계산되었으나, 평균 도약 높이는 S-7에서 가장 높게 발생하는 것으로 산정되었다. 이는 S-6에서 발생한 낙석 중 도약 높이가 높은 낙석의 수가 많지 않음을 의미한다.

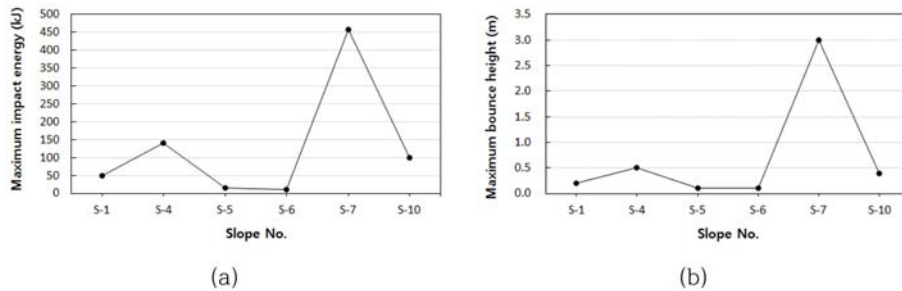


Fig. 9. Maximum impact energy and maximum bounce height in the case of using a ring-net for road protection.

### 낙석방지대책

국내의 경우 낙석방지대책으로 설치되는 표준 낙석방지울타리의 경우 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012)에서 제정한 도로안전시설 설치 및 관리지침에 의하면 낙석의 중량 400 kg을 가정하여 표준 낙석방지울타리를 적용하고 있다. 이는 흡수 가능 충격 에너지가 50 kJ로 Fig. 8에서 산정된 도로에서의 충격에너지를 고려할 때 S-10을 제외하고 적용이 불가능하다. 또한 일반적인 낙석방지울타리의 경우 높이가 2~2.5 m로 0.1~12.4 m의 도약 높이를 보이는 시뮬레이션 결과를 고려할 때 낙석방지울타리는 적절한 대책 공법이 될 수 없다.

한편 National Emergency Management Agency (2009)는 모형실험을 통해 낙석방호시설 중 하나인 고강도특수망의 흡수 가능 충격에너지가 100~3,000 kJ의 범위를 보이는 것으로 발표하였다. 따라서 비탈면 내에 설치가 가능하고, 낙석방지울타리보다 흡수 가능 충격에너지가 큰 고강도특수망을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 고강도특수망의 위치는 비탈면의 형상과 지형적인 요인 및 현장상황 등을 고려하여 선정하였다.

고강도특수망을 적용한 낙석에 대한 시뮬레이션 분석 결과, 최대 충격 에너지는 S-7을 제외하고 140 kJ 이하의 값을 보이며, 도약높이도 S-7을 제외하고 0.5 m 내외의 값에 분포하고 있다(Fig. 9). 따라서 비탈면 내에 충격에너지와 도약높이를 고려하여 낙석방지울타리와 더불어 고강도특수망 등과 같은 적절한 제원의 방호대책공의 설치가 필요할 것으로 판단된다.

### 결 론

해안도로를 따라 낙석이 빈번하게 발생하는 울릉도의 비탈면을 대상으로 현장조사를 통해 낙석의 유형을 분류하고 규모를 산정하였다. 11개의 비탈면을 대상으로

낙석 시뮬레이션을 수행하여 낙석의 거동을 분석하고 낙석에 대한 방지 대책을 검토하였다.

1. 연구지역에 분포하는 집괴암 내지 각력질 응회암은 괴상의 암체로 화산암괴와 화산탄을 함유한 탈락형 낙석으로 분류되며, 수직의 주상 절리가 발달된 조면암질 암은 박리형 낙석으로 분류된다.

2. 현장조사를 통해 집괴암과 조면암질암의 축 길이와 절리 간격을 분석하여 낙석의 체적을 산정하였다. 집괴암의 경우 최대값 3.217 m<sup>3</sup>, 최빈값 0.028 m<sup>3</sup>이며, 조면암질암은 최대값 7.220 m<sup>3</sup>, 최빈값 0.099 m<sup>3</sup>으로 산정되었다. 분포비율을 적용하여 계산된 평균중량은 집괴암과 조면암질암에서 각각 387 kg, 1,022 kg으로서 조면암질암이 약 2.6배 무거운 것으로 산정되었다.

3. 각 비탈면에 대한 낙석 시뮬레이션을 수행하여 낙석이 도로에 영향을 미치는 비탈면 6개를 선정하였다. 선정된 비탈면에 대해 도로에 작용하는 낙석의 영향을 검토한 결과, 최대 충격 에너지는 4~243 kJ을 나타냈으며, 도약 높이는 0.1~12 m로 나타났다.

4. 표준 방호대책공인 낙석방지울타리만으로 안정성이 확보되지 않아 고강도특수망을 고려하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 고강도특수망에 작용하는 최대 충격 에너지는 15~457 kJ로 낙석에 대한 안정성이 확보되는 것으로 나타났다.

### 사 사

이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### References

- Chau, K. T., Wong, R. H. C., and Wu, J. J., 2002, Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts, International Journal of Rock Mechanics and



- Mining Sciences, 39(1), 69-77.
- Cho, Y. S. and Kim, Y. S., 2010, Analysis for behavior of rockfall movement by Cheonbuldong valley of Seoraksan national park, The Journal of the Korean Geotechnical Society, 26(5), 49-55 (in Korean with English abstract).
- Fornaro, M., Peila, D., and Nebbia, M., 1990, Block falls on rock slopes-application of a numerical simulation program to some real cases. In: Price DG, editor. Proceedings of the Sixth International Congress IAEG, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, 2173-80.
- Japan Road Association, 2000, Manual for rockfall countermeasure (in Japanese).
- Jin, M. S., Shin, H. J., and Kwon, S. K., 2005, Igneous rocks and igneous activities in the Korean Peninsula, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 310p (In Korean).
- Kim, K. S., 2010, Contemplation of rockfall simulation parameters and design of rockfall fence, KGES-KGS, Geo-environmental and Slope Stability Conference, 334-350 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. K. and Kim, S. U., 1977, Applied geology of Ulreung-Island, Provincial government of Gyeongsangbuk-Do, 59p (In Korean).
- Labrousse, V. and Heidenreich, B., 2009, Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1981-1993.
- Lee, J. Y. and Park, H. D., 2003, Comparison of commercial softwares for rockfall simulation and analysis & prediction of rockfall, The Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers, 3800-3805 (In Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012, Management guidelines and road safety facilities installation (In Korean).
- National Emergency Management Agency, 2009, Development of landslide prediction technology and damage mitigation countermeasures, 456-470 (in Korean with English abstract).
- Pfeiffer, T. J. and Bowen, T. D., 1989, Computer simulation of rockfalls, Bulletin Association Engineering Geology, 26(1), 135-146.
- Rhee, J. H., Koo, H. B., Park, H. J., and Bae, G. J., 2004, A study on the analysis of rockfall simulation using shape and mass rockfall, The Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers, 2405-2410 (in Korean).
- Ritchie, A. M., 1963, Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Board Record, 17, Washington, 13-28.
- Seo, Y. S., Jang, H. S., and Kim, K. Y., 2012, Assessment of rockfall hazard in the northeast region of Ulleungdo, The Journal of Engineering Geology, 22(3), 353-363 (in Korean with English abstract).
- Song, Y. S., Park, M. E., and Park, K. H., 2006, Age and evolutions of the volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do, The Journal of the Petrological Society of Korea, 15(2), 77-80 (in Korean with English abstract).
- Wu, S. S., 1985, Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Research Record, 1031, 1-5.
- 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 considering slope height, rockfall weight, The Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 12(3), 47-54 (in Korean with English abstract).

#### 문기봉

충북대학교 지구환경과학과  
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52  
Tel: 043-261-2765  
E-mail: issacnov@daum.net

#### 유영민

평화지오택(주)  
462-723 경기도 성남시 중원구 둔촌대로 531  
Tel: 031-744-3456  
E-mail: minisesang@gmail.com

#### 윤현석

충북대학교 지구환경과학과  
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52  
Tel: 043-261-2765  
E-mail: yhs0211@hanmail.net

#### 서영호

현대건설주식회사  
110-920 서울시 종로구 율곡로 75  
Tel: 041-933-6512  
E-mail: seoyh@hdec.co.kr

#### 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
362-763 충북 청주시 서원구 내수동로 52  
Tel: 043-261-2765  
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

#### 백 용

한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283  
Tel: 031-910-0228  
E-mail: baek44@kict.re.kr