

## 역 속도 기반으로 비탈면 붕괴 구간 예측 모델의 개발

옥영석 · 신상희\* · 김승현 · 구호본  
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

### 요 약

비탈면의 붕괴구간 예측을 위한 지속적인 관리 시스템으로 상시 계측 시스템을 이용하고 있다. 붕괴 구간 예측을 위해서 비탈면 변위 또는 속도 데이터와 같은 측정 데이터를 응용하여 모델로 구현하는 연구가 지속적으로 진행 중이다. 또한, 대부분의 예측 모델 연구는 시간에 따른 변위 데이터를 이용하여 붕괴 전후의 변화를 통한 붕괴시점을 예측하는 방법으로 변위 데이터와 속도 데이터의 경향성을 판단하고 이를 이용하여 정규화 모델을 수립하는 것이다. 기존에 제안된 모델은 선형 함수를 응용한 역속도 방정식 이었다. 하지만 본 연구에서 기존의 선형 방정식을 이용한 역속도 방정식 대신 지수방정식을 이용하여 붕괴 가능 시점을 예측할 수 있는 모델을 제시하고자한다. 본 연구에서 제안하는 모델은 획득한 데이터를 이용하여 지수형태의 모델 방정식을 구성하였으며, 이를 이용하여 붕괴 가능 시점의 예측하였다. 본 연구에서 제안한 역 지수 속도 모델의 적정성 검증을 위하여 OO 지구에 대한 실측 변위데이터를 통하여 역 지수 속도 모델 방정식을 이용한 붕괴 가능 시점과 실제적으로 발생한 붕괴 시점을 비교하였다. 비교 결과 실제로 붕괴가 발생된 시점은 설치 기준으로 부터 1160일 이후였으며, 제안된 역 지수 속도 모델을 이용한 붕괴 가능 시점에 대한 예측일은 약 1000일인 것으로 추정되었다. 요약하자면, 본 연구에서 제안한 비탈면 붕괴 예측 모델은 실제로 붕괴가 된 시점을 예측 한 대기보다 붕괴 가능성이 있는 시점을 예측하는 것에 그 목적을 둔다.

**주요어:** 역 지수 속도 모델, 상시 계측 시스템, 변위, 속도, 비탈면 붕괴

**Young-Suk Oak, Sang-Hee Shin, Seung-Hyun Kim and Ho-Bon Koo, 2013, Development of Slope Failure Prediction Interval Model Based on Inverse Velocity. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 2, p. 267-273**

**ABSTRACT:** The slope failure prediction interval model is proposed for determining changing tendency of the displacement and the velocity. Normally, the monitoring system is a sustainable management system for the prediction of slope failure. In order to predict the slope failure, the research is ongoing to implement into the model by the application of measured data, such as the slope displacement data or velocity data. Most of prediction model studies has been conducted as a method to predict the change of before and after the failure point by time-dependent displacement data. The earlier studies is based on linear function on inverse velocity equation. However, this study presents a model that the point (interval) of slope failure establishes the inverse velocity equation by exponential equation instead of conventional linear equations. The point of slope failure is predicted by proposed model on obtained data which is the exponential form of the model equations. The adequacy of inverse velocity exponential equation is verified on measured displacement data at OO site. The verification of prediction model is compared to the time of actually occurred slope failure which it uses the exponential model equations. The actual failure point and predicting failure point are compared for improving the prediction model. The point of actual failure is to 1160 days after installed the monitoring system. The point of predicting failure is to about 1000 days based on the inverse velocity model. In summary, the proposed slope failure prediction model allows to predict the point at which the possibility of failure rather than the exact time of the failure.

**Key words:** inverse velocity exponential model, monitoring system, displacement, velocity, slope failure

*(Young-Suk Oak, Sang-Hee Shin, Seung-Hyun Kim and Ho-Bon Koo, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea)*

\* Corresponding author: +82-31-910-0027, E-mail: scott@kict.re.kr

1. 서론

위험비탈면의 거동은 지질구조, 함수특성, 포화깊이, 지하수위, 초기 응력 상태, 지반강도 등에 의하여 파괴 유무 및 파괴 형태를 예측한다. 하지만 내적 요소가 아닌 외적 요소인 강우량, 집중호우 및 풍화속도 등을 고려하지 않기 때문에 시간경과에 따른 비탈면의 붕괴여부를 알 수 없다. 따라서 현 상황에서는 비탈면의 상태가 안정적이나 향후 외적요소에 의하여 불안정할 수 있다. 최근에는 상시계측 및 CCTV 등을 구축하여 과다 변위 발생 또는 낙석 발생시 현장 데이터를 조사·분석하여 안정성 여부를 파악하고 있다. 하지만 이는 비탈면 붕괴의 실질적인 예방에 대한 대책수립이 아닌 사고 후 대책수립이기에 사고로 이어질 수 있다. 비탈면의 시간경과에 따른 파괴거동에 대한 연구는 국내외 연구자들에 의하여 지속적으로 이루어지고 있지만, 실제 현장에 대한 실측계측데이터가 아닌 모형실험을 통한 파괴 거동 양상을 연구가 주로 이루고 있다(Fukuzono, 1985; Cho *et al.*, 2008). 특히 Fukuzono (1985)는 시간경과에 따른 붕괴시점예측을 하기 위하여 지반 강도, 함수특성 등이 아닌 변위-속도의 상관관계를 통해 붕괴시점을 예측하였다. Fukuzono (1985)에 의해 제안된 연구에 의하면 변위-속도와의 관계는 볼록형(convex), 선형(linear), 오목형(concave)으로 분류할 수 있으며, 이는 실험상수에 의해 결정된다. 하지만 Fukuzono (1985)가 제안한 모델식은 현장을 고려하지 않은 균질한 모형실험을 통하여 얻은 상수(A, a)값으로 붕괴시점을 예측하였다(Fukuzono, 1985). 현장 실측 변위데이터는 실험데이터와는 달리 불규칙한 시간 간격(interval)과 방향성 없는 변위(error) 때문에 Fukuzono (1985)가 제안한 모델식은 적용시키기 어렵다(Fukuzono, 1985). 본 연구에서는 실제 현장에서 상시계측하고 있는 시간-변위(time-displacement)의 상관관계를 적용하여 지수형 역속도 모델 방정식을 정립하였다.

2. Linear Inverse Velocity 모델

Fukuzono (1985)의 역 속도 예측법(inverse-velocity)는 시간이 경과하면서 지반변위가 변화하는 특성을 역속도와 시간 관계로 표현한 방법이다

(Fukuzono, 1985). Fukuzono (1985)에 의해 실시된 시뮬레이션 조건은 인공 산사태를 실험실 규모로 구성하여 수행하였으며, 중력의 경감에 따라 변형하는 가속도의 특징 데이터를 수집하여 역-속도의 값을 산출하는 모델로서 구현하였다(Fukuzono, 1985). 따라서, 붕괴시점에서 속도가 증가하면서 역속도 관계(inverse-velocity)가 0으로 가는 추세를 형성하게 되므로 그 시점을 붕괴시점으로 가정을 한다(식 (1)).

$$\frac{1}{V} = [A(\alpha - 1)]^{\frac{1}{\alpha - 1}} \cdot (t_f - t)^{\frac{1}{\alpha - 1}} \quad (1)$$

여기에서  $t$  = 시간,  $t_f$  = 붕괴시간,  $V$  = 변위속도,  $A$  그리고  $\alpha$  = 상수를 나타낸다. 그림 1에서 보듯이  $\alpha=2$  일때 선형(linear) 패턴을 보이고  $\alpha>2$  일때는 볼록형(convex) 패턴,  $\alpha<2$  일때는 오목형(concave) 패턴을 보이게 된다(Fukuzono, 1985). Fukuzono (1985)는 실험의 결과에서 붕괴시점 전 붕괴시간의 예측은 일반적으로 선형 속도 데이터로 맞춰지는 경향을 보인다고 하였고, Voight (1988, 1989)와 Kilburn and Petley (2003)은 일정 유효 응력 조건하에서 발생하여 주어진 역-속도가 선형으로 될 것이라고 예상됨을 이론적으로 증명하였다(Voight, 1988, 1989; Kilburn and Petley, 2003).

Rose and Hungr (2006)은 선형식 역속도 모델을 적용시켜 광산 암반에서의 붕괴 시점을 예측하였다. 현장에서 얻은 변위데이터의 방향성(trend)를 고려하여 데이터를 필터한 후 단순한 선형식으로 붕괴시점을 예측하였다(Rose and Hungr, 2006). 비선형 역 속도 방식으로 적용은 실제 변위거동과는 더 정

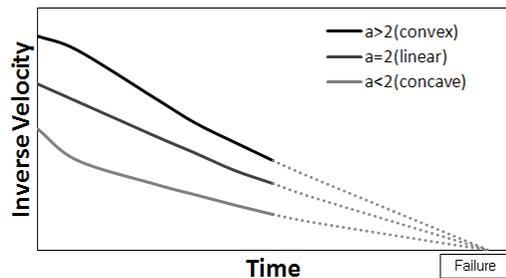


Fig. 1. Inverse-velocity versus time relationships preceding slope failure-after Fukuzono.

확한 패턴이지만 비선형 방식을 적용하기는 한계가 있기 때문에 단순한 선형식으로 붕괴 시점을 예측하였다.

### 3. NEW Exponential Inverse Velocity (NEIV) 방정식

선형 연구들은 변위지점까지의 변화를 관찰하여 이를 역 속도 모델로 구성하여 선형그래프로 구현하였다. Fukuzono (1985)의 역속도방법(inverse-velocity)으로 파괴시기를 추정하는 방법으로 현장 실측 계측데이터로 활용하기에는 시간 간격에 따른 역속도의 에러가 상당히 많이 발생하기에 적용시키기에는 어려움이 따른다(Fukuzono, 1985). 또한 동일한 시간 간격으로 변위데이터를 사용하여 역속도를 적용시킴에도 불구하고 수많은 에러가 발생하며, 상관관계도 낮기 때문에 Fukuzono (1985)의 역속도 방법으로 변위가 발생함에 따라 붕괴시점에 와서는 역속도가 0으로 가는 모델을 바로 적용시키는 것은 어렵다(Fukuzono, 1985). 또한 에러 변위를 분류하여 변위에 대한 역속도 방법으로 도시화하여도 오차 범위가 크므로 붕괴 시점을 예측하기에는 쉽지 않았다. 또한 국내에서는 모형실험을 통해 Fukuzono (1985)의 역 속도 방법을 적용시켜 붕괴예측을 위한 암반비탈면의 파괴거동예측을 하였지만, 파괴가 임박한 시점에서 지수형 변위거동을 보이는 경우에만 역 속도 방법을 이용한 파괴시점 예측이 가능하였다(Fukuzono, 1985; Cho et al., 2008).

본 연구에서의 제안하는 새로운 지수관계의 역속도 모델(new-exponential-inverse-velocity mod-

el, NEIV)은 실시간 변위 데이터에 대한 추세선에 대한 지수 모델 방정식(식(2))을 미분하여 그 식을 역으로 취함으로써 도출하였다, NEIV방정식(식(3))은 그림 2(b)와 같다. 그림 2(b)에서는 NEIV 모델에 대한 그래프를 a구간과 b구간으로 나누어 볼 수 있다. a구간은 Fukuzono (1985)의 선형(linear) 구간과 같이 파괴시점인 역속도가 0으로 가는 형태를 취하고 있다. b구간은 붕괴가 시작한 후부터의 변위발생에 대한 역속도이기 때문에 기울기가 매우 작은 상태의 형태로 바뀌게 된다(Fukuzono, 1985).

$$D = ae^t \tag{2}$$

여기에서  $t =$  시간,  $D =$  변위,  $a =$  변위상수이다.

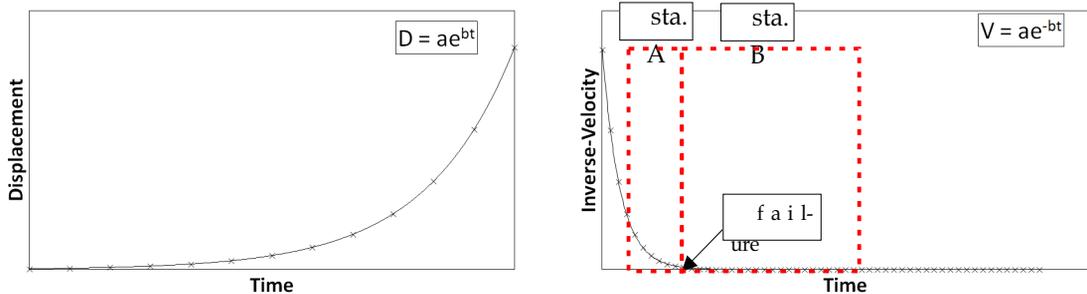
$$V_i = ae^{-t} \tag{3}$$

여기에서  $t =$  시간,  $V_i =$  역 속도,  $a =$  역 속도상수이다.

#### 3.1 위험비탈면 정밀현장조사

본 연구를 통해 개발된 NEIV모델의 적정성을 검토하기 위한 사례 연구의 일환으로 강원도 홍천군 남면 유목정리에 위치한 깎기비탈면(이하 “유목정 지구”)을 선택하였다(그림 3). 유목정 지구는 강원도 홍천에서 경기도 양평으로 향하는 국도 44호선에 위치하며, 경기도와 강원도의 행정구역 경계에 존재한다.

유목정 지구는 총연장 328 m, 최대 높이 58 m의 규모로 총 9개의 소단이 적용되었다. 비탈면 경사는 45~48°로 구성되어 있으며, 200 m 지점에 대형 계



(a) Displacement versus time using real data (b) Inverse-velocity using NEIV model  
**Fig. 2.** Inverse-velocity versus time relation using NEIV model.

곡부가 형성되어 있다. 본 현장은 2004년 7월 8일부터 7월 18일까지 내린 집중 강우로 인해 계곡부 인근의 190~200 m 구간의 4소단 하부에서 표층붕괴가 발생하였다. 계곡부에는 봉분이 존재하였고, 붕괴 발생 이전에 봉분 주변으로 균열 및 침하가 진행되고 있는 것이 발견되어 이에 대한 정밀조사가 이루어졌다(그림 4, 5). 유목정 지구의 구성암석은 화강암질 편마암복합체이며, 풍화등급은 심한풍화~완전풍화에 해당되며, 완전풍화 등급에 해당되는 토사로 이루어진 부분이 대부분이었다. 호우에 의한 붕괴 발생 후 봉분 주변으로 균열 및 침하가 보다 진행되었으며, 지형 특성상 계곡부로 유입되는 지표수 및 지하수의 영향으로 붕괴가 점진적으로 진행되는 것이 확인되었다. 205~260 m 구간은 우천시 법면을 따라 흐르는 지표수의 영향으로 비탈면 경사방향으로 표층유실이 뚜렷이 진행된 상태였다(그림 6). 특히 4소단을 중심으로 상단부는 화강암, 화강암질 편마암으로 구성되고, 4소단 하단부는 풍화를 심하

게 받은 편암으로 구성되어 있다. 4소단 하단부 노출 법면에는 단층파쇄대가 발달하고 있으며, 단층 내에는 단층점토(fault gouge)가 존재하고 있어 유수의 영향에 의한 팽윤형상으로 비탈면의 취약성이 빠르게 진행되는 상황이었다(그림 7).

### 3.2 유목정 지구 비탈면에 대한 NEIV모델 적용

유목정 지구의 계측기(GMG TRS-2) 설치수량은 TTW 센서(지표변위경사계) 16개, 강우계 1개로 총 2종의 계측기를 설치하여 실시간 자동 계측을 수행 중이며, 계측자료는 무선 CDMA를 통해서 취득하고 있다. 상시계측시스템 관리 단면 중 5단면의 TTW 15번, TTW 16번 센서에서 지속적인 변위가 감지되어 면밀한 계측관리를 수행하고 있는 현장이다(그림 8). 최초 2009년 7월 9일 일누계 강우량이 229.5 mm가 발생하였으며, 이 때 감지된 변위는 7월 12일까지 약 3 mm의 변위 증가를 보여 -151.44 mm (당초 -149 mm)로 측정되었다. 본 지역에 반복



Fig. 3. Panorama view of the Yumokjeong Site in 2004.



Fig. 4. Settlement of grave at the valley.



Fig. 5. Tension crack and step in the vicinity of grave.

적으로 강우가 발생하면서 7월 12일 205 mm의 강우, 7월 14일 129 mm의 기록적인 강우가 발생되면서 약 10 mm에 근접한 변위(-159.6 mm)가 7월 15일 중 감지되었으며, 현장에서는 붕괴가 발생하였다(그림 9).

변위데이터의 붕괴발생시점에서 순간 변위의 과다 발생이 관찰되었으며, 실제 그 시점부터 붕괴가 발생하여 이를 고려한 보강 공법 대책을 마련하게 되었다. 실제로 변위데이터를 관찰하면서 붕괴조짐을 예측하기는 매우 어렵다. 앞서 언급했듯이, Fukuzono (1985)의 역 속도 파괴예측을 통한 기법은 현실적으로 상용하고 있는 계측시스템에서 추출된 변위데이터를 역속도로 전환시켰음에도 불구하고 시간 간격과 에러에 의해 직접적으로 경향조차 파악하기 힘든 상태로 표현된다(그림 10(a)). 또한 시간 간격과 발생 에러를 고려하여 데이터를 필터한 후 Fukuzono

(1985)의 inverse-velocity 방식을 적용시켰을 때 상관관계수  $R^2=0.7$ 이며, 주관적인 판단에 의해 불규칙한 시간간격과 변위 방향성 등을 필터를 하기 때문에, 붕괴 시점 예측이 필터조건에 따라 달라지므로 이 방식도 적합성에 문제가 있다고 할 수 있다(그림 10(b)).

따라서 본 연구에서는 NEIV 모델을 이용한 실시간 변위 데이터에 대한 방정식을 통해 비탈면의 파괴 시점을 예측하였다. 본 현장에 대한 실측데이터(그림 11(a))로 나타낸 추세선( $R^2=0.976$ )에 대한 방정식( $y = 16.127e^{0.002x}$ )을 사용하여 미분을 통한 NEIV 방정식을 도출하였다. 그림 11(b)는 NEIV 방정식을 통한 그래프이며 a구간과 b구간으로 구분할 수 있고, 선형구간(a구간)에서 기울기가 거의 0인 구간(b구간)으로 넘어가는 시점에서 파괴시점을 예측할 수 있다. 본 현장은 2009년 7월 15일(계측기 설치한 날로부터 1160일 이후) 붕괴가 되었으며, NEIV모델



Fig. 6. Surface layer failure at 205 ~ 260 m section.



Fig. 7. Waterway formation alongside fault zone.



Fig. 8. Location of TTW 15 and TTW 16 sensors.

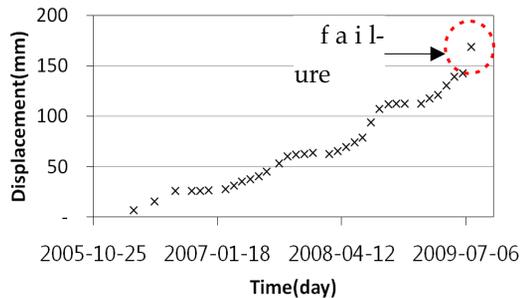


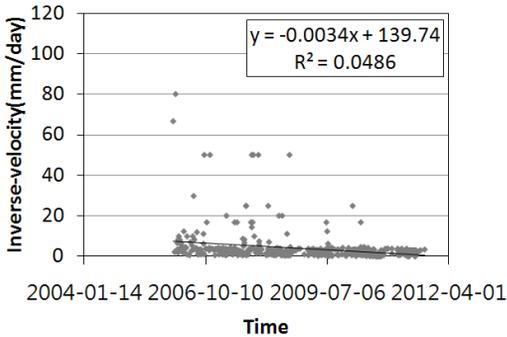
Fig. 9. Displacement versus time at Yumokjeong Site.

도시화시킨 그래프에서는 약 1000일 정도에 해당됨을 확인할 수 있다. 실측 변위데이터를 통하여 NEIV 모델방정식을 이용한 붕괴 예측 시점과 실제적으로 발생한 붕괴 시점 결과를 비교해 볼 때, 예측 모델은 붕괴가 진행되는 시점구간을 예측하였다. 따라서 실시간 계측에 의한 변위데이터를 입력 값(input)으로 하여 NEIV 모델을 도출함으로 붕괴가능성을 잠재하고 있는 비탈면에 대하여 붕괴 가능한 시작 시점을 예측할 수 있고, 이들 예측 값을 근거로 비탈면에 대한 사전 보수, 보강을 통하여 붕괴 이전에 비탈면을 관리하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

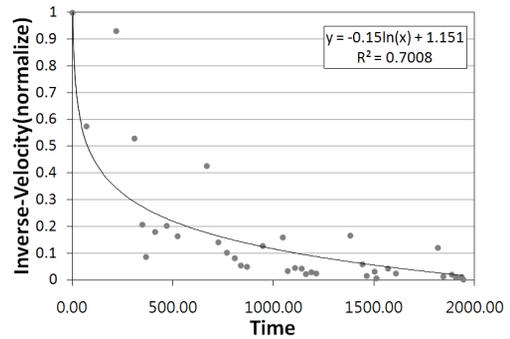
4. 토의 및 결론

비탈면의 붕괴여부는 지반강도, 함수특성 등 실험을 통해 얻은 물성치를 통한 판단을 하기 때문에, 현재상태의 비탈면 붕괴여부만을 판단할 수 있다.

따라서 향후 시간경과에 따른 붕괴 예측을 하는데 있어 한계가 있다. 본 연구진은 상시계측을 통해 얻은 실측 변위데이터를 입력 값으로 New-exponential-inverse-velocity model (NEIV) 모델을 통한 붕괴 발생 시점을 예측하고자 하는 연구를 수행하였다. 새롭게 제안된 모델의 적정성 검증을 위하여 한국건설기술연구원에서 관리 중인 대형 비탈면 설치 상시계측시스템의 현장 실측 변위 데이터를 사용하였으며, NEIV 모델 방정식을 도출하여 적용시켜 보았다. 본 논문에서는 강원도 유목정 지구에 대한 실측 변위데이터를 통한 NEIV 모델방정식을 통한 붕괴 예측 시점과 실제적으로 발생한 붕괴 시점을 비교하였다. 비교 결과 실제로 붕괴가 발생된 시점은 처음 계측시스템을 설치한 이후, 1160일 이후로 확인되며, NEIV 모델을 이용한 붕괴 시점에 대한 예측일은 약 1000일인 것으로 계산되었다. 실제 과거 붕괴시점과 NEIV 모델의 함수 그래프가 상당히 유사하다는 것

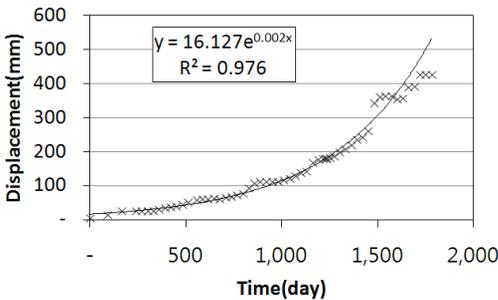


(a) Inverse-velocity using real data

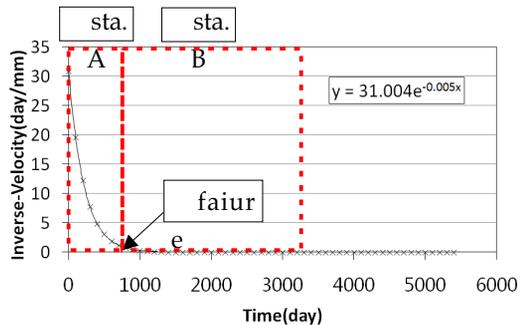


(b) Inverse-velocity using sorting data

Fig. 10. Inverse-velocity versus time relation at the Yumokjeong Site using inverse velocity method of Fukuzono.



(a) Displacement versus time using real data



(b) Inverse-velocity using NEIV model

Fig. 11. Inverse-velocity versus time relation at the Yumokjeong Site using NEIV model.

을 확인 할 수 있다. 본 자료를 토대로 하여 NEIV 모델 방정식을 통해 실시간 계측 변위 데이터에 대한 추세선을 미리 산정함으로써 각 현장 마다 붕괴 후 후속 조치를 위한 예측 모델이 아닌 붕괴 발생 조짐을 사전에 파악하여 예방 대책을 수립 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 붕괴 발생 시점을 고려하여 비탈면 지반특성, 지질학적 특성, 수리학적 특성 등을 감안한 대책공법을 적용시킴으로써 비탈면 붕괴 발생 사고로부터 국민의 인명, 물질 피해를 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.

**참고문헌**

Cho, T.C., Suk, J.U., Lee, S.A. and Um, J.G., 2008, Investigation of rock slope failure based on physical model study. the Journal of Engineering Geology, 18, 447-457 (in Korean with English abstract).

Fukuzono T.A, 1985, New method for predicting the failure time of a slope. In: Proceedings of the fourth international conference and field Workshop on Landslide, Tokyo, 145-220.  
 Kilburn, C. and Petley, D., 2003, Forecasting giant, catastrophic slope collapse : lessons from Vajont. Geomorphology, 54, 21-32.  
 Rose, N.D. and Hungr, O., 2006, Forecasting potential slope failure in open pit mines-contingency planning and remediation, Canadian Institute of Mining. Metallurgy and Petroleum, May 1, 2006.  
 Voight, B., 1988, A method for prediction of volcanic eruptions. Nature, 332, 125-130.  
 Voight, B., 1989, A relation to describe rate dependent material failure. Science, 243, 200-203.

---

투 고 일 : 2013년 3월 27일  
 심 사 일 : 2013년 3월 28일  
 심사완료일 : 2013년 4월 29일