ISSN (Print) 1226-5268 ISSNS (Online) 2287-7169
The Journal of Engineering Geology, Vol.23, No.3, September, 2013, pp. 257-269
http://dx.doi.org/10.9720/kseg.2013.3.257

도로비탈면 투자우선순위 결정에 관한 연구

김승현 · 김홍균* · 옥영석 · 이종현 · 구호본
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

Analysis of Priority Investments for Preventing Roadside Slope Failures

Seung-Hyun Kim, Hong-Gyun Kim*, Young-Suk Oak, Jong-Hyun Lee, and Ho-Bon Koo
Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

산사태나 비탈면 재해를 예방하기 위해서는 적절한 계획을 수립하여야 하며, 국가의 한정된 예산을 고려했을 때 체계적인 투자 계획이 마련되어야 한다. 국도 도로비탈면의 체계적인 관리와 합리적 투자 계획 수립을 위하여 위험도와 예상피해도를 고려하여 투자우선순위를 산출하였다. 투자우선순위에서 위험도 결정의 주요인자는 경사, 토질, RMR, 안정석해석, 불연속면 종류, 붕괴이력이며, 피해도는 교통량과 차선수, 평균차량위험도를 고려하여 결정하였다. 강원도 영서지방 392개소 비탈면에 대한 투자우선순위 산출 및 회귀분석 결과, 붕괴가 발생된 비탈면의 투자우선순위가 높은 것으로 확인되며, 위험구간비가 높은 비탈면, 계곡부가 존재하는 비탈면이 높은 투자우선순위를 차지하는 것으로 확인된다.

주요어 : 비탈면, 투자우선순위, 위험도, 예상피해도, 회귀분석

Prevention plans for landslide and slope disasters should be appropriate for a country's budget when considering a systematic investment plan. The systematic management of slopes adjacent to national highways should incorporate reasonable investment risk and the expected degree of damage should be calculated by considering the investment priorities. In terms of priority of investment, the major factors used to determine the degree of hazard are gradient, soil characteristics, RMR (Rock Mass Rating), stability interpretation, type of discontinuities, and history of collapse, among others. The likely consequences of slope failure can be determined by considering traffic volume, the number of lanes, and average vehicle risk. We performed such calculations regarding the priority of investment and performed a regression analysis for 392 slopes located in Yeongseo region, Gangwon province. The calculation results show that collapsed slopes have a higher priority for investment, as do slopes with a high proportion of dangerous sections and locations in valleys.

Key words : slope, priority of investment, hazard, consequence, regression analysis

*Corresponding author: hgkim@kict.re.kr
ⓒ 2013, 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

우리나라는 국토의 70%가 산악지역에 해당되어 급경사 지형을 이루는 비탈면이 대부분이며, 산사태나 비탈면 붕괴, 토석류 등에 취약하다. 산사태와 비탈면 붕괴는 많은 인명 피해와 재산 피해를 유발하여 왔다. 1963년 6월 경상남도 거제군 장승포읍에서는 폭풍우에 의한 산사태 발생으로 6채의 가옥이 매몰되고 69명이 압사하는 참사가 있었다. 1999년 9월 부산광역시 황령산에서의 산사태 사고 발생시에에는 20여만톤 이상의 토사가 도로를 덮쳐 시민 4명이 인명피해를 겪은 바 있다. 2002년 8월 태풍 루사와 함께 동반된 국지성 집중호우는 국도 35호선 강릉시 왕산면 대기리-삽당령 구간의 도로비탈면을 붕괴시켰으며 차량 6대가 매몰되었다. 2011년 7월 말에 발생한 국지성 집중호우는 서울의 우면산 지역과 춘천 일대 등의 대규모 산사태를 유발시켜 30명 이상의 인명피해를 발생시켰다. 이렇듯 산사태나 비탈면 붕괴는 자주 발생하는 자연재해·재난이며, 지속적인 유지관리를 통해 체계적으로 관리하여야 할 분야에 해당된다고 할 수 있다. 그러므로 산악지대나 준산악지대에 거주하는 주민들이나 이들 지역을 관통하는 도로를 이용하는 통행자들은 산사태나 비탈면 붕괴와 같은 자연재해에 주의를 기울일 필요가 있다. 이에 정부는 산사태나 비탈면 붕괴에 대한 국민의 관심에 관한 대응을 위해 국가적 차원에서 산사태 재해 예방을 위한 많은 프로그램을 운영하고 있다.

재해에 대한 정확한 인지는 재해 예방 업무를 수행함에 있어 필수요소이다. 재해, 재난 그리고 취약성을 이해함으로서 현재의 상황을 모니터링할 수 있고, 미래의 변화상황을 예견할 수 있다(Chen et al., 2008). 비탈면의 체계적 관리를 위해서는 관리 대상 비탈면이나 산지에 대한 전수조사를 통한 인벤토리(inventory) 구축이 선행되어야 한다. 이를 근거로 조사우선순위를 결정하거나 위험등급을 분류하여 정밀조사 대상을 결정하여야 하며, 전문가의 정밀조사와 안정성 해석을 통해 대책공법이 마련되어야 한다. 그러나 정부의 예산은 한정되어 있기 때문에 대책공법을 결정한 비탈면이라고 할 지라도 모두에 대한 투자를 실시하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 효율적인 투자와 산사태 발생 저감을 위해서는 투자우선순위를 적절히 산정하는 것이 매우 중요하며 이는 국가 예산의 효과적인 분배에 있어 결정적인 역할을 하게 된다.

본 논문에서는 투자우선순위를 결정하는 방법에 대해서 설명하고, 국내외의 비탈면 위험도 평가 방법의 특성을 살펴보고자 한다. 또한 국내외 기준을 참고로 실제 붕괴비탈면의 분석자료를 활용하여 투자우선순위 기법을 결정하고 수정해 온 과정을 설명하고자 한다. 또한 본 논문의 최종적인 투자우선순위 선정 방법을 활용하여 2008년~2012년 기간 동안 정밀조사되었던 강원도 영서지방의 392개소 현장에 대하여 투자우선순위 값을 산출하고, 투자우선순위 총점 분포와 여러 붕괴 관련 인자들과의 통계학적 상관성을 검증해 보고자 한다.

투자우선순위 결정 방법론

투자우선순위 결정시 고려사항

투자우선순위 결정법은 기존의 비탈면 안정성해석 방식과는 많은 차이를 보이고 있다. 비탈면 안정성을 평가하기 위해 사용되는 안전율이라는 개념은 현장자료를 토대로 수치해석을 이용하여 일정한 수치를 산정해 낸다. 그러나 이러한 해석 방식은 경제학적인 피해개념을 고려치 않는 한계점 때문에 비탈면의 투자를 결정하는 기준으로 삼기에는 한계가 있다. 즉, 도심지 내에 위치한 안전율 1.1인 비탈면과 인적이 드문 지역의 안전율이 0.9인 비탈면 중 어디에 투자를 먼저 할 것인가를 결정하는 것은 예상 피해를 고려함으로서 합리적으로 결정할 부분이다.

비탈면에 대한 투자우선순위 결정법은 접근방식에 있어 크게 두 가지로 분류된다. 이는 신뢰성 이론에 바탕을 둔 확률적 접근 방법과 결정론법에 기초한 접근방법으로 나뉜다. 이러한 접근방식들은 각자의 장단점이 있어 자료의 수와 시간 소요 등을 고려하여 어떠한 접근방식이 효과적인가에 대한 판단이 필요하다.

일반적으로 투자우선순위는 붕괴가능성(hazard)와 피해도(consequence)를 고려하여 결정되며, 위험도 평가 분야는 각 국가별, 기관별로 관심 있는 항목과 배점 기준이 다양하다. 따라서 본 논문에서는 국도 비탈면의 투자 관리를 위한 특화된 투자우선순위 배점 기준을 마련하였으며, 신뢰성 이론과 결정론적 방법을 활용한 투자우선순위 기법 개발을 실시하였다.

투자우선순위 결정 방향

투자우선순위의 결정은 비탈면의 붕괴 가능성과 붕괴 발생시 예상되는 피해 비용 규모를 함께 고려해야 한다. 따라서 투자우선순위는 확률로 표현되는 붕괴가능성과 이로 인해 발생하는 비용을 함께 고려할 수 있는 위험

성(risk)이라는 개념에 의해 표현, 결정될 수 있다. 위험성(risk)은 Varnes (1984)와 Einstein (1988)에 의해 개념이 구체화되었으며, Einstein (1988)에 의해 제안되었던 위험성의 개념이 몇 차례의 수정을 거치며 현재 폭넓게 사용되고 있다.

위험성은 원래 구조물의 설계단계에서 고려될 수 있는 여러 개의 대안 중 최종적인 결정을 내릴 때 각 대안들의 모든 가능한 성과들과 비용을 상호 비교, 검토하기 위해 제안되었다. 따라서 위험성은 각 대안의 실패 가능성과 이에 따른 잠재적인 예상 피해를 포함하며, 이러한 개념은 비탈면의 붕괴가능성과 이에 따른 예상피해비용을 감안해야하는 투자우선순위의 결정에도 쉽게 응용될 수 있다.

비탈면의 붕괴 위험성은 붕괴 가능성(hazard)과 비탈면 붕괴시 발생할 수 있는 피해를 금전적으로 계산한 예상피해비용(consequence 또는 damage potential)으로부터 계산되어진다.

붕괴위험성(risk) = f (붕괴 가능성, 예상피해비용) (1)

붕괴 가능성을 산정할 때 신뢰성 이론에 기초한 붕괴확률을 산출하거나 비탈면 안정성에 영향을 미치는 불안정 요인에 대한 가중치를 선정하여 위험도를 평가하는 결정론적 방법이 널리 사용되어 왔다. 신뢰성 이론에 기초한 붕괴 확률은 집중강우나 지진과 같은 비탈면 안정성에 영향을 줄 수 있는 외적 요인과 비탈면 자체가 가지는 특성, 특히 지반강도정수 등과 같이 내적 요인 등 정확하게 도출할 수 없는 파라미터(parameter)에 대한 불확실성 원리에 기초를 두고 평가하는 기법이다. 붕괴 확률을 결정하기 위해서는 각각의 설계정수를 결정하기 위한 많은 수의 자료가 요구되며, 비탈면의 연장, 높이, 경사, 수리조건, 지형조건 등의 비탈면 자체에 대한 자료와 불연속면의 방향, 경사, 간격, 연장성 등 특성에 관한 자료를 취합하고 적절한 통계처리가 병행되어야 한다. 이를 통해 붕괴확률을 확률론적으로 해석하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션, 1차신뢰성 해석방법(FOSM), 점추정법(PEM) 등과 통계처리 해석이 병행되고, 이를 통해 붕괴함수 값을 얻어야 한다.

붕괴확률을 산출하는 방식은 여러 형태의 붕괴요인과의 연관성을 고려할 수 있다는 점과 붕괴확률과 예상피해비용을 고려하는 방식의 접근 개념이며 구조물의 설계 단계에서 고려되는 여러 대안들의 비교와 분석이 쉽고 의사결정의 근거로 제시할 수 있기 때문에 비탈면의 평가시 사용된 사례가 많은 접근 방법 중에 하나이다. 그러나 붕괴확률의 계산을 위해서는 많은 수의 자료를 통계 처리함으로써 얻어지는 각 설계정수들의 확률특성(평균, 표준편차, 확률분포곡선 등)을 입력자료로 이용해야 한다. 따라서 각 설계정수들에 대한 정확한 확률특성을 얻기 위해서는 통계분석을 수행하기 위한 자료가 충분히 획득되어야 한다. 그러나 통계분석의 수행을 위한 충분한 자료의 획득은 많은 시간과 재원을 필요로 하며 도로비탈면 투자우선순위의 결정과 같은 전 국토에 산재한 비탈면을 대상으로 하는 큰 규모의 과제에서는 활용되기가 힘든 형편이다. 따라서 붕괴확률의 이용은 주로 소규모의 한정된 지역에서 자세한 조사 결과를 요구하는 과제에서 주로 이용된다.

국도 비탈면에 대한 관리가 처음 시작되었던 1998년에는 신뢰성 이론에 기초한 접근 방법으로 위험도를 결정하였다. 또한 순편익 순서와 편익·비용비 순서를 내림차순으로 정리하여 예산을 집행할 수 있는 근거를 마련한 바 있다(KICT, 1998) (Table 1). 그러나 자료의 기하급수적인 증가로 인하여 데이터 처리에 있어 소요되는 시간 문제가 발생하면서 신뢰성 이론 접근 방법으로 비탈면을 관리하는 것이 현실적으로 어려워졌다. 따라서 투자우선순위 산출 방식에 대한 방향을 결정론적 방법으로 선회하였으며, 이를 결정하기 위하여 해외의 평가사례, 국내의 평가사례에 대한 검토를 실시하였고, 2001년의 정밀조사 자료를 바탕으로 붕괴발생비탈면과 그렇지 않은 비탈면에 대한 자료를 평가하여 투자우선순위 항목을 결정하였다.

결정론적 투자우선순위 결정 기법 개발

국내외 위험도 평가법

비탈면 안정성에 영향을 미치는 불안정 요인에 대한 가중치를 선정하여 위험도를 평가하는 결정론적 방법을 이용한 평가법이 여러 나라에서 폭 넓게 사용되고 있으며, 각 나라의 고유한 목적과 각국의 지형 및 지질 특성에 따라 평가방법을 특화시켰다. 본 논문에서는 비탈면 불안정성을 평가하기 위한 인자를 선정함에 있어 해외 및 국내의 위험도 평가방법을 확인하였고, 이들 중 우리나라의 비탈면 평가를 위해 필요한 주요 인자를 참고하였다.

홍콩의 비탈면 안전도 평가법은 홍콩 전역에 산재한 불안정 비탈면에 대해서 장기적인 계획 하에 비탈면붕괴에 대한 예방과 대책을 강구하기 위한 것으로 위험도가 높은 비탈면을 분류하여 순위를 부여하고 순위에 따

Table 1. Hazard factor items for calculating the priority for investment, based on reliability theory developed in 1998 (KICT, 1998).

Items		Score				
		1	2	3	4	5
(1)Gradient of slope	Natural	≦ 20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	≧ 45°
	Soil, Composite	≦ 30°	31°-40°	41°-50°	51°-60°	≧ 61°
	Rock	≦ 40°	50°	60°	70°	≧ 80°
(2)Side shape of slope		Parallel	Slightly rising	Rising	Slightly descending	Descending
(3)Road shape of slope		Convex type	Slightly linear type	Linear type	Slightly concave type	Concave type
(4)Height		≦ 10 m	≦ 25 m	≦ 50 m	≦ 100 m	≧ 101 m
(5)Relative position		≦ 2/10	3-4/10	5-6/10	7-8/10	9-10/10
(6)Gradient of upper slope		≦ 20°	21-30°	31-40°	41-45°	≧ 46°
(7)Gradient of lower (embankment) slope		≦ 3°	4-10°	11-20°	21-25°	≧ 26°
(8)Natural slope		Nothingness	Simple	Normal	Complex	Very complex
(9)Artificial slope		Nothingness	Simple	Normal	Complex	Very complex
(10)Road		4 lane	3-4 lane	3 lane	2-3 lane	2 lane
(11)Other structure		Nothingness		Negligibility		Existence
(12)Rock type		Quartzite	Sedimentary rock	Igneous rock	Metamorphic rock	Non-cementation rock
(13)Soil type		Clay	Cohesive soil	Sandy soil	Granitic saprolite	Colluvial soil
(14)Joint/Discontinuities		Nothingness	Bedding	Joint	Fault	Fault breccia zone
(15)Geological structures		Non-persistent joint (other)	Non-persistent joint (slope-direction)	Persistent joint (slope-reverse direction)	Persistent joint (irregular direction)	Persistent joint (slope-direction)
(16)Weathering grade		Fresh	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Completely weathered
(17)Activity		Nothingness	Slight possibility	Possibility	Strong possibility	Collapse
(18)Vegetation		Non-stocked forest	Flood retarding forests	Shrub	Medium-size hardwood	Small-size hardwood
(19)Vegetation density		Very high	High	Normal	Low	Very low
(20)Drain		Existence	Slightly damaged	Moderately damaged	Highly damaged	Nothingness
(21)Valley		Nothingness	Low possibility of catchment	Possibility of catchment	High possibility of catchment	Catchment
(22)In-depth drainage		Complete drainage	Incomplete drainage	Existence of drain	Poor drain	Nothingness
(23)External erosion (surface water)		Nothingness	Low possibility	Possibility of erosion	High possibility	Very high possibility
(24)Internal erosion (flowing out water)		Nothingness	Flowing out on upper part of slope	Flowing out on middle part of slope	Flowing out on middle-lower part of slope	Flowing out on lower part of slope
(25)Surface drainage		Complete drainage	Incomplete drainage	Existence of drain	Poor drain	Nothingness

라 대책의 우선권을 부여함으로써 빠른 시간 내에 많은 위험비탈면을 안정화시킬 목적으로 작성되었다(Koirala and Watkins, 1988). 이 평가법은 비탈면의 붕괴로 예상되는 피해 비용의 산출과 붕괴 가능성의 산정이라는 두 가지 과정으로 이루어져 있다. 피해예상정도는 구조물의 비탈면에 대한 인접성과 구조물의 종류 등과 같은 요인

을 고려함으로서 붕괴에 의한 생명과 재산의 손실에 대한 피해로 산정하였으며, 붕괴가능성은 비탈면의 기하학적 요인, 비탈면의 구성물질, 지하수 같은 요인들을 고려하였다.

일본의 경우 건설성, 도로공단, 국철 등이 각 기관의 필요성과 구조물의 특성에 따라 나름대로의 안전성 평가법을 개발하여 사용하고 있다. 이 중 비탈면을 대상으로 작성한 건설성의 평가법과 암반비탈면을 대상으로 작성된 일본 국철의 안전성 평가법이 국내의 실정과 매우 유사하였다. 일본 건설성의 평가법은 일본 전역의 1,673개소의 붕괴 또는 붕괴되지 않은 비탈면을 대상으로 각종 요인분석과 수량화 해석을 통해 비탈면의 안정에 영향을 주는 요인을 선정하여 가중치를 배점하는 방식으로 개발되었다 (JHPC, 1986). 그러나 이 방법은 암종에 대한 평가법이 국내 실정에 적합하지 않으며, 대부분의 평가가 주관적인 판단에 좌우되는 것들이 많아 작성자에 따라 다른 결과를 보일 수 있는 가능성을 배제할 수 없다.

호주에서는 호주 빅토리아주의 한 지역을 상대로 인공 비탈면 및 자연비탈면에 대한 안정성 평가법을 수행하였고, 비탈면의 경사각, 식생 상태, 비탈면 상태, 강우, 절리 등 9개 요소로 구분하여 점수를 정하고 이를 합산하여 안정성 평가에 이용하였다(Joyce and Evan, 1974). 그러나 이 평가법은 너무 단순하여 개략적인 평가이외에 사용되기엔 무리가 있다고 판단되었다.

미국의 연방도로국에서는 낙석위험을 판정하기 위한 RHRS (Rockfall Hazard Rating System) 기법을 개발하였다(Pierson, 1991). RHRS 기법은 비탈면 높이, 낙석흡수도랑, 평균차량위험도, 도로폭, 지질적 특성, 암크기, 기후, 낙석 이력 등의 항목에 대해 각각 0~100점까지의 점수를 부여했다. RHRS 기법의 검증을 위해 약 3,000개 이상의 비탈면을 대상으로 적용성 평가를 시행했으며, 이 평가법은 특히 암반 비탈면의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 지질적 요인과 절리면의 특성을 붕괴요인으로 강조함으로서 다른 평가법과 차이를 보이고 있다.

우리나라에서 비탈면에 대한 안정성 평가법은 Choi (1986)에 의해 시도되었다. Choi (1986)의 평가법은 기붕괴된 317개 비탈면에 대한 붕괴면적을 횡단면형상, 경사길이, 경사도, 붕괴위치, 모암, 종단면형상과의 연관성과 연결시켜 각각의 인자에 점수를 부여했다. 이 평가법은 비탈면의 형상을 중요시하여 횡단면 및 종단면의 형상을 붕괴인자로 고려하였으나 지질적 요인에 대한 검토가 미흡했다. 국내 고속도로 비탈면에 대한 안정성 평가방법은 You (1997)에 의해 시도되었다. You (1997)는 220여 개소의 고속도로 비탈면에 대한 현장조사 자료를 토대로, 붕괴요인으로 추정되는 인자들에 대한 통계분석을 실시하였고, 이를 기초로 하여 비탈면 안정성 평가법을 제시하였다. 특히, You (1997)는 국내의 지질특성과 붕괴유형과의 연관성을 심도있게 연구하였으며 이를 토대로 안정성 평가법에서 지질적 요인에 대한 배점을 가장 큰 비율로 배정했다. 그러나 비경험자나 비전문가도 위험비탈면을 쉽게 판정할 수 있도록 한다는 취지에서 개발된 이 방법은 일부 항목의 경우 판단기준이 애매한 경우와 주관적인 판단에 의존하는 문제점을 가지고 있었다.

투자우선순위 평가항목 선정

비탈면의 안정성 평가를 위한 항목은 비탈면 안정에 직간접적으로 영향을 미치는 인자들을 중점적으로 검토하여 선정하여야 한다. 이를 위해 붕괴위험요인으로 추정되는 여러 인자들을 중심으로 본 논문에서 수집되어진 현장조사자료와 그 데이터베이스를 이용하여 상관관계를 분석해 보았다. 이러한 상관관계의 분석을 위험도 평가법의 항목 선정에 이용하였으며 기존의 평가법 중 암반비탈면에 적용이 타당하다고 생각되는 다섯 가지 방법들(홍콩, 일본 국철, 일본건설성, RHRS, 유병옥)의 항목들과 배점을 비교했다(Table 2).

비탈면의 높이와 용수 유무의 항목은 모든 평가법에서 붕괴위험요인으로 선정되었다. 그 밖에 비탈면의 경사, 암석의 종류, 풍화정도, 집수지형 등이 4차례씩 반복되었으며, 절리방향, 비탈면 형상, 비탈면보호공이 각각의 방법에서 3차례씩 반복하여 선정되었다. 따라서 이러한 요인들이 비탈면의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인으로 고려될 수 있으며 이 요인들을 위험도 평가법에 먼저 반영하였다.

1999년의 연구에서는 1998년, 1999년 기간동안 정밀조사를 수행한 자료를 바탕으로 붕괴에 대한 원인을 분석하여 위험도 평가법 항목을 선정하였다. 초기 연구에서 위험도 평가항목으로 선정하였던 요인은 비탈면 높이, 비탈면 경사, 주절리 방향과 비탈면 방향과의 차이, 주절리의 경사, 두 개의 절리가 이루는 교차선의 방향과 비탈면 방향과의 차이, 교차선이 경사, 절리특성, 용수유무, 비탈면 형상, 상부비탈면 경사, 붕괴이력, 불연속면의 종류의 총 12개이다. 각 인자의 최고 배점은 10~65점으로 매우 다양하였고, 각 인자의 최고 배점만을 모아

Table 2. Comparison of score and ratio for each item among five methods.

Items & Country	Pierson (1991)		Railway manage Office (JHPC, 1986)		Construction agency (JHPC, 1986)		Koirala & Watkins (1998)		You (1997)	
	USA		Japan		Japan		Hongkong		Korea	
	Score	Ratio	Score	Ratio	Score	Ratio	Score	Ratio	Score	Ratio
Height	81	12.5%	3	18.8%	4	5.9%	15	10%	30	8.6%
Gradient			2	12.5%	5	7.4%	20	13.3%	20	5.7%
Direction of joint	81	12.5%					5	3.3%	40	11.4%
Dip of joint									30	8.6%
Weathering grade	81	12.5%	4	25%			10	6.7%	20	5.7%
Rock type			2	12.5%	10	14.7%	15	10%	30	8.6%
Cracks status					2	2.9%			10	2.9%
Fault									10	2.9%
Rock strength					3	4.4%			10	2.9%
Geology			2	12.5%					30	8.6%
Leakage	81	12.5%	2	12.5%	2	2.9%	15	10%	10	2.9%
Soil properties					8	11.8%			10	2.9%
Joint properties	162	25%							20	5.7%
Valley	81	12.5%	1	6.3%			5	3.3%	10	2.9%
Shape of slope					2	2.9%	20	13.3%	10	2.9%
Upper slope gradient							15	10%	10	2.9%
History of failure	81	12.5%							20	5.7%
Countermeasure					30	44.1%	30	20%	30	8.6%

서 합산하면, 위험도평가 총점이 330점에 달하였다 (KICT, 1999).

예상피해도 점수는 국도 비탈면의 실질적인 붕괴 발생시 예상되는 피해인 차량파손, 인명손실, 도로폐쇄에 따른 간접적인 피해 등에 초점이 맞추어졌다. 직접적인 피해는 비탈면의 붕괴에 의해 암편들이 도로로 침입함에 따라 발생하는 인명피해나 차량의 파손 등을 고려할 수 있다. 반면 간접적인 피해는 비탈면의 붕괴로 인한 도로폐쇄 등에 의해 발생하는 시간 및 금전적 손실 등을 고려할 수 있다. 직접적인 피해를 고려하는 항목으로는 평균 차량위험도(Average Vehicle Risk)와 이격거리를 사용했으며 간접적인 피해 항목으로는 교통량과 도로의 폭을 고려했다. 예상피해도 항목으로 사용된 상기 4가지 요인의 최고점은 20~30점에 해당되며, 각 인자의 최고 배점만을 모아서 합산하면, 예상피해도평가 총점은 100점에 해당된다.

즉, 투자우선순위 최고 총점은 430점이었으며, 위험도평가 총점과 예상피해도평가 총점의 비율은 3.3:1.0이었다. 초기에 선정되었던 투자우선순위 평가표는 위험도평가의 배점이 상대적으로 매우 높았다. 초기인 1998년과 1999년도는 국도 비탈면에 대한 정비가 시작 단계에 해당되는 시기였고, 도심지나 산악지 모두 위험비탈면이 산재되어 관리되었던 기간이었다. 따라서 초기 기간 동안에는 거의 모든 비탈면에 대한 투자가 이루어졌으므로 투자우선순위를 산출한다는 것이 큰 의미가 없었으므로 연구적인 목적 이외에 실질적인 적용은 미미했다.

결정론적 투자우선순위 평가법 개발

현재 사용 중인 투자우선순위 형태를 마련한 것은 2001년도였다(KICT, 2002). 이전 연구와 정밀조사를 통해 축적된 자료를 바탕으로 각각의 정밀조사 주요 항목에 대한 중요도를 조정하게 되었고, 일부 항목들에 대한 가·감 및 가중치에 대한 수정보완이 이루어졌다. 2001년도에 마련된 투자우선순위는 크게 토사비탈면과 암반비탈면으로 구분하였으며, 12개의 위험도인자와 4개의 피해도 인자로 구성하였다(Table 3). 2001년 연구의 위

Table 3. Comparison between 2001 and 2002 research into Priority factor for Investment.

		Soil slope		Rock slope	
	Item \ Year	2001	2002	2001	2002
Hazard factor	Total score	295	100	290	100
	Height of slope	40	8	30	5
	Gradient of slope	60	14	40	8
	Length of slope	none	3	none	3
	Depth of Soil layer	none	6	none	6
	Groundwater	20	6	20	6
	Valley	15	5	10	5
	Gradient of upper slope	10	3	10	3
	Collapse history	20	6	20	6
	Discontinuities besides joint	20	7	20	7
	Soil material	30	10	-	-
	RMR	-	-	60	19
	Analysis of stability	30	10	30	10
	Ratio of dangerous section	none	3	none	3
	Importance of countermeasure	none	3	none	3
	Status of slope protection	20	6	20	6
	Investigator's risk	30	10	30	10
Consequence factor	Total score	70	100	70	100
	Traffic volume	20	25	20	25
	AVR	20	25	20	25
	Lane	10	15	10	15
	Separation distance	20	25	20	25
	Investigator's hazard	none	10	none	10

험도인자는 비탈면 높이, 비탈면 경사, 지하수, 계곡부, 상부자연비탈면 경사, 붕괴이력, 불연속면 종류,안정성해석, 보호시설상태, 주관적위험도로 이루어지며, 토사비탈면에서는 토질, 암반비탈면에서는 RMR (Rock mass rating)을 각각 구분하여 채택했다. 토사비탈면은 위험도 총점이 295점이었으며, 암반비탈면은 위험도 총점이 290점으로 토사비탈면을 상대적으로 배점이 높게 부여했다. 피해도인자자는 교통량, 평균차량위험도, 도로차선수, 이격거리, 주관적 피해도로 구성되며, 비탈면의 종류와 관계 없이 동일한 배점을 부여하였다.

위험도인자의 선정 적정성을 확인하기 위하여 2001년도의 정밀조사 현장을 대상으로 간단한 분석을 실시하였다. 정밀조사 현장 수는 총 362개소이며, 크게 붕괴비탈면과 미붕괴비탈면으로 구분하였다. 검토 비탈면 중 토사비탈면은 8개소에 불과하여 토사비탈면에 대한 분석을 따로 수행하기에는 개체수가 너무 부족하다고 판단했다. 따라서 구성재료에 관계없이 비탈면 높이, 비탈면 경사, 지하수상태, 불연속면의 종류, RMR 등에 대하여 붕괴비탈면과 미붕괴비탈면의 상대적 비율을 검토하였다 (Fig. 1).

높이의 경우, 20 m 이상의 비탈면에서 붕괴가 상대적으로 많이 발생되었던 것으로 확인되며, 경사는 45~63° 범위의 비탈면이 붕괴 비율이 높은 것으로 확인되었다. 특히 지하수 상태의 경우, 젖음이나 흐름의 경향을 가지는 비탈면이 붕괴가 많이 발생되었던 것으로 확인되며, 단층과 파쇄대가 발달한 비탈면이 붕괴에 취약한 것으로 확인된다. RMR은 붕괴비탈면의 83.0%가 III, IV, V등급에 해당되는 것으로 파악된다. 이를 종합적으로 판

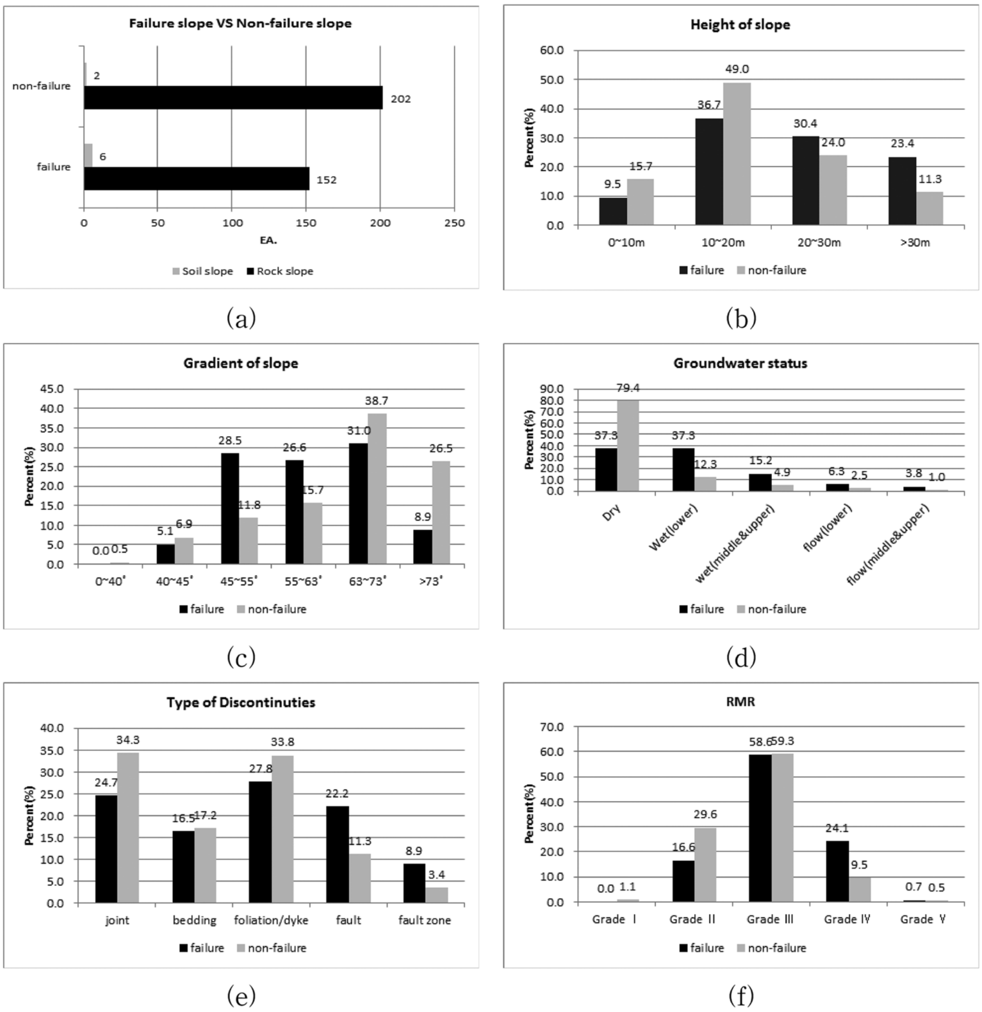

Fig. 1. Comparison between failure slope and non-failure slope.

단하면, 우리나라의 암반비탈면은 높이가 20 m 이상이고, 경사가 45° 이상으로 조성되고 있으며, 지하수가 관찰되고 단층이나 파쇄대가 발달하는 III~V등급 분류에 해당되는 비탈면이 취약하다고 요약할 수 있다.

2001년의 투자우선순위 산출방식은 구성재료별 배점 차이, 총점 비교 측면에서의 점수의 이해도에 있어 어려움이 있었으므로 이에 대한 보완이 필요했다. 또한 2002년도 연구에서는 2001년의 투자우선순위에서 고려하지 않았던 인자들이 일부 추가되었다(KICT, 2003). 비탈면 길이는 대책공법을 적용하는 데 있어 투자되는 비용을 산출하는 데 중요한 역할을 하는 상황이었으므로 이에 대한 추가가 필요했다. 깎기 공법을 대책공법으로 제시할 때 50 m 길이의 비탈면과 150 m 길이의 비탈면은 대책공사비용 측면에서 큰 차이를 가지기 때문이다. 비탈면 길이와 연관하여 위험구간 비율은 위험구간을 중심으로 부분적으로 적용되는 계단식옹벽, 돌망태옹벽, 앵커 등을 적용하는 상황에서 대책공사 비용을 좌우하는 부분이 있었으므로 이를 추가로 고려하게 되었다. 호우기 기간 동안 토사비탈면이 아니더라도 토층이 형성된 부분의 암반비탈면에서도 중소규모 붕괴가 발생되는 상황을 고려하여 토층심도 항목을 새롭게 추가하였다. 또한 적용이 되어야 할 대책공법이 안전율을 확보하기 위한 보강공법이냐, 비탈면의 단순 피해를 예방하기 위한 보호공법이냐를 구분하여 이에 대한 항목을 추

Table 4. Hazard factor and score of priority for investment.

Hazard Factor						
Height of slope	**≦ 10 m**	**≦ 20 m**	**≦ 30 m**	**> 30 m**		
Score (Soil slope)	2	4	6	8		
Score (Rock slope)	0	1	3	5		
Gradient of slope	**≦ 1:1.2 (40°)**	**≦ 1:1 (45°)**	**≦ 1:0.7 (55°)**	**≦ 1:0.5 (63°)**	**≦ 1:0.3 (73°)**	**> 1:0.3**
Score (Soil slope)	0	2	5	8	11	14
Score (Rock slope)	0	0	2	4	6	8
Length of slope	**≦ 100 m**	**100~200 m**	**≧ 200 m**			
Score	1	2	3			
Depth of Soil layer	**≦ 0.5 m**	**0.5~1 m**	**1~2 m**	**≧ 2 m**		
Score	0	2	4	6		
Groundwater	**Dry**	**Wet (lower)**	**Wet (middle,upper)**	**Flow (lower)**	**Flow (middle,upper)**	
Score	0	2	4	4	6	
Valley	**Nothing**	**Existence**				
Score	0	5				
Gradient of upper slope	**< 0°**	**0°**	**≦ 20°**	**> 20°**		
Score	0	1	2	3		
Collapse history	**Nothing**	**Rockfall**	**Existence**			
Score	0	3	6			
Discontinuities besides joint	**Nothing**	**Bedding**	**Foliation/Dyke**	**Fault**	**Fracture zone**	
Score	0	1	3	5	7	
Soil material (※ Soil Slope)	**Clay**	**Cohesive soil**	**Sandy soil**	**Granitic Soil**	**Colluvial soil**	
Score	2	4	6	8	10	
RMR (※ Rock Slope)	**Score = 19 – (RMR × 0.19)** (※ Rock Slope)					
Analysis of stability	**Planar Failure + Wedge Failure + Circular Failure**					
	Stability	**Instability**				
Score (Planar failure)	0	5				
Score (Wedge failure)	0	5				
Score (Circular failure)	0	10				
Ratio of dangerous section	**≦ 20%**	**20~50%**	**≧ 50%**			
Score	0	2	3			
Importance of countermeasure	**Non-countermeasure**	**Rockfall control method**	**Resistance method**			
Score	0	2	3			
Status of slope protection	**Existence**	**Partial damage**	**Nothing**			
Score	0	3	6			
Investigator's risk	**Nothing**	**Normal**	**Dangerous**	**Very dangerous**		
Score	0	3	6	10		

가하였다. 마지막으로 피해도 부분에서도 주관적인 기준을 부여하여 피해도 배점 항목을 소폭 조정하였다.

2002년 연구를 통해 개선된 위험도인자는 총 16개이며, 피해도 인자는 5개이다. 또한 토사비탈면과 암반비탈면

Table 5. Consequence factor and score of priority for investment.

<table>
<tr><th colspan="13">Consequence Factor</th></tr>
<tr><td>Traffic volume</td><td colspan="2">≦ 5000</td><td colspan="3">5001~10000</td><td colspan="2">10001~20000</td><td colspan="3">20001~30000</td><td colspan="2">> 30000</td></tr>
<tr><td>Score</td><td colspan="2">0</td><td colspan="3">10</td><td colspan="2">15</td><td colspan="3">20</td><td colspan="2">25</td></tr>
<tr><td>AVR</td><td colspan="2">≦ 25</td><td colspan="3">26~50</td><td colspan="2">51~75</td><td colspan="3">76~100</td><td colspan="2">> 100</td></tr>
<tr><td>Score</td><td colspan="2">0</td><td colspan="3">10</td><td colspan="2">15</td><td colspan="3">20</td><td colspan="2">25</td></tr>
<tr><td>Lane</td><td colspan="4">≧ 4 lane</td><td colspan="4">3 lane</td><td colspan="4">≦ 2 lane</td></tr>
<tr><td>Score</td><td colspan="4">0</td><td colspan="4">8</td><td colspan="4">15</td></tr>
<tr><td>Separation distance</td><td colspan="3">> 5 m</td><td colspan="3">5~3 m</td><td colspan="3">3~1 m</td><td colspan="3">< 1 m</td></tr>
<tr><td>Score</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">15</td><td colspan="3">20</td><td colspan="3">25</td></tr>
<tr><td>Investigator's hazard</td><td colspan="3">Nothing</td><td colspan="3">Normal</td><td colspan="3">Dangerous</td><td colspan="3">Very dangerous</td></tr>
<tr><td>Score</td><td colspan="3">0</td><td colspan="3">3</td><td colspan="3">6</td><td colspan="3">10</td></tr>
</table>

의 위험도 배점을 총 100점으로 조정하여 피해도 인자와의 상대적 비율을 1:1이 되게 하였다(Table 3).

최종적으로 투자우선순위 결정을 위하여 사용되는 인자와 각 인자간의 취득 데이터의 범위, 이에 따른 점수 등에 평가표는 Table 4, Table 5와 같다. 각 인자들의 평가항목은 항목에 따라 2~6개로 다양하며, 항목별 배점 차이는 임의로 결정하였다.

2009년 연구 이전의 투자우선순위 산출방식을 살펴보면, 위험도와 피해도는 각각 100점 만점으로 되어 있다. 그러나 이와 같은 운영 결과 피해도가 너무 과대평가되고 있어, 위험도가 높은 비탈면들이 장기간 안정화 공법 적용 없이 방치되는 사례가 종종 발견되었다. 이를 보완하기 위하여 2009년 연구에서부터는 위험도는 120점 만점이 되게, 피해도 역시 80점 만점이 되도록 가중치를 두었으며, 이로 인한 총점을 바탕으로 투자우선순위를 선정하도록 수정하였다(KICT, 2010). 따라서 이 후 설명될 표에 나타난 최고 점수를 위험도와 피해도 별로 각각 더하면 각각 100점이 만점이 되게 되며, 가중치를 두어 최종 점수를 결정하는 방식을 택하였다.

투자우선순위 총점(200점) =
{위험도(100점) × **1.2**} + {피해도(100점) × **0.8**} (2)

통계학적 분석 및 고찰

결정론적 방법에 의해 선정된 투자우선순위의 적용성을 통계적인 검증을 통해 확인하였다. 대상지역은 강원도 영서지방의 비탈면 중 2008년~2012년 기간 중에 정밀조사가 수행되었던 392개소 비탈면으로 제한시켰다. 강원도 영서지역의 주요 행정지역은 철원, 화천, 양구, 인제, 춘천, 홍천, 횡성, 원주, 영월, 정선 등지이며, 이들 지역의 국도는 홍천국토관리사무소와 정선국토관리사무소에서 관리 중에 있다. 현재까지 파악된 국도 비탈면은 총 29,757개소이며, 검증 지역 내 비탈면의 총 개소는 4,296개소로 14.4%를 점한다. 정밀조사를 수행한 비탈면은 주로 해빙기 기간 중 낙석이 발생하였거나 수해 피해가 발생된 비탈면, 붕괴는 발생되지 않았지만 위험성이 존재한다고 판단되는 현장에 해당된다.

분포도를 확인해 본 결과 피해도는 C등급에서 약간 좌측으로 치우치는 경향을 가지며, 위험도는 C등급을 중심으로 약간 우측으로 치우치는 경향을 가진다. 그러나 위험도, 피해도, 총점의 전반적인 분포는 전반적으로 정규분포에 가까운 형태를 보이고 있어 가점을 부여한 상태의 자료의 신빙성은 충분히 확보되어 있다고 할 수 있다(Fig. 2).

D등급과 E등급에 해당되는 비탈면은 반드시 정비가 필요하다고 가정하였을 때, 총점에 대비하여 정비가 요구되는 현장은 54개소이다. 단, 위험도만을 감안하였을 때는 96개소로 급증한다. 위험도라는 항목은 실제 비탈면의 붕괴가능성을 나타내는 점수이므로 96개소 현장에 대해서는 비록 피해도가 낮다고 할지라도 지속적인 감시가 필요하다고 할 수 있을 것이다.

392개에 대하여 붕괴 및 붕괴 요인을 변수로 다중회귀분석을 수행하였다. 비탈면의 붕괴요인으로는 내적요인과 외적요인으로 볼 수 있는데, 외적요인인 주변 환경 및 자연재해(태풍 등)은 고려하지 않았다. 내적요인으로는 투자우선순위를 결정하는 비탈면의 길이, 높이, 경사, 지하수, 붕괴이력, 계곡부 등으로 고려하였다. 회귀분석

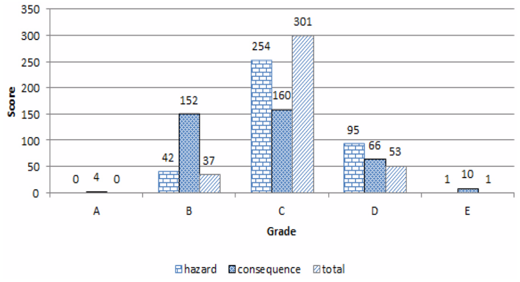

Fig. 2. Distribution of hazards, consequences, and total score of priority for investment in West Gangwon Province.

을 하기 위해서 종속변수는 붕괴점수를 사용하였으며, 독립변수는 내적요소로 사용하였다.

본 해당 조사구역 비탈면에 대한 회귀분석 결과 각 인자들에 대한 다중 상관계수는 0.738이고, 조정된 결정계수는 0.535로 다소 상관관계도가 높지 않게 산출되었다(Table 6). 분산분석결과 유의한 F는 8.26E-61로 유의수준 0.05 보다 유의확률이 작으며(Table 7), 각 독립변수 인자들의 P-값은 0.05보다 작기에 회귀계수가 통계적으로 사용가능하다는 것을 보여준다. 유의확률은 귀무가설을 기각할 수 있는 최소의 유의수준을 의미하기 때문에 유의확률이 커질수록 통계적 분석 결과의 신뢰도가 낮아지게 된다.

투자우선순위를 결정하는 각 요소(길이, 높이, 경사, 지하수, 계곡부, 붕괴이력, 위험구간비, 불연속면)에 대하여 다중회귀분석을 통해 계수 값을 분석해 보았다. 분석결과 다음의 회귀식이 도출되었다.

Table 6. Results of regression analysis.

Multiple correlation coefficient	0.738455
Coefficient of determination	0.545316
Coordinated coefficient of determination	0.535793
Standard error	8.137516
The number of site	392

$$PI = 10.38 + 0.011L + 0.17H + 0.27G + 1.67GW + 1.49V + 2.94HF + 2.50RD + 1.33D \quad (3)$$

여기서, PI = 투자우선순위, L = 길이, H = 높이, G = 경사, GW = 지하수, V = 계곡부, HF = 붕괴이력, RD = 위험구간비, D = 불연속면

분석결과 붕괴이력(HF : 2.94), 위험구간비(RD : 2.50), 불연속면(D : 1.33)은 높은 계수 값을 나타냈으며(Table 8), 이는 붕괴에 중요한 인자로 적용되어지고 있다는 것을 보여주고 있다. 반대로 길이, 높이, 경사는 계수값이 상대적으로 작은 값으로 도출되었으며, 이는 상대적으로 붕괴에 영향을 다소 적게 미친다는 것을 의미한다.

본 논문의 투자우선순위는 국도 비탈면의 정비의 기준으로 현재 적용 운영되고 있는 분야이다. 투자우선순위는 다년간 축적된 자료와 붕괴 비탈면을 중심으로 분석된 특성을 활용하여 결정된 항목으로 구성되어 있으

Table 7. Analysis of variance.

	Degrees of freedom	Square sum	Square mean	F proportion	Significance probability F
Regression	8	30337.85	3792.231	57.26788	8.26E-61
Residual	382	25295.72	66.21917		
Total	390	55633.57			

Table 8. Values of each factor calculated from multiple regression analysis.

	Coefficient	Standard error	t statistic	P-value
Y-intercept	10.38378	3.404951	3.049612	0.002451
Length	0.01164	0.006366	1.828445	0.068262
Height	0.176685	0.030472	5.798235	1.41E-08
Gradient	0.277027	0.038623	7.172678	3.84E-12
Groundwater	1.67672	0.238842	7.020221	1.02E-11
Valley	1.492752	0.195255	7.645124	1.71E-13
History of failure	2.946718	0.257202	11.45682	2.53E-26
Ratio of dangerous section	2.50498	0.393649	6.363491	5.65E-10
Discontinuities	1.334398	0.148887	8.962474	1.43E-17

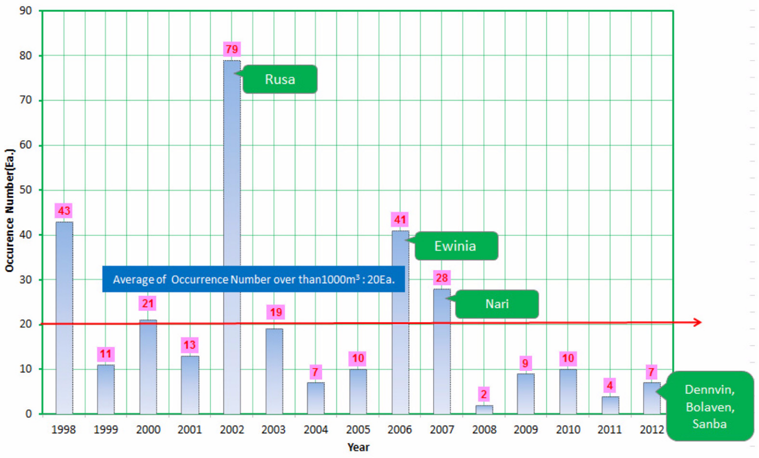

Fig. 3. Occurrence number and scale of cut-slope failures (> 1000 m^3) relating to major typoon.

며, 지속적인 수정, 보완 과정을 거쳐 오늘날에 이르고 있다. 투자우선순위에 근거한 정비를 통해 현재 1,000 m^3 이상의 중대규모 비탈면의 붕괴 횟수는 확연히 줄어 들었다(Fig. 3) (Kim, 2013).

앞선 회귀분석에서 보여준 바와 같이 현재 사용하고 있는 항목별 배점 기준에 대한 추가적인 보완에 대한 후속 연구가 필요하다고 할 수 있다. 즉 통계분석을 통해 높은 결정계수 값을 가지는 요인에 대한 배점 기준을 보다 강화하고, 계수값이 상대적으로 낮게 나타나는 경우에는 배점 기준을 하향 조정할 필요가 있다고 판단된다. 국가별, 기관별로 산사태나 비탈면을 평가하는 항목수의 차이는 크게 중요한 요소가 아닐 수도 있다. 비탈면 평가항목이 많으면 많을수록 중요한 요인은 다른 요인들에 의해 희석되는 경향을 가지며, 비탈면 평가항목수가 너무 적으면 데이터로서의 신뢰성 측면에서 지적을 받을 수 있다. 따라서 본 논문의 제안방법이 적절한 평가방법이라고 자신하기에는 다소 부족한 면이 있다. 본 논문의 투자우선순위 평가방법은 국도 비탈면에 한정되어 작성된 내용이기는 하지만, 국도 외 다른 도로, 주요 건물, 댐, 저수지 등과 수반되어 나타나는 비탈면에서도 적절히 변형시켜 응용할 수 있으리라 기대한다.

References

Chen, S. C., Ferng, J. W., Wang, Y. T., Wu, T. Y., and Wang, J. J., 2008, Assessment of disaster resilience capacity of hillslope communities with high risk for geological hazards, Engineering Geology, 98, 86-101.

Choi, G., 1986, Study on collapse factor and prediction of landslide in Korea, PhD thesis, Gangwon national univesity, Korea, 49p. (in Korean with English Abstract)

Einstein, H. H., 1988, Special Lecture, Landslide risk assessment, Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne, 2, 1075-1090.

JHPC, 1986, Guidance for Slope stability and countermeasure of road, Japan Road Association, 434p.

Joyce, E.B. and Evans, R.S., 1974, Annual report on landslides and other mass movements occurring in Victoria, Australia, to February 28th 1974. Australia - New Zealand UNESCO working group on landslides and other mass movements, 34p.

KICT, 1998, Development and operation of road cut slope management system I, 228p. (in Korean)

KICT, 1999, Development and operation of road cut slope management system II, 193p. (in Korean)

KICT, 2002, Development and operation of road cut slope management system IV, 302p. (in Korean)

KICT, 2003, Development and operation of road cut slope management system in 2002, 302p. (in Korean)

KICT, 2010, Development and operation of road cut slope management system in 2009, 336p. (in Korean)

Kim, S. H., 2013, Study on behavior characteristics and systematic maintenance of road slopes in Korea, PhD thesis, Pusan national university, Korea, 363p. (in Korean with English Abstract)

Koirala, N. P. and Watkins, A. T., 1988, Bulk appraisal of slopes in Hongkong, Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne, 2, 1181-1186.

Pierson, L. A., 1991, Rockfall hazard rating system, Oregon Department of transportation, 15p.

Varnes, D. J., 1984, Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, UNESCO, 63p.

You, B. O, 1997, Study on stability analysis and countermeasure of rock slopes, PhD thesis, Hanyang university, Korea, 334p. (in Korean with English Abstract)

원고접수일 : 2013년 8월 23일
수정본채택 : 2013년 9월 23일
게재확정일 : 2013년 9월 23일

김승현
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel : 031-910-0524
Fax : 031-910-0561
E-mail : sshkim@kict.re.kr

김홍균
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0531
Fax: 031-910-0561
E-mail : hgkim@kict.re.kr

옥영석
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel : 031-910-0101
Fax : 031-910-0561
E-mail : beauguy@kict.re.kr

이종현
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel : 031-910-0227
Fax : 031-910-0561
E-mail : jhrhee@kict.re.kr

구호본
한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel : 031-910-0217
Fax : 031-910-0561
E-mail : hbkoo@kict.re.kr