울릉도 북동부 지역의 낙석재해 위험도 평가

서용석¹ · 장형수¹ · 김광염^{2*}

¹충북대학교 지구환경과학과, ²한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

Assesment of Rockfall Hazard in the Northeast Region of Ulleung-Do

Yong-Seok Seo¹, Hyung-Su Jang¹, and Kwang-Yeom Kim^{2*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Geotechnical Engineering Research Div., Korea Institute of Construction Technology

울릉도는 강도가 약한 화산암과 강도는 높으나 수직절리가 잘 발달하는 조면암질암으로 구성되어 있으며, 이러한 지질학적 특성으로 인해 낙석이 빈번하게 발생하고 있어 일주도로의 이용에 큰 위협요인으로 작용하고 있다. 본 연구에서는 낙석 재해위험도가 높은 울릉도 북동부의 약 3 km 구간을 대상으로 3종류의 낙석재해 위험도 평가법을 이용하여 낙석재해 위험도 평가를 수행하고 재해도를 작성하였다. 사용된 평가표는 일본 도로방재 총점검에서 적용된 낙석위험도 조사표, 일본 고속도로조사회사의 낙석위험도 평가표, 그리고 미국연방도로국의 RHRS (Rockfall Hazard Rating System)이다. 도로사면의 지형·지질학적 조건을 고려하여 27개 구간을 설정하여 평가한 결과, 20개 사면(약 74%)에서 낙석재해 위험도가 높음과 보통으로 평가되었다. 이러한 조사결과를 바탕으로 낙석재해 위험도를 작성하였다.

주요어 : 도로사면, 낙석, 재해평가, 재해위험도

The geology of Ulleung-Do is dominated by volcanic rocks with low strength and trachytic rocks with high strength but containing vertical joints that yield easily. Consequently, rockfalls along roadcuts are a major geological hazard, with the potential to affect the ring road of Ulleung-Do. In this study, we performed three types of rockfall hazard-risk assessment on the 3-km-long section of the ring road expected to have the highest possibility of rockfall. We used a rockfall ranking sheet in a roadside landslide hazard map, the Slope Stability Inspection Manual for National Highways (Japan), and a rockfall hazard rating system for inspection from the Japan Highway Public Corporation. We also employed the evaluation criteria of 'RHRS' developed by the Federal Highway Administration (FHA). An analysis of roadcuts at 27 sites with regard to geographic and geological conditions resulted in the identification of three classes of rockfall hazard (high, medium, and low). Of note, over 74% of slopes were assessed as high- and medium-class. Finally, a rockfall hazard map of the northeast region of Ulleung-Do was produced based on the evaluation results.

Key words: Roadcuts, Rockfall, Hazard assessment, Hazard map

서 론

울릉도는 해안을 따라 약 45 km의 일주도로가 형성되어 있다. 일주도로변 사면은 많은 구간이 급경사를 이루는 괴상의 조면암질암과 풍화에 취약한 화산암이 발달하고 있고, 이러한 지질학적 요인과 더불어 연평균강수량 1,500 mm, 평균풍속 4.0 m/s에 달하는 기후특성

(Korea Meteorological Administration, 2012), 그리고 미비한 낙석방호시설로 인한 낙석재해 발생으로 매년 도로 시설물 파손 및 인명·재산피해가 생기고 있다.

사면의 붕괴는 사면의 형태, 구성 암질, 기후특성, 식생 등 다양한 원인들의 복합적인 결과로 발생된다. 사면의 붕괴를 예측하거나 위험도를 평가하는 연구는 자연사면(Jones, 1969; Joyce and Evans, 1976; Choi,

*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

1986; Chae et al., 2009; Chae and Seo, 2010)과 절취사면(Wankins and Koirala, 1986; You, 1997; Vandewater et al., 2005; Kim et al., 2012)을 대상으로 하여 국내·외에서 다양한 평가방법에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 울릉도를 대상으로 한 낙석재해위험도 평가에 관한 연구는 이루어진 적이 없다.

본 연구에서는 울릉도 북동부에 위치하는 관선에서 죽암에 이르는 3 km 구간의 일주도로변 사면을 대상으로 낙석위험도를 평가하였다. 낙석위험도 평가에는 일본 도로방재 총점검에서 사용된 낙석 안정도 조사표와 일본 도로조사회의 낙석 위험도 판정표, 미국 연방도로국의 RHRS (Rockfall Hazard Rating System) 등 3가지 방법을 이용하였다. 국내에서 화산암을 대상으로 낙석위험도를 평가한 사례는 드물기 때문에 일본과 미국의 평가방법 3가지를 동시에 이용하여 여러 영향요소를 반영하고자 했으며, 각 평가방법의 점수대별 분포를 고려하여 위험도를 구분하였다. 최종적으로 각 도로사면에 대한 3가지 평가결과와 낙석 영향범위를 고려하여 울릉도 북동부 지역의 도로사면에 대한 낙석재해 위험도를 작성하였다.

연구지역의 지형 및 지질

본 연구지역은 경상북도 울릉군 북동부 지역의 관선터널~죽암리에 이르는 해안도로 약 3 km 구간이며, 해안도로(왕복 2차선, 폭 7 m)를 기준으로 해안방향으로는 해수면이 도로부에 인접해있고, 내륙방향으로는 50~100 m의 대규모 사면이 수직에 가까운 경사로 구성되어 있다. 사면이 해안과 인접해있어 해수와 해풍의 영향을 직접적으로 받고 있다. 이러한 지형적 특징으로 인하여 해안도로 사면의 풍화와 침식이 가속화 되고 있다.

화산체로 이루어진 울릉도는 신생대 제3기 말인 플라이오세에서 제4기 홀로세까지의 활동에 의해 형성되었다(Jin et al., 2005). 울릉도 화산체의 대부분을 이루는 해수면 하부 구간 지질에 대해서는 충분한 조사자료가 아직까지 확보되지 않았으며, 현무암질암이 분포하고 있을 것으로만 추측되고 있다(Kim and Lee, 2008). 해안도로에 인접한 사면들은 울릉도의 화산활동으로 인해 생성되었다. 연구지역의 지질은 조면암과 조면암질 집괴암, 조면암질 응회암이 주로 분포하고, 일부 지역에서 현무암질 집괴암과 현무암질 응회암이 소규모로 발견된다(Kim and Kim, 1977).

낙석재해 위험도 평가

연구지역의 낙석유형

연구지역의 사면은 주로 괴상이며 경암에 속하는 조면암 및 조면암질암과, 연암에 속하는 현무암질 집괴암 및 응회암으로 구성되어 있다. 일본도로협회(Japan Road Association, 2000)의 낙석대책편람에서는 낙석의 발생형태를 크게 3종류로 구분하고 있다. 첫 번째는 박리(부석)형 낙석으로 주로 암반사면에서 발생하며, 암반붕괴와 동일한 발생형태이다. 절리, 층리, 편리 등 불연속면이 복수의 방향으로 발달하는 경우에 잘 발달한다. 두 번째는 탈락(전석)형 낙석으로 단구나 화산쇄설물 등 사면을 이루는 기질이 역을 포함하면서 고결도가 낮은 토사와 같은 경우에 잘 발달한다. 세 번째로 풍화 받은 화강암에서 풍화나 침식을 받지 않은 강한 암괴나 구상 풍화를 받고 남아 있는 부분이 불안정한 형태로 분포하는 경우에 발생하는 낙석이다. Vandewater et al. (2005)은 미국 Tennessee지역의 낙석재해를 연구하면서 낙석의 발생유형을 평면형, 켜기형, 전도형, 차별풍화형, 복

Fig. 1. Geological map of the northeast region of Ulleung-Do (modified after Kim and Kim, 1977).

Fig. 2. Toppling rockfall mode and an outcrop of trachytic rocks.

Fig. 3. Differential weathering rockfall mode and an outcrop of agglomerate and tuff.

합형으로 구분하였다.

본 연구대상 사면에는 두 가지 유형의 낙석이 발생하고 있다. 첫 번째 유형은 강도가 높고 수직 및 수평절리가 잘 발달하는 조면암질암에서 발생하는 낙석으로서 박리(부식)형 낙석에 속하며, 평면형을 일부 포함하는 전도형 낙석에 속한다(Fig. 2). 두 번째로 집괴암 내지 각력질 응회암에서 연약한 응회질 기질이 풍화되면서 비교적 경질의 화산탄 등이 낙석으로 발생하고 있다. 이 유형은 탈락(전석)형 낙석에 속하며, 차별풍화형에 속한다(Fig. 3).

구간별 도로변 사면경계 설정기준

본 연구지역인 관선터널~죽암리 구간은 약 3 km로서 많은 사면이 연이어 분포하고 있다. 각 사면은 암상의 변화가 심하고 불연속면의 발달정도도 서로 다르게 나타나는 등 지질학적 특성의 편차가 심하다. 따라서 낙석재해위험도 평가 시 3 km 구간을 총 27개 구간으로 나누어 평가를 실시하였다. 도로변에서 적용한 구간 구분의 기준은 다음과 같다. 첫 번째 기준은 사면을 구성하는 암질이나 암상이 바뀌는 구간이며, 노두의 풍화와 침

식의 양상이 다르게 나타난다. 풍화와 침식 양상의 변화는 발생하는 낙석의 유형, 규모, 개수 등에 영향을 미친다. 두 번째 기준은 사면 내에 낙석이나 붕괴 발생 흔적의 유무이다. 과거의 낙석과 붕괴 발생 흔적은 이후에도 추가적인 낙석과 사면붕괴가 발생할 가능성이 높다는 것을 의미하며 낙석재해 위험도에 큰 영향을 미친다. 본 연구지역에는 주로 사면의 구성 암질이나 암상이 바뀌는 경우 구간 구분기준으로 활용되었고, 일부 동일 암질 내에서도 낙석이나 붕괴 발생 흔적에 의하여 구간이 구분된 경우도 있다.

낙석재해 위험도 평가방법

• 일본 국토교통성의 낙석·붕괴에 관한 안정도 조사표

일본 국토교통성(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan, MLIT)에서 시행한 도로방재 총점검에 사용된 낙석·붕괴에 관한 안정도 조사표(Road Management Technology Center of Japan, 2007)는 절취사면과 자연사면을 대상으로 안정도를 평가하기 위한 것이며 Table 1과 같다. 평가항목으로 는 지형, 토질, 암질, 붕괴성 구조, 부식과 전석의 상황,

Table 1. Observation chart for rockfall safety rating by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) of Japan.

		[Factor Ai]				
Category	Geological condition	Cut slope		Natural slope		
		Rating criteria	Rating score	Rating criteria	Rating score	
Topography	Easy to oollapse	G1:Talus	Corresponding to G1	3	Corresponding to more than two in G2	3
		G2:Collpase trace apparent sudden changing line structure			Corresponding to one in G2	2
					Not corresponding to G1	0
		G3:Terrace, lower part erosion, overhang, catchment shape earthflow trace etc.	Corresponding to more than two in G2 & G3	3	Corresponding to more than two in G1 & G3	3
			Corresponding to one in G2 &G3	2	Corresponding to one in G1 &G3	2
			Not corresponding to G2 & G3	0	Not corresponding to G1 & G3	0
		G4:End concave, overhang	Corresponding to G4		Corresponding to G4	
Soil, rock, structure	Collapse potential soil	Vulnerable-to-erosion soil	Very correspondent	8	Very correspondent	2
		Strength-weakening soil under submergence etc.	Slightly correspondent	4	Slightly correspondent	1
			Not correspondent	0	Not correspondent	0
	Collapse potential rock	High density in fracture and weak band	Very correspondent	12	Very correspondent	8
		Vulnerable-to-erosion weak rock, etc.	Slightly correspondent	6	Slightly correspondent	4
		Fast weathering rocks	Not correspondent	0	Not correspondent	0
	Collapse potential structure	Active plane (bedding, seam etc.)	Presence	8	Presence	2
			No presence	0	No presence	0
		Soil on impermeable foundation	Very correspondent	6	Very correspondent	4
Hard in upper & soft in lower part etc.		Slightly correspondent	4	Slightly correspondent	3	
		Not correspondent	0	Not correspondent	0	
Surface ground condition	Condition of surface ground, float stone and gravels	unstable	12	Unstable	24	
		slightly unstable	6	Slightly unstable	12	
		stable	0	Stable	0	
	(Float stone and gravels) Unstable ~ slightly unstable	Correspondent		Correspondent		
	Water condition	Continual water	8	Continual water	4	
		Intermittent water	4	Intermittent water	2	
		No water	0	No water	0	
	Surface covering	No to wide vegetation	5	No to vegetation	16	
		Complex (vegetation, structures)	3	Complex (no, vegetation, tree)	10	
		Mostly structures	1	Mostly structures	6	
Geometry & dimension	Inclination(i), Height(H)	H > 30 m	18	H ≥ 50m	10	
		H ≤ 30m, i > Standard	15	30 ≤ H < 50 m	8	
		Soil i ≤ Standard, 15 ≤ H < 30	10	Height 15 ≤ H < 30 m	6	
		i ≤ Standard, H < 15	5	H < 15 m	4	
		H ≥ 50 m	18	i ≥ 70°	10	
		30 ≤ H < 50 m	16	Inclination 45° ≤ i < 70°	10	
		15 ≤ H < 30 m	12	i < 45°	5	
		H < 15 m	10			
		Metamorphosis in the slope (collapse, small falling, V erosion, piping, cavein, opening crack, metamorphosis in countermeasure)	Corresponding to more than two, apparent	12	Corresponding to more than two, apparent	10
			Ambiguous presence	8	Ambiguous presence	5
			No presence	0	No presence	0
Metamorphosis in adjacent slope	Corresponding to more than two, apparent	5	Corresponding to more than two, apparent	4		
	Ambiguous presence	3	Ambiguous presence	2		
	No presence	0	No presence	0		
Total		Pt.(A1, 100)		Pt.(A2, 100)		

Table 1. Observation chart for rockfall safety rating by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) of Japan (Continued).

[Countermeasure] $(B_i) = (A_i) + \alpha$ or $(A_i) \times 0$

Assessment of installed countermeasure	Points (α)	Rating	
		Cut slope	Natural slope
Well precautions to expected falling and collapse or capable of keeping from them	$\times 0$ pts.		
Well keeping from expected falling and collapse throughly but not quite sufficient	-20 pts.		
Partially keeping from expected falling and collapse but not widely effective	-10 pts.		
No countermeasure or no effective countermeasure	± 0 pts.		
Sum		(B1:Cut slope)	(B2:Natural slope)

[History C] Allocate zero to (C) without assessing history when no falling and collapse happened after recent implementing countermeasure

Frequency and degree of disaster	Rating score	
Interference to traffic happened after implementing countermeasure (no effect of countermeasure)	100 pts.	
No interference to traffic happened but rather big falling happened (insufficient countermeasure)	70 pts.	
Small falling and collapse happened on front part of slope. Effective countermeasure but additional countermeasure is needed	40 pts.	
(C)		pts.

(D) = MAX(B, C)

Factor score	(B)=MAX(B1, B2) pts.
History score	(C) pts.
Bigger one between B & C	(D)=MAX(B, C) pts.

[Summary]

Action	Decision
Need for taking a step	
Acting after disaster-prevention card	
No need for new action	

[Stability to seismicity]

Stabel	
Unstable	

*Mark O in 'unstable' in case of marking G4 in 'topography' or unstable in float stone and gravels

[Primary inspection object]

Cut slope	
Natural slope	

[Primary disaster type]

Falling	
Collapse	

*Indicating which slope type (cut or natural) would be referred to based on final summary result and expected disaster type (falling or collapse)

Table 2. Assessment chart of rockfall probability rating by the Japan Highway Public Corporation (JH).

Inspection Category	Symbol	Factor	Evaluation score	Points				
A. Status of rock block on slope (Inspection of each rock)	—	Rock stability index	1.0	0.75	0.50	0.25	0	
	A-1	Stable for rock block	20	15	10	5	0	
	A-2	Falling rock block energy	10	8	4	2	-	
	A-3	Shape of rock block	4	2	0	-	-	
B. Status of slope (Characteristics of objective block)	B-1	Geological condition of slope	10	6	3	0	-	
	B-2	Inclination of slope	6	4	2	0	-	
	B-3	Location of inspection objective block	4	2	0	-	-	
	B-4	Geometry of slope under Inspection objective block	4	3	2	1	0	
	B-5	Degree of arboreal spread and growth	4	2	0	-	-	
	B-6	Number of gravels inside inspection block	4	3	2	1	0	
	B-7	Status of access to inspection block	2	1	0	-	-	
C. Requirement for slope location (inspection of whole slope)	C-1	Case history of falling rock	20	15	10	5	0	
	C-2	Influence of freeze-thaw and snow fall	6	4	2	1	0	
	C-3	Traffic regulation due to rain fall	4	3	1	0	-	
	C-4	Wind direction and power hitting on slope	2	1	0	-	-	
Intermediate sum								
D. Environment around route	D-1	Route environment						
E. Correction for risk	E-1	Correction of protective facility						
Evaluation value	(Intermediate sum)×(Rock stability index)+D+E							

용수 상황, 표면피복상황, 사면형상, 사면의 변상 등 9개의 항목으로 구성되어 있다. 평가항목 이외에 조사시점에 기 설치된 대책공의 설치효과, 대책공의 설치 후 재해이력규모, 추가 대책공의 필요 유무를 판단한 후, 평가점수를 보정하여 최종적인 안정도 평점을 구하도록 구성되어 있다. 본 연구지역의 27개 사면에서는 대부분의 평가구간이 대책공이 충분히 시공되어 있지 않기 때문에 대책공에 의한 보정점수를 ‘대책공 없음’ 또는 ‘대책공 효과 없음’으로 판정하여 0점 처리하였다. 각 조사항목의 점수 배점은 2~24점이 만점으로 설정되어 있으며, 항목별 배점의 총합은 100점이다. 최종 안정도 평점이 100점에 가까울수록 평가 사면이 불안정하다는 것을 의미한다. 조사 항목 중 배점이 가장 큰 항목은 ‘부석과 전석의 상황’으로 불안정한 경우 24점까지 줄 수 있다. ‘부석과 전석의 상황’ 항목의 평가 점수는 안정도 조사의 총 평점에 큰 영향을 주기 때문에 평가 시 조사자의 올바른 판단이 요구된다.

• 일본 고속도로조사회사의 낙석위험도 판정표

일본 고속도로조사회에서 제안한 낙석위험도 판정표(Japan Road Association, 2000)는 A~E까지 총 5가지 중분류로 구분되며 각각 1~7가지의 항목으로 구성되어 있다(Table 2). A 분류의 항목은 사면상 암괴의 상태에 대한 분류로 암괴의 안정상태, 낙석에너지, 암괴의 형상으로 구성되어 있다. B 분류의 항목은 사면의 상태에 대한 분류로 지질상태, 구배, 조사대상 블록의 위치, 블록 아래의 사면형상, 수목의 번성 상태, 조사 구간내의 암괴의 수, 사람의 출입현황 등 7가지 항목으로 세분화되어 있다. C 분류의 항목은 사면의 입지조건에 대한 항목으로, 낙석의 이력, 동결융해 및 적설의 영향, 강우로 인한 교통 규제, 바람에 의한 사면의 영향 등 4가지 항목으로 세분화되어 있다. D와 E 분류는 조사자의 주관적 판단에 의한 가감점 항목으로, D 분류는 노선의 환경에 관한 것이며, E 분류는 위험도의 보정에 관한 항목이다. 낙석 위험도 판정표 사용법은 A, B, C 분류

의 항목을 판정한 뒤 각 항목의 점수를 종합하여 100점 만점으로 평가하고, 이 원점수에 둘의 안정계수를 곱하여 최종 점수를 산출한다. 본 연구에서는 조사자의 주관적인 보정점수인 D와 E 분류는 모든 사면에서 도로환경과 방호시설의 상태가 동일하므로 0점으로 처리하였다. 낙석위험도 판정표는 평가 점수의 합계가 100점에 가까울수록 낙석 위험도가 높은 것으로 판단한다.

• 미국 연방도로국의 RHRS법

미국 연방도로국에서 제안한 RHRS는 낙석에 대한 위험을 육안관측과 간단한 계산을 통해 평가하는 방법으로서, 위험사면과 긴급히 보수를 요하거나 정밀조사를 수행할 사면을 구분하기 위하여 활용된다. 1989년에 미국 연방도로국(FHA)에서 개발하였고 3,000개 이상의 사면에 적용하여 그 신뢰성을 검증하였다(National Highway Institute, 1993; Budetta, 2004).

Table 3. Equations for calculating x-values of RHRS. Each value is used to determine each category score.

Factors	Equations
Slope Height	$x = \frac{\text{Slope Ht. (ft.)}}{25}$
Average Vehicle Risk	$x = \frac{\% \text{ Time}}{25}$
Sight Distance	$x = \frac{120 - \% \text{ Decision Sight Dist}}{20}$
Roadway Width	$x = \frac{52 - \text{Roadway width (ft.)}}{8}$
Block Size	$x = \text{Block Size (ft.)}$
Volume	$x = \frac{\text{Volume (cu.ft.)}}{3}$

Table 4. Rockfall hazard rating system by the Federal Highway Administration of U.S. (National Highway Institute, 1993).

Category		Rating criteria and score				
		Point 3	Point 9	Point 27	Point 81	
Slope height		25 ft	50 ft	75 ft	100 ft	
Ditch effectiveness		Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
Average vehicle risk		25% of the time	50% of the time	75% of the time	100% of the time	
Percent of decision sight distance		Adequate site distance, 100% of low design value	Moderate sight distance, 80% of low design value	Limited site distance, 60% of low design value	Very limited sight distance, 40% of low design value	
Roadway width including paved shoulders		44 ft	36 ft	28 ft	20 ft	
Geologic character	Case 1	Structural condition	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
		Rock friction	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
	Case 2					
		Structural condition	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
		Difference in erosion rates	Small difference	Moderate difference	Large difference	Extreme difference
	Block size		1 ft	2 ft	3 ft	4 ft
Quantity of Rockfall / Event		3 cubic yards	6 cubic yards	9 cubic yards	12 cubic yards	
Climate and presence of water slope		Low to moderate precipitation; no freezing periods, no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	
Rockfall history		Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

RHRS는 총 10개의 항목으로 구성되어 있으며, 항목당 배점은 100점이고 총평점은 1,000점이다. RHRS의 항목은 사면높이, 도랑 효과, 평균 교통위험, 결정시아거리, 노건을 포함한도로 폭, 지질특성, 암석크기 및 낙석의 체적, 기후 및 사면 내 물의 존재 등으로 구성된다. RHRS는 일본의 낙석·붕괴 안정도 판정표나 낙석위험도 평가표와 달리 항목별로 기본 자료를 이용해 간단한 산정식을 적용하여 항목의 점수를 결정하는 방법이 사용된다. 산정식을 적용하여 계산되는 항목은 사면높이, 평균교통위험도, 결정시아거리, 노건을 포함한 도로 폭, 블록의 크기, 그리고 낙석의 부피 등 6개의 요소로서 4 항목을 계산하며 각 항목의 산정식은 Table 3과 같다. 6개의 요소에서 산정된 x 값을 $y=3^x$ 의 식에 적용하여 각각의 최종적인 y 항목의 평가 점수를 결정한다. 산정식이 사용되지 않는 나머지 6개의 항목은 평가기준을 사용하여 항목의 평가 점수를 결정하게 된다. 평가 기준별 점수는 3의 지수값의 형태로 3점, 9점, 27점, 81점의 평가 점수로 산정된다. 항목의 평가 점수가 100점을 넘을 경우 100점으로 계산하여 총 평점을 산출한다. RHRS의 경우 앞의 두 가지 평가법과 달리 항목별 점수가 3의 지수 값으로 산정되어 총 평점의 값이 큰 폭으로 나뉘게 된다. 항목별 신뢰성과 올바른 평가점수의 산정을 위하여 조사자의 신뢰성 있는 평가기준과 조사방법이 필요하다. Table 4는 RHRS의 평가표를 나타낸 것이다.

평가결과

연구지역을 대상으로 낙석재해 위험도평가를 실시하면서 도로 경계부에서 계곡 쪽으로 완만한 경사로 길게 분포하거나 좁은 계곡입구부로 인하여 낙석 발생 시 도로에 직접적인 피해를 주지 않는 것으로 판단된 사면은 평가에서 제외하였다. 앞에서 제시한 도로변 사면경계 설정기준에 의하여 연구지역의 사면을 총 27개의 사면으로 구분하였으며, 각각의 사면에 대하여 낙석재해 위험도를 평가하였고, 각 사면의 평가점수는 Table 5와 같다.

일본 도로방재총점검의 낙석·붕괴에 관한 안정도 평가표(MLIT)에 의한 평가점수는 최저 56점에서 최대 93점의 점수 분포를 보인다. 일본고속도로조사회사의 낙석위험도 판정표(JH)에 의한 평가점수는 최저 45점에서 최대 97점까지 분포하고 있다. 미국 연방도로국의 RHRS 판정표에 의한 평가점수는 최저 381점부터 최대 751점의 점수 분포를 보인다.

일본의 MLIT와 JH 평가표에 의한 배점을 살펴보면 70점 이하의 하위점수대를 제외하면 JH 평가법의 점수가 MLIT 평가법의 점수보다 약 10점정도 높게 나타난다. 그 이유는 JH법에서 A-1 암괴의 안정상태(배점 20점) 항목에 의하여 안정계수가 결정되도록 되어 있어, 이 항목이 100점 만점의 원점수에도 반영이 되고, 지질 및 지형요소의 소계에 곱해지는 안정계수로도 사용되는 등 총 평가점수에 이중으로 반영이 된다. 상기와 동일한 이

Table 5. Rockfall hazard assessment scores for the northeast region of Ulleung-Do.

Assessment method	Slope no.								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
by MLIT	72	87	75	56	85	71	93	77	53
by JH	74	93	84	48	96	82	97	84	45
RHRS	490	629	510	381	619	430	616	467	381
Assessment method	Slope no.								
	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
by MLIT	65	59	65	63	86	70	59	77	59
by JH	76	46	84	74	95	82	53	80	52
RHRS	420	411	511	494	590	441	464	415	413
Assessment method	Slope no.								
	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27
by MLIT	75	85	74	59	81	83	67	57	74
by JH	89	97	89	53	90	97	82	47	84
RHRS	490	751	448	385	635	728	473	388	421

Fig. 4. Distribution of rockfall hazard ratings for each hazard class.

Fig. 5. Evaluation of the rockfall hazard class of each slope, using each of the three assessment systems.

유로 하위 점수대에서는 안정계수 0.75를 곱해 줌으로써 JH법이 10점 이내로 MLIT 평가법 보다 낮은 점수를 보인다. Fig. 4에서 (a) MLIT 법의 경우 점수분포가 연속적인데 반해 (b) JH 법은 70점에서 55점까지 불연속구간이 존재하는 것을 알 수 있다. RHRS 평가결과는 1,000점 만점이면서 비선형적으로 증가하므로 일본의 2가지 평가법의 결과와 단순히 비교하기는 어렵다.

상기에 제시한 점수간의 차이와 현장조사 결과를 바탕으로 3가지 평가결과를 이용하여 각 사면의 낙석재해 위험등급을 3등분하였다. 위험등급별 점수구간은 MLIT 법의 경우 80점 이상을 높음, 60점 이상 80점 미만은 보통, 60점 미만을 낮음으로 분류하였다. JH 법에 의한 위험등급별 점수구간은 안정계수를 반영한 최종 점수를 기준으로 90점 이상은 높음, 70점 이상 90점 미만은 보통, 70점 미만은 낮음으로 분류하였다. 미국 연방도로국의 RHRS 판정표에 의한 위험 등급별 점수구간은 550점 이상은 높음, 400점 이상 550점 미만은 보통, 400점 미만은 낮음으로 분류하였다. Fig. 4는 상기 기준에 의하여 구분된 위험등급별 평가점수의 분포를 나타낸 것

이다. Fig. 5는 사면별 낙석재해 위험등급을 나타낸 것이다. 11번과 18번 사면의 RHRS 평가법의 결과가 다른 것과 불일치하는 결과를 보이고 있으나, RHRS 평가 점수가 411점과 413점으로 위험과 약간위험의 경계인 400점에 가깝게 분포하고 있어 최종평가에서는 두 사면 모두 약간위험으로 판정하였다.

낙석재해 위험도 작성

낙석재해 위험도를 작성하는 기준은 사면의 지형 형상 중 평면 형상과 측면경사이다. 평면 형상은 낙석의 평면적인 이동궤적을 좌우하며, 사면의 측면경사는 낙석이 튀는 높이에 큰 영향을 미친다. Fig. 6은 사면의 평면적인 형상을 분류한 것(Ministry of Construction and Transportation of Korea, 2000)으로, 사면의 평면적 형상은 능선형(a), 계곡형(b), 직선형(c)으로 구분된다. 본 연구에서는 낙석발생영역의 상한선을 사면의 상단부에 위치하는 환경사에서 급경사로의 경사급변선을 경계 부분으로 설정하였으며, 계곡이나 능선을 기준으로

Fig. 6. Geographic types of slopes (two-dimensional classification) (Ministry of Construction and Transportation of Korea, 2000).

Fig. 7. Rockfall hazard map of the northeast region of Ulleung-Do.

로 위험범위에 있는 측면경계로 설정하였다. 이와 같은 기준으로 작성된 울릉도 북동부의 낙석재해 위험도는 Fig. 7과 같다.

결론

울릉도 북동부 지역에는 과상의 경암에 속하며 수평 절리와 수직절리가 잘 발달하는 조면암질암과 연암에 속하는 집괴암 내지 각력질 응회암에 속하는 화산암이 분포하고 있다. 조면암질암은 박리(부석)형 또는 평면형 내지 전도형 낙석에 속하며, 화산암은 탈락(전석)형 또는 차별풍화형 낙석에 속한다.

연구지역 도로변 사면의 낙석재해 위험도 평가를 위

하여 일본의 도로방재 총점검에서 사용된 평가표와 일본 고속도로조사회사의 낙석위험도 판정표, 그리고 미국 연방도로국의 RHRS법 등 총 3가지 평가법을 동일 사면에 적용하여 평가를 실시하였다.

낙석재해 위험도 평가결과에 의하면 일본고속도로조사회사의 낙석위험도 판정표에 의한 평가점수가 일본 도로방재 총점검의 낙석·붕괴에 관한 안정도 평가표의 점수보다 중상위 점수대에서는 10점정도 높게 나오고, 하위 점수대에서는 10점 이내로 낮게 나타나고 있다.

평가결과를 바탕으로 낙석위험도를 높음, 보통, 낮음으로 구분하여 평가한 결과 총 27개 사면 중 7개 사면이 높음, 13개 사면이 중간, 7개 사면이 낮음으로 평가되었다.

본 연구에서 사용된 3가지 평가표는 평가요소와 배점이 다르므로 국내적용 시에 적용현장의 지형·지질학적 또는 환경적 특성을 고려하여 선별적으로 사용하는 것이 필요하다.

울릉도 북동부 지역의 도로변 사면은 낙석의 위험에 노출되어 있다. 효율적이고 경제적인 보강대책을 수립하기 위해서는 이러한 평가결과를 바탕으로 추후 보다 정밀한 조사가 수행되어야 할 것이다.

사 사

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Budetta, P., 2004, Assesment of rockfall risk along roads, Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 71-81.
- Chae, B.G., Cho, Y.C., Song, Y.S., and Seo, Y.S., 2009, Development of an Evaluation Chart for Landslide Susceptibility using the AHP Analysis Method, The Journal of Engineering Geology, 19, 1, 99-108 (in Korean).
- Chae, B.G. and Seo, Y.S., 2010, Suggestion of an Evaluation Chart for Landslide Susceptibility using a Quantification Analysis based on Canonical Correlation, Econ. Environ. Geol., 43, 4, 381-391 (in Korean).
- Choi, K., 1986, Landslides occurrence and its prediction in Korea, PhD thesis, Kangwon National University, 1-45 (in Korean).
- Japan Road Association, 2000, Manual for rockfall countermeasure, 312 (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, 310 (in Korean).
- Jones, J.R., 1969, Review and comparison of site evaluation methods. USDA Forest Service Research Paper, No. RM-51.
- Joyce, E.B. and Evans, R.S., 1976, Some areas of landslide activity in Victoria, Proceedings of the Royal Society of Victoria, 88, 1, 95-108.
- Kim, J.H., Baek, Y., Koo, H.B., and Park, K.B., 2012, Use of the Risk Score for the Effective Management of Cut Slopes, The Journal of Engineering Geology, 22, 2, 223-231 (in Korean).
- Kim, Y.K. and Kim, S.U., 1977, Applied Geology of Ulreung-Island, Provincial government of Gyeong-sangbuk-Do, 59 (in Korean).
- Kim, K.D. and Lee, G.D., 2008, A study on volcanic stratigraphy and fault of Ulleung-do, Korea, The Journal of Engineering Geology, 18, 3, 321-330 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration, 2012, Internet homepage(<http://www.kma.go.kr>) (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation of Korea, 2000, Report on installation of road safety facilities, Chapter for rockfall countermeasure facilities, 3-43 (in Korean).
- National Highway Institute, 1993, Rockfall Hazard Rating System Participant's Manual, NHI Course NO, 130220, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA SA93-057.
- Road Management Technology Center of Japan, 2007, Report on roadside landslide hazard map and a slope stability inspection manual for national highways, 39 (in Japanese).
- Vandewater, C., Dunne, W., Mauldon, M., Drumm, E., and Bateman, V., 2005, Classifying and assessing the geologic contribution to rockfall hazard, Environmental & Engineering Geoscience, 11, 2, 141-154.
- Wankins, A.T. and Koirala, N.P., 1986, Bulk Appraisal of Slope in Hong Kong, Landslide, Proc. 5th Int. Sym. on Landslide, A. A. Balkema, 1181-1186.
- You, B.O., 1997, A study on hazard rating system and protective measures for rock slope, PhD thesis, Hanyang University, 1997 (in Korean).

원고접수일 : 2012년 9월 11일

수정본채택 : 2012년 9월 24일

게재확정일 : 2012년 9월 25일

서용석

충북대학교 지구환경과학과

361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-276-9645

E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

장형수

충북대학교 지구환경과학과

361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410

Tel: 043-261-2765

E-mail: engeo85@naver.com

김광엽

한국건설기술연구원 지반연구실

411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283

Tel: 031-9100-225

E-mail: kimky@kict.re.kr