

강우침투 메커니즘을 이용한 급경사지 붕괴예측 I-D 기준식 제안

Recommendation of I-D Criterion for Steep-Slope Failure Estimation Considering Rainfall Infiltration Mechanism

송 영 갑¹ Song, Young-Karb
 김 영 옥² Kim, Young-Uk
 김 동 옥³ Kim, Dong-Wook

Abstract

The natural disaster occurrences and the loss of lives caused by the steep-slope failures in Korea were investigated in this study. The investigation includes the frequency rate of the steep-slope failures with respect to the characteristics of precipitation, underlying bedrock, and weathered soils. Analysis on the problems in the existing estimation methods of steep-slope failure was also undertaken, and a new model using unsaturated infinite slope stability was developed for the better slope failure estimation. The slope analyses by the newly developed model were performed considering unsaturated infinite slope, the gradient of slope, and hydro/mechanical properties of soils. Steep-slope failure estimation criterion is proposed based on the analysis results. In addition, the precipitation amount corresponding to warning stages against steep-slope failure is provided as an equation of Intensity-Duration criterion.

요 지

본 연구에서는 우리나라에서 발생된 자연재해 및 급경사지 재해 사망자 현황을 분석하고, 급경사지 붕괴사례를 대상으로 강우특성과 기반암 풍화도에 따른 재해 발생빈도를 분석하였다. 또한, 선행연구에서 제시한 급경사지 붕괴 예측 기준을 고찰하여 한계점을 도출하고, 불포화 무한사면 안정이론을 도입하여 급경사지 붕괴예측 기준으로 활용하고자 하였다. 지반의 경사, 수리적-역학적 특성을 고려할 수 있는 불포화 무한사면의 안정이론을 이용하여 안정해석을 수행하였으며, 산정된 안전율에 안전수준을 나타낼 수 있는 경계기준을 제시하여 급경사지 붕괴예측 기준을 제안하였다. 또한 급경사지 붕괴 위험단계에 해당하는 강우량을 Intensity-Duration 기준 수식으로 제시하였다.

Keywords : Failure estimation, Infinite slope stability, Hydro/Mechanical properties, I-D criterion equation

1. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화는 21세기 전 세계인의 화두이자 국제 사회의 주요 의제로 대두되고 있다.

NIMR(2009)에 따르면 우리나라의 최근 100년(1912~2008)에 걸친 기후변화의 징후로는 1.7°C 기온 상승, 강수량의 증가, 극한 저온 일수 감소 및 고온 일수 증가, 호우 일수 증가, 강수 일수 감소, 계절길이 변화 등을

1 정회원, 국립재난안전연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, National Disaster Management Institute)
 2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji Univ.)
 3 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotech. Research Eng'g Div., Korea Institute of Construction Technology, Tel: +82-31-910-0277, Fax: +82-31-910-0561, dwkim@kict.re.kr, 교신저자)
 * 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

들 수 있다. 이러한 급변하는 기후변화에 대하여 정책적인 변화 없이 현재에 머무른다면, 전 세계적으로 기후변화에 따른 극단적 기후현상이 증가하고 이로 인해 홍수와 가뭄 등 자연재난에 대한 위험이 증가할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2007). 매년 우리나라는 산사태, 하천 급류, 건물붕괴 등을 유발하는 태풍과 집중호우와 같은 자연재해로 인해 많은 인명 및 재산 피해가 꾸준히 발생되고 있다. 특히, 우리나라 국토는 약 63.7%가 산지로 구성되어 있기 때문에 호우에 의한 산사태, 즉 급경사지 붕괴 및 이로 인한 추가 재해발생 가능성이 높다. 이러한 급경사지 재해를 유발하는 가장 큰 인자로는 강우를 들 수 있다. 이에 국내외에서는 급경사지 붕괴를 유발하는 기준강우량을 분석하여 이를 급경사지 붕괴 지표로 활용하기 위한 많은 연구가 수행되었다(Kim and Jung, 2000; Park et al., 1993; KFS, 1993; Caine, 1980; Dahal and Hasegawa, 2008; Guzzetti et al., 2008; Ikeya, 1989; Saito et al., 2010).

본 연구에서는 1999년부터 2011년까지의 기간 동안 집중호우로 인해 발생한 급경사지 붕괴사례를 조사하여 급경사지 붕괴발생에 영향을 미치는 강우특성을 분석하고, 기반암 풍화도에 따른 급경사지 재해 발생빈도를 분석하였다. 또한, 선행연구에서 제시한 급경사지 붕괴예측 기준을 고찰하여 한계점을 도출하고, 강우침투로 인한 모관흡수력 감소와 자중 증가를 반영할 수 있는 불포화 무한사면의 안정이론을 도입하여 급경사지 붕괴예측에 활용하고자 하였다.

2. 급경사지 재해와 강우

2.1 급경사지 재해발생 현황분석

우리나라는 매년 태풍과 집중호우로 인한 인명·재산 피해가 꾸준히 발생하고 있으며, 최근 산업화·도시화로 인한 절개지 증가와 하천과 산지에 근접한 주거지의 증가로 급경사지 재해에 대한 위험성은 날로 증가하고 있다. 특히 우리나라 농어촌지역은 대부분이 급경사지 직하부에 가옥이 형성되어 있으며, 고령층의 연령비율이 높아 급경사지 재해에 취약하다(Park et al., 2009).

Table 1 및 Fig. 1은 소방방재청(National Emergency Management Agency) 국가재난관리정보시스템(National Disaster Management System)을 참고하여 우리나라에서 발생된 자연재해와 급경사지 재해로 인한 사망자 현

황을 연도별(1976년~2011년)로 구분하여 비교·분석한 것이다. 자연재해 사망자수(number of death from natural disaster)를 분석한 결과, 지난 36년간 자연재해로 인해 사망한 사람은 총 6,542명이며, 이 중 1987년 자연재해 사망자 수가 1,022명으로 가장 많았다. 자연재해 중 급경사지 재해로 인한 사망자수(number of death from steep-slope disaster)는 총 1,418명으로 자연재해 사망자의 21.7%

Table 1. Number of death from steep natural slope disaster in Korea (from 1976 to 2011)

Year	From Natural Disaster	From Steep-Slope Disaster	Ratio (%)
1976	526	56	10.6
1977	345	222	64.3
1978	158	18	11.4
1979	423	167	39.5
1980	279	58	20.8
1981	216	25	11.6
1982	121	9	7.4
1983	91	N/A	N/A
1984	265	18	6.8
1985	250	50	20.0
1986	156	N/A	N/A
1987	1,022	155	15.2
1988	143	16	11.2
1989	307	43	14.0
1990	258	67	26.0
1991	236	68	28.8
1992	40	2	5.0
1993	69	12	17.4
1994	72	6	8.3
1995	157	28	17.8
1996	77	2	2.6
1997	38	5	13.2
1998	384	111	28.9
1999	89	32	36.0
2000	49	12	24.5
2001	82	9	11.0
2002	270	79	29.3
2003	148	37	25.0
2004	14	3	21.4
2005	52	11	21.2
2006	62	22	35.5
2007	23	4	17.4
2008	16	8	50.0
2009	12	6	50.0
2010	14	1	7.1
2011	78	56	71.8
Total	6,542	1,418	21.7

를 차지한다. 급경사지 재해 중 가장 많은 인명피해가 발생한 해는 1977년으로 서울 및 경기지방에서 총 222명의 많은 인명피해가 발생하였으며, 그 비율은 당해 전체 자연재해 사망자의 64.3%에 해당한다. 최근(2008년, 2009년, 2011년)에는 급경사지 재해로 인한 사망자 발생 비율(ratio)이 50%를 상회하는 것으로 분석되어, 과거에 비해 급경사지 재해로 인한 사망자 비율이 증가함을 파악할 수 있다. 이처럼 급경사지 재해로 인한 인명피해가 꾸준히 발생하는 경향을 보이고 있어 급경사지 붕괴에 대한 예측 및 대응이 우선적으로 이루어져야 한다.

2.2 강우에 따른 급경사지 재해

본 절에서는 1999년부터 2011년 기간 동안에 집중호우로 인해 발생한 147건의 급경사지 붕괴사례를 대상으로 급경사지 붕괴발생에 영향을 미치는 강우특성을 분석하였다. 우리나라는 국지적으로 발생하는 집중강우 특성상 강우자료의 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 급경사지 재해지점과 가장 근접한 전국 80개소의 중관기상관측장비(Automatic Synoptic Observation System; ASOS)와 무인으로 운영되는 467개소의 자동기상관측장비(Automatic Weather System; AWS)에서 측정된 강우자료를 활용하여 급경사지 붕괴사례를 분석하였다.

Table 2는 147건의 급경사지 붕괴사례에 대한 강우특성을 분석한 것으로, 급경사지 붕괴 발생 전 240시간을

기준으로 해당 시간 동안의 최소 및 최고 강우강도, 평균 강우강도, 평균 누적강우량을 나타내었다. 급경사지 붕괴사례를 분석한 결과, 급경사지 붕괴발생 1시간 전 평균 강우강도는 30.9mm/hr로 분석되었다. 147건의 급경사지 붕괴사례 중 최소 강우강도는 3mm/hr이었으며, 최대 강우강도는 86mm/hr으로 분석되었다. 3mm/hr의 강우강도로 인해 급경사지 붕괴가 발생하는 사례는 집중호우 시 비록 강우강도가 약하더라도 강우개시 이후 누적강우량이 많을 경우에 급경사지 붕괴가 발생할 수 있다는 점을 시사한다. 급경사지 붕괴 발생 5시간 전 평균 누적강우량은 233.5mm로 240시간(10일) 발생한 누적강우량의 약 69.6%를 차지하며, 급경사지 붕괴 발생 12시간 전 평균 누적강우량은 165.9mm로 240시간(10일) 발생한 누적강우량의 약 49.5%가 발생된 것으로 분석되었다.

2.3 기반암 풍화도에 따른 급경사지 재해

급경사지 붕괴는 동일한 강우강도의 경우라도 지질 조건에 따라 달라질 수 있다. 이는 기반암의 암석종류에 따라 암석과 암반 내에 발달한 풍화특성과 지반공학특성이 다르기 때문이다. 따라서 본 절에서는 기반암 풍화도별 급경사지 재해사례 분석을 위해 국립방재연구소에서 제시된 전국단위 암종 분류기준(NIDP, 2010)을 활용하여 기반암 풍화도별 전국 점유면적(Fig. 2)과 기반암 풍화도에 따른 급경사지 재해발생 빈도(Fig. 3)를

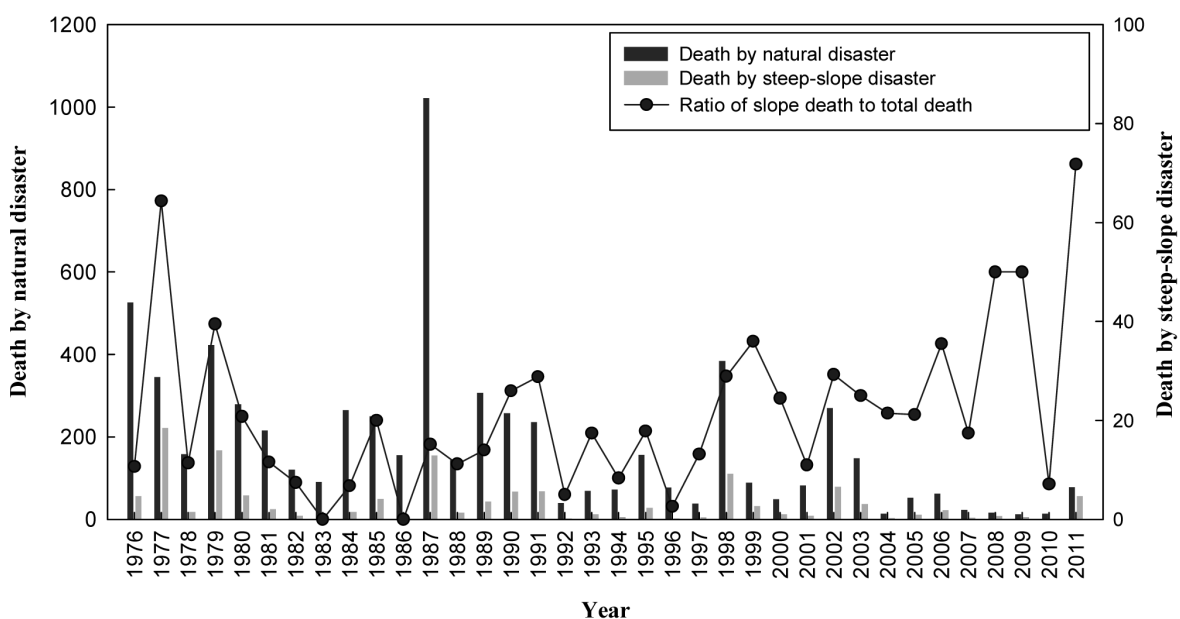


Fig. 1. Annual frequency of death from steep natural slope-related disasters in Korea (1976-2011)

Table 2. Precipitation amounts measured at steep slope failures from 1999 to 2011

Duration	Minimum rainfall intensity (mm/hr)	Maximum rainfall intensity (mm/hr)	Average rainfall intensity (mm/hr)	Cumulative precipitation amount at failure (mm)	Cumulative precipitation amount (%)	Note
1	3	86	30.9	335.2	100.0	147 failure cases were collected.
2	0	92.5	31.6	304.3	90.8	
3	0	78.5	22.6	272.7	81.4	
4	0	78.5	16.6	250.1	74.6	
5	0	68	13.2	233.5	69.6	
6	0	68	13.2	220.2	65.7	
7	0	48	10.5	207.0	61.8	
8	0	57	9.1	196.5	58.6	
9	0	48.5	8.3	187.4	55.9	
10	0	47.5	7.5	179.1	53.4	
11	0	60.5	5.6	171.6	51.2	
12	0	43.5	4.6	165.9	49.5	
24	0	33.7	1.8	125.2	37.4	
48	0	14.5	0.4	90.8	27.1	
72	0	21.5	1.2	71.3	21.3	
96	0	30	0.5	56.9	17.0	
120	0	24	0.6	45.3	13.5	
240	0	4.5	0.3	0.3	0.1	

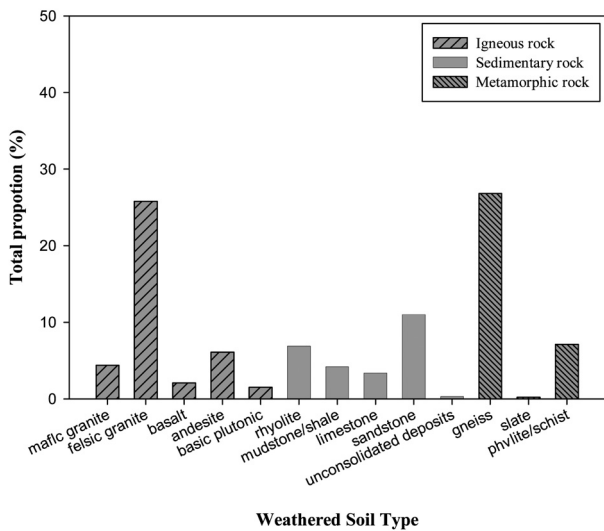


Fig. 2. Portion of domestic area with respect to types of bedrock and weathered soil

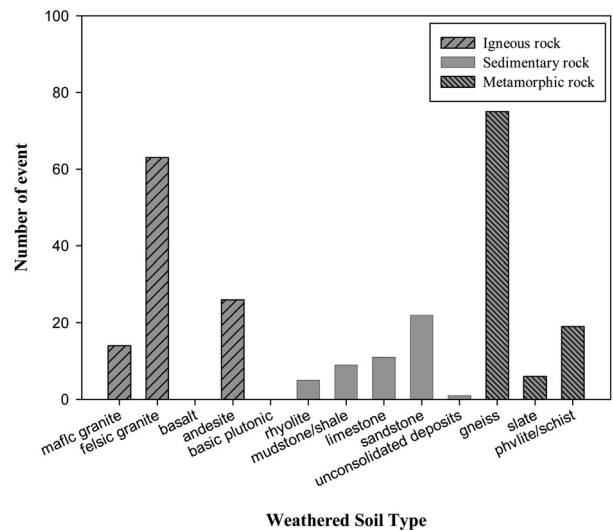


Fig. 3. Frequency of disaster occurrence related to steep slope failure with respect to types of bedrock and weathered soil

분석하였다. 급경사지 재해 발생은 화성암에서 108건, 퇴적암에서 43건, 변성암에서 104건 발생한 것으로 분석되었다. 풍화토 세부 암종별로는 편마암(72건), 규장질 화강암(63건), 안산암(26건), 천매암/편암 및 사암(22건), 고철질 화강암(14건), 석회암(11건), 이암/세일(9건), 점판암(6건), 유문암(5건), 미고결층(1건) 순으로 나타났으며, 현무암 및 염기성 심성암에서는 붕괴가 발생하지

않은 것으로 파악되었다.

3. 급경사지 붕괴예측 모델 고찰

3.1 기준강우량을 이용한 급경사지 붕괴예측

급경사지 붕괴를 유발하는 기준강우량에 대한 많은

선행연구가 이루어져 왔다. Ikeya(1989)는 누적강우량 150mm 이상이고 강우강도가 35mm/hr 이상일 경우 급경사지 붕괴가 발생하는 것으로 분석하였으며, Park et al.(1993)은 선행강우량은 산사태의 영향요소가 아니며, 강도 높은 시우량이 지속되어 200년 확률강우량을 넘는 3시간의 호우가 산사태 발생의 주요인이었다고 판단하였다. 또한, 최대시우량이 62mm 이상이면 산사태가 발생하고, 최대시우량 40~60mm인 곳은 산사태 발생지역과 미발생지역이 병존하며, 최대시우량 40mm 미만인 곳은 산사태 발생지역이 없음을 확인하였다. Kim과 Jung(2000)은 강우강도 25mm/hr 이상 혹은 일강우량이 70mm 이상일 경우 산사태가 발생할 가능성이 높다고 분석하였다. 국내에서는 강우량을 이용한 급경사지 붕괴예측에 KFS(1993)의 ‘산사태 주의보 및 산사태 경보 강우량’ 기준이 대표적으로 적용되고 있다(Table 3).

Fig. 4는 급경사지 붕괴사례에 산림청(KFS, 1993)에서 제시한 급경사지 붕괴 기준(Table 3)을 적용한 것이다. 분석대상 147건의 급경사지 붕괴사례를 산림청에서 제시하고 있는 연속강우량(continuous rainfall) 기준과 비교한 결과, 주의범위 내에는 54.4%, 경보범위 내에는 39.5%가 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 4a). 시우량(hourly rainfall) 기준과 비교한 결과, 주의범위 내에는 24.5%, 경보범위 내에는 74.1%가 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 4b). 일강우량(daily rainfall) 기준과 비교해 보면, 주의범위 내에는 19.7%, 경보범위 내에는 80.3%가 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 4c).

시우량 및 일강우량 기준으로 정보단계에서 70% 이상이 발생한 것으로 분석되었으나, 연속강우량의 경우 정보단계에서 40%이하가 발생되어 산림청에서 제시하고 있는 기준을 급경사지 붕괴예측 지표로 활용하기에 오차가 큰 것으로 분석된다. 더욱이 분석대상 급경사지의 경우 인명피해 및 재산상의 피해가 큰 경우를 대상으로 하였기에 실제 산사태 예측지표로 활용하기에는 신뢰성은 더욱 낮을 것으로 판단된다. 강우지표에 따른 신뢰성 있는 급경사지 붕괴 예보를 위해서는 강우에 의한 붕괴사례 뿐만 아니라 지형 및 지반공학적 특성 또한

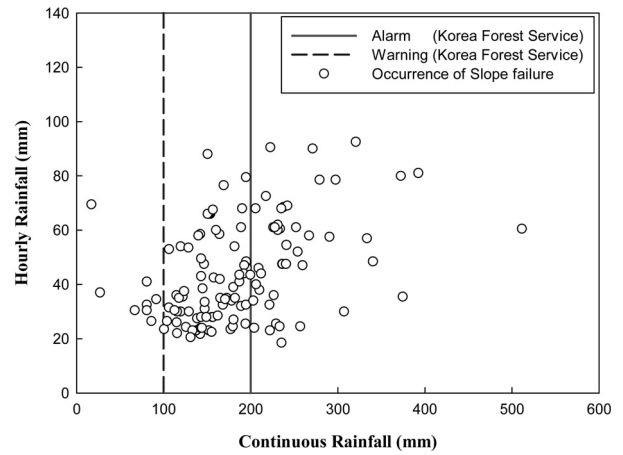
Table 3. Precipitation amounts corresponding to landslide warning and alarm (KFS, 1993)

Criterion	Warning	Alarm
Continuous Rainfall (mm)	100 ~ 200	200 or longer
Hourly Rainfall (mm)	20 ~ 30	30 or longer
Daily Rainfall (mm)	80 ~ 150	150 or longer

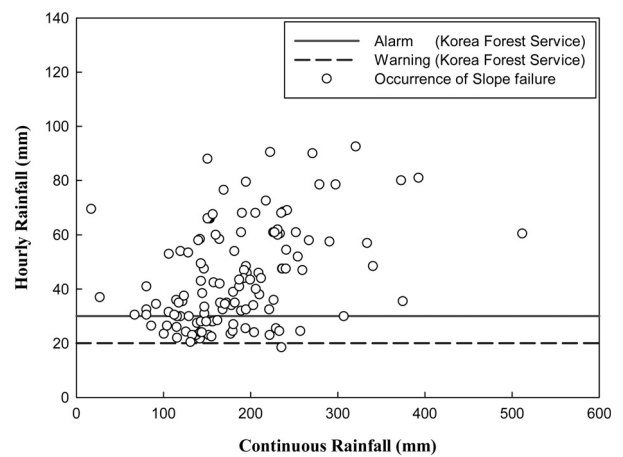
반영할 필요가 있을 것으로 사료된다.

3.2 I-D 기준한계선을 이용한 붕괴예측

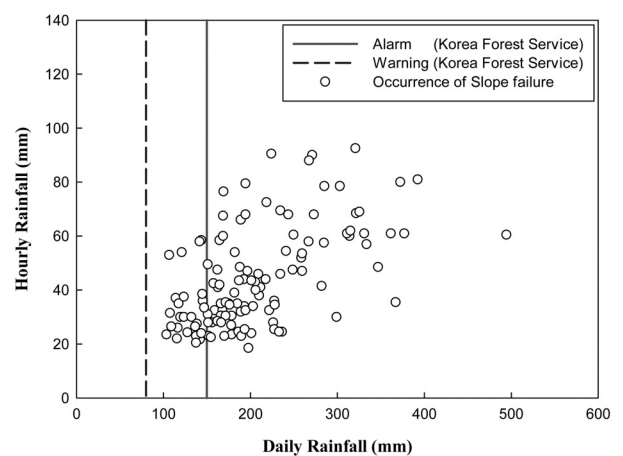
강우와 산사태 발생관계에 관한 강우강도(Intensity)-



(a) Cumulative rainfall amount criterion



(b) Hourly rainfall amount criterion



(c) Daily rainfall amount criterion

Fig. 4. Comparison of steep slope failure cases and landslide warning criterion by Korea Forest Service

기간(Duration) 기준(threshold)을 이용한 급경사지 붕괴 예측은 Caine(1980)에 의해 처음으로 제시되었다. Caine (1980)은 73개의 얕은붕괴(shallow slide)와 토석류(debris flow) 대상으로 강우기간과 강우강도가 산사태 발생에 미치는 영향을 분석하여 관련성을 I-D(Intensity-Duration) 기준을 수식으로 나타내어 급경사지 붕괴예측 기준으로 제시하고 있다. I-D 기준은 산사태 발생 시의 강우기간(X축), 강우강도(Y축)를 Double logarithmic을 이용하여 나타냈을 때, 최소경계값(minimum-level lines)을 정함으로써 구할 수 있다. I-D 기준식을 이용할 경우, 급경사지 붕괴발생 조건은 일정 강우강도에서 강우기간은 제시된 기준을 만족하는 시간보다 길어야 하며, 반대로 일정 강우기간 내에서 급경사지 붕괴가 발생하려면 기준을 만족하는 강우강도보다 커야한다. Caine(1980)의 이론은 많은 연구자들에 의해 인용되었으며, 강우강도

및 누적강우, 적용지역에 대한 추가 연구를 통하여 다양한 기준이 제시되고 있다(Table 4).

Fig. 5는 급경사지 붕괴사례에 선행연구에서 제시한 급경사지 붕괴 기준(Table 4)을 적용한 것이다. 제안된 예측기준의 적용성 검토를 위해 147개의 붕괴 재해이력 데이터를 활용하였으며, 강우기간은 누적 1시간~150 시간까지 고려하였다. 해당 기준을 급경사지 붕괴사례에 적용한 결과 Chien-Yuan et al.(2005), Dahal and Hasegawa(2008)의 기준은 우리나라 급경사지 붕괴 유발 경계 보다 상회하여 나타남을 알 수 있으며, Caine (1980), Cannon et al.(2008), Saito et al.(2010)과 Guzzetti et al.(2007)의 기준식은 최소경계값 보다 아래측에 분포 되는 것으로 나타났다. 선행연구에서 제시된 I-D 기준은 우리나라의 급경사지 붕괴를 예측할 수 있는 지표로 활용하기에는 어려울 것으로 판단된다.

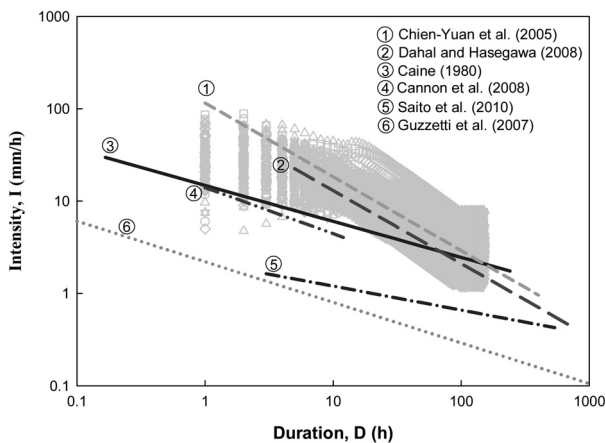


Fig. 5. Intensity-Duration threshold application

4. 강우침투 메커니즘을 이용한 급경사지 붕괴 예측법

선행연구에서 제시한 급경사지 붕괴 기준 한계선은 강우특성만을 고려한 확률론적 방법에 의해 제시된 것이다. 이러한 확률론적 예측방법은 효율적 의사결정을 위한 판단근거를 제시할 수 있는 장점이 있으나 신뢰성 높은 해석결과를 얻기 위해서는 많은 양의 자료가 소요되는 단점이 있다(Park, 2011). 또한, 선행연구에서 제시한 급경사지 붕괴 기준 한계선은 지형 및 지반특성을 반영하지 않고 단지 지역적 강우 사상만을 고려하여 제시되어 급경사지 붕괴를 예측할 수 있는 지표로 활용하기

Table 4. I-D criterion for steep slope failure (revised after Satio et al., 2010)

Proposer	Area	Equation	Range (D)
Caine (1980)	World	$I = 14.82D^{-0.39}$	$0.167 < D < 240$
Jibson (1989)		$I = 30.53D^{-0.57}$	$0.5 < D < 12$
Guzzetti et al. (2007)		$I = 2.20D^{-0.44}$	$0.1 < D < 1,000$
		$I = 2.28D^{-0.20}$	$0.1 < D < 48$
		$I = 0.48D^{-0.11}$	$48 < D < 1,000$
Larsen and Simon (1993)		Puerto Rico	$I = 91.46D^{-0.82}$
Chien-Yuan et al. (2005)	Taiwan	$I = 115.47D^{-0.80}$	$1 < D < 400$
Cannon et al. (2008)	Southern California	$I = 14.0D^{-0.5}$	$0.167 < D < 12$
Dahal and Hasegawa (2008)	Nepal Himalaya	$I = 73.90D^{-0.79}$	$5 < D < 720$
Jibson (1989)	Japan	$I = 39.71D^{-0.62}$	$0.5 < D < 12$
Hong et al. (2005)	Shikoku Island, Japan	$I = 1.35 + 55D^{-1.00}$	$3 < D < 537$
Saito et al. (2010)	Japan	$I = 2.18D^{-0.26}$	$3 < D < 537$

에는 어려울 것으로 판단된다. 급경사지 붕괴는 지속적인 강우 혹은 집중강우가 지반에 침투됨에 따라 발생된다는 메커니즘을 기존 연구결과들로 부터 알 수 있다 (Cho and Lee, 2000; Rahardjo et al., 2007; Park and Shin, 2009; Jeong et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 지형 및 지반특성, 즉 경사와 불포화 지반특성을 고려할 수 있는 안정이론(Shin et al., 2013)을 도입하여 강우침투로 인한 모관흡수력의 감소와 자중의 증가로 인한 붕괴 메커니즘을 급경사지 붕괴예측에 활용하고자 하였다.

불포화 무한사면의 강우에 의한 안전을 산정식 (1)에서 가장 중요한 3가지 영향인자는 다음과 같다. 첫째는 강우강도와 강우지속시간에 의해 침윤전선(wetting front)의 깊이를 결정하기 위한 1차원 침투이론(one dimensional infiltration model)이다. 두 번째는, 흡입자에 전달되는 유효응력에 의해 결정되는 불포화 지반의 전단강도(unsaturated shear strength)이다. 그리고 마지막으로 강우에 의한 침윤전선이 하강할 때, 침윤전선 내부의 간극수압 분포이다.

본 연구에서는 Mein and Larson(1973) 침투모델 및 Lu and Likos(2006)의 전단강도 모델을 사용하고 강우발생에 따라 간극수압이 비선형적으로 변화하는 간극수압 분포(Rahardjo et al., 1995; Gavin and Xue, 2008)를 고려하여 아래 식을 이용하여 안정해석을 수행하였다.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\sigma_n - u_a + \sigma_s) \tan \phi'}{\tau} \quad (1)$$

여기서, τ_f 는 파괴시 전단강도(shear strength at failure), τ 는 전단저항응력(shear resisting stress), c' 는 점착력(cohesion), σ_n 은 법선응력(normal stress), σ_s 는 흡입응력(suction stress)이다.

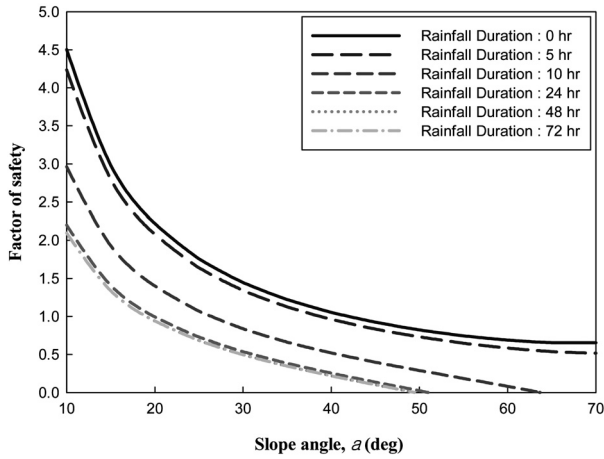
이러한 무한사면 안전을 산정식을 통해 사면경사와 지반의 수리역학적 특성(Soil-Water Characteristic Curve; SWCC)과 불포화 투수곡선-역학적 특성(지반의 불포화 전단강도 특성(c', ϕ', σ_s))을 고려 할 수 있다. 급경사지 안정해석에 적용된 풍화토의 수리-역학적특성은 급경사지 재해발생 빈도가 가장 높은 편마암 지역의 비교란 시료를 채취하여 불포화 삼축실험 및 현장투수시험을 통해 산정하였다(Table 5).

강우침투로 인한 모관흡수력의 감소와 자중의 증가를 고려한 불포화 거동특성을 반영하여 사면안정 해석을 수행하였다(Fig. 6). 해석결과로부터 급경사지 경사가 크면 초기 안전율이 작게 산정됨을 파악할 수 있으며, 강우기간, 강우강도가 증가할수록 안전율이 저하됨을 알 수 있다. 즉, 동일 경사에서 강우 발생시간이 증가할수록 안전율이 감소하는 것으로 분석되었다(Fig. 6a). 이러한 안전율 감소는 강우강도가 클수록 크게 나타난다(Fig. 6b).

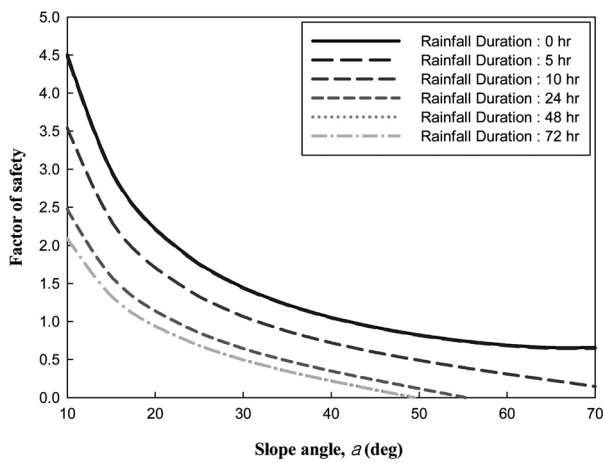
불포화 무한사면 안정식(식 (1))은 내적인 요소로 사면경사와 지반의 수리적-역학적 특성을 반영하여 안전율을 계산한다. 따라서 지반특성 등 내적영향 요소를 파악하고 있다면 다양한 조건의 강우특성을 반영하여 안전율을 산정할 수 있으며(Fig. 7), 이를 이용하여 급경사

Table 5. Characteristics of Hydro/Mechanical properties and Suction Profile

USGS	Hydro properties					
SC	SWCC parameter					Permeability, k_s (cm/s)
	Condition	a (kPa)	n	m	$\Delta\theta$	
	Wetting	0.33	0.45	1.06	0.14	2.28E-05
	Mechanical properties					
	α (deg)	H (m)	r_t (kN/m ³)	r_{sat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
	20~50	5.0	15.98	1.89	7.79	33.24
	Suction Profile					
s_o (kPa)			w_{fsh} (m)			
14			1			
Comment	• s_o : initial soil suction (In-situ Result)					
	• w_{fsh} : water front suction head (evaluated from ASCE, 1996)					
	• $\Delta\theta$: volumetric water content change by saturation					
	• S_e : Van Genuchten (1980) : $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [a(u_a - u_w)^n]} \right]^m$					



(a) Rainfall intensity = 10 mm/hr



(b) Rainfall intensity = 40 mm/hr

Fig. 6. Variation of factor of steep-slope safety with increasing slope angle for different rainfall durations and rainfall intensities

지 붕괴예측 기준을 제시할 수 있다.

따라서 본 절에서는 불포화 무한사면 안정식을 통해 산정된 안전율에 안전수준을 나타낼 수 있는 경계기준 ((안전: $F_s > 1.3$; 경보: $1.0 < F_s < 1.3$; 붕괴위험: $F_s < 1.0$)을 제시하여 급경사지 붕괴예측 기준으로 활용할 수 있다(Fig. 8).

또한, 불포화 무한사면 안정식을 통해 산정된 안전율은 강우강도 및 강우지속시간의 관계에 의해 산정된 값이므로, 급경사지 붕괴 위험단계에 해당하는 강우량을 I-D 기준 수식으로 나타낼 수 있다. 급경사지 붕괴 위험단계의 경보기준($F_s=1.3$)에 대응하는 I-D 기준은 식 (2)이며, 붕괴($F_s=1.0$)에 대응하는 I-D 기준은 식 (3)과 같다.

$$I_{failure} = 476.2D^{-0.99} \quad (2)$$

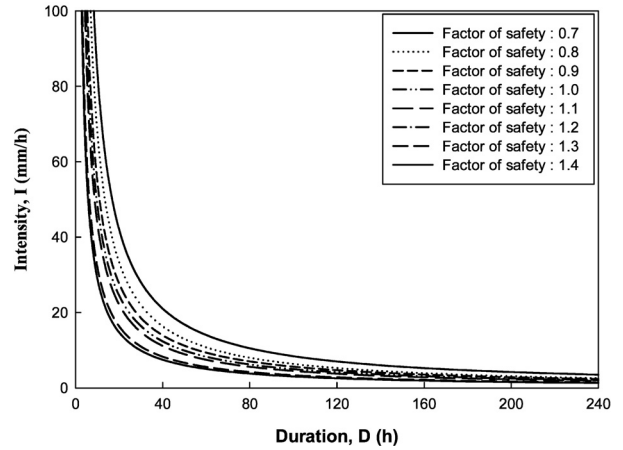


Fig. 7. Factor of safety based on rainfall intensity and duration (slope angle=30°)

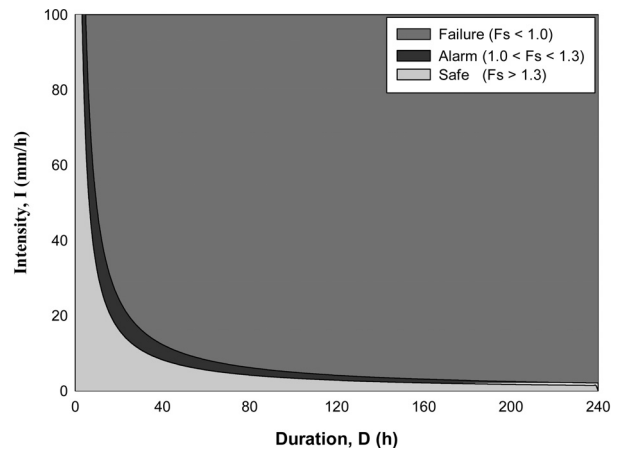


Fig. 8. Steep slope failure estimation model determined based on Factor of safety

$$I_{alarm} = 307.9D^{-0.98} \quad (3)$$

앞서 선행연구에서 제시된 I-D 기준 수식은 지형 및 지반특성을 반영하지 않고 단지 지역적 강우 사상만을 고려하여 제시된 것이다. 그러나 본 연구에서 제시한 I-D 기준은 강우특성 뿐만 아니라 급경사지 경사와 지반공학적 특성을 동시에 반영하여 선행연구에서 분석된 문제점을 보완하였다. 향후 다양한 경사 및 지반특성 별로 급경사지 붕괴예측 I-D 기준을 제시한다면 신뢰성 있는 급경사지 붕괴예측이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

선행연구에서 제시한 급경사지 붕괴 기준 한계선은 지형 및 지질인자를 반영하지 않고 단지 지역적 강우

사상만을 고려하여 제시된 것이다. 따라서 지역적 강우 특성과 산사태 발생빈도가 상이하게 다르기 때문에 이들 한계선 기준을 적용하여 우리나라의 급경사지 붕괴를 예측할 수 있는 지표로 활용하기에는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 불포화 무한사면 안정이론을 도입하여 급경사지 붕괴예측 기준으로 활용하고자 하였다.

본 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 147건의 급경사지 붕괴사례를 분석한 결과, 강우가 급경사지 붕괴에 큰 영향인자라는 사실을 파악할 수 있었으며, 기반암 풍화도 별로 붕괴발생 빈도가 차이가 발생함을 알 수 있었다.
- (2) 선행연구에서 제시한 급경사지 붕괴 기준 한계선은 지형 및 지반특성을 반영하지 않고 단지 지역적 강우 사상만을 고려하여 제시되어 급경사지 붕괴를 예측할 수 있는 지표로 활용하기에는 어려울 것으로 판단되었다.
- (3) 강우 지반침투로 인한 모관흡수력의 감소와 자중의 증가로 인한 불포화 무한사면의 안정이론을 도입하여 급경사지 붕괴예측 기준에 활용하기 위한 적용성을 검토하였다.
- (4) Mein과 Larson(1973) 침투모델 및 Fredlund 등(1978)의 전단강도 모델을 사용하고, 강우발생에 따라 간극수압이 비선형적으로 변화하는 간극수압 분포를 고려하여 안정해석을 수행하였다.
- (5) 불포화 무한사면 안정식을 통해 산정된 안전율에 안전수준을 나타낼 수 있는 경계기준을 제시하여 급경사지 붕괴예측 기준으로 활용할 수 있다. 또한 급경사지 붕괴 위험단계에 해당하는 강우량을 Intensity-Duration 기준 수식으로 제안하였다.

참 고 문 헌

1. ASCE (1996), Hydrology handbook, Second Edition, ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No.28, pp.75-90.
2. Caine, N. (1980), "The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows", *Physical Geography*, Vol.62, No.1/2, pp.23-27.
3. Cannon, S., Gartner, J., Wilson, R., Bowers, J., and Laber, J. (2008), "Storm Rainfall Conditions for Floods and Debris Flows from Recently Burned Areas in Southwestern Colorado and Southern California", *Geomorphology*, Vol.96, pp.250-269.
4. Chien-Yuan, C., Tien-Chien, C., Fan-Chieh, Y., Wen-Hui, Y., and Chun-Chieh, T. (2005), "Rainfall Duration and Debris-Flow Initiated Studies for Real-Time Monitoring", *Environmental Geology*, Vol.47, pp.715-724.
5. Cho, S. E. and Lee, S. R. (2000), "Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes Due to Rainfall Infiltration", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.16, No.1, pp.51-64.
6. Dahal, R. K. and Hasegawa, S. (2008), "Representative Rainfall Thresholds for Landslide in the Nepal Himalaya", *Geomorphology*, No.100, pp.429-443.
7. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. (1978), "The Shear Strength of Unsaturated Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.313-321.
8. Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. (2007), "Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe", *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.98, pp.239-267.
9. Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. (2008), "The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows: An Update", *Landslides*, Vol.5, pp.3-17.
10. Hong, Y., Hiura, H., Shino, K., Sassa, K., Suemine, A., Fukuoka, H., and Wang, G. (2005), "The Influence of Intense Rainfall on the Activity of Large-Scale Crystalline Schist Landslides in Shikoku Island, Japan", *Landslides*, Vol.2, pp.97-105.
11. Ikeya, H. (1989), "Debris Flow and Its Countermeasures in Japan", *Bulletin of the IAEG*, Vol.40, pp.15-30.
12. IPCC (2007), *Climate change, 2007: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp.996.
13. Jeong, S. S., Choi, J. Y., and Lee, J. H. (2009), "Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.29, No.1, pp.1-9.
14. Jibson, R. (1989), "Debris Flow in Southern Puerto Rico", Special Paper of *Geological Society of America*, Vol.236, pp.29-55.
15. Gavin, K. and Xue, J. (2008), "A Simple Method to Analyze Infiltration into Unsaturated Soil Slopes", *Computers and Geotechnics*, Vol.35, pp.223-230.
16. Kim, Y. M. and Jung, S. W. (2000), "A Study on the Rainfall-Triggered Landslides in Tajon-Chungnam Area", *Journal of Civil Engineering*, Vol.20, No.4-C, pp.341-355.
17. KFS (1993), *Manual of Investigation and Evaluation of Potential Landslide Areas*, Korea Forest Service.
18. Larsen, M. and Simon, A. (1993), "A Rainfall Intensity-Duration Threshold for Landslides in a Humid-Tropical Environment, Puerto Rico", *Physical Geography*, Vol.75, pp.13-23.
19. Lu, N. and Likos, W. J. (2006), "Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
20. Mein, R. G. and Larson, C. L. (1973), "Modeling Infiltration During a Steady Rain", *Water Resources Research*, Vol.9, No.2, pp.384-394.
21. NIDP (2010), *Improvement of Disaster Warning System for Steep Slope*, NIDP Research Report, NIDP-PR-2010-01-02, National Institute of Disaster Prevention, pp.116-121.
22. NIMR (2009), *Understanding of Climate Change II*, KMA Research Report, 11-1360395-000160-01, National Institute of Meteorological Research, pp.3-26.
23. Park, D. K., Oh, J. R., Son, Y. J., and Lee, M. S. (2009), "Analysis

- of the Steep Slope Disasters in 2009”, *Proc. of the 35th KSCE Conference*, Hoengseong, pp.88-91.
24. Park, S. W. and Shin, G. H. (2009), “Stability Analysis on Unsaturated Gneiss Weathered Soil Slopes Considering Wetting Path Soil-Water Characteristic Curve”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.29, No.5C, pp.191-198.
 25. Park, Y. W., Kim, K. L., and Y, W. K. (1993), “A Study on Yongin-Ansung Landslides in 1991”, *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.9, No.4, pp.103-116.
 26. Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., and Fredlund, D. G. (1995), “Shear-Strength Characteristics of a Residual Soil”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, No.1, pp.160-77.
 27. Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., and Leong, E.C. (2007), “Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes Under Rainfall”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.12, pp.1532-1543.
 28. Saito, H., Nakayama, D., and Matsuyama, H. (2010), “Relationship Between the Initiation of a Shallow Landslide and Rainfall Intensity-Duration Thresholds in Japan”, *Geomorphology*, Vol.118, pp.167-175.
 29. Shin, H., Kim, Y. T., and Park, D. K. (2013), “Development of Rainfall Hazard Envelope for Unsaturated Infinite Slope”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.2, pp.351-356.
 30. Van Genuchten, M. T. (1980), “A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898.

(접수일자 2013. 4. 2, 심사완료일 2013. 5. 21)