

산지지형 및 강우 침투양상 변화에 따른 산지사면 안정성 평가

김만일^{1*} · 이승우¹ · 김병식²

¹산림조합중앙회 산림공학연구소

²강원대학교 방재전문대학원

Slope Stability Assessment Induced by Variation in Mountain Topography and Rainfall Infiltration

Man-Il Kim¹, Seung-woo Lee¹, and Byung-Sik Kim²

¹Forest Engineering Institute, National Forestry Cooperatives Federation

²Department of Urban and Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University

Received 5 April 2017; received in revised form 18 April 2017; accepted 21 April 2017

우리나라는 국토의 64% 가량이 산지로 되어 있어 하절기 집중호우 및 태풍으로 인해 지속적인 산지재해(사면붕괴, 산사태, 토석류 등)가 발생하고 있다. 이러한 산지를 중심으로 사회기반시설의 개발 및 확충을 통해 산지 개발이 이루어지고 있으나 체계적인 관리는 미흡한 실정이다. 산지사면을 대상으로 임도시설의 개설은 대상 산지를 인위적으로 변화시킴에 따라 하절기에 집중적으로 산지재해 발생의 원인으로도 작용한다. 이처럼 불안정한 상태의 산지환경에서 재해에 강한 환경을 건설하기 위한 노력이 절실히 요구되는 시점이다. 본 연구는 자연산지와 산지 내 임도 개설 여부를 기준으로 극한강우 조건하에서 강우의 침투특성을 고려하여 토층심도(1~5 m) 및 산지경사(20~60°) 조건에 따른 산지사면의 안정성을 분석하였다. 그 결과, 산지사면의 안정성은 토층심도와 토층의 포화면적에 따라 안전율의 차이를 갖는 것으로 나타났으며, 산지 내 임도 개설에 따른 산지의 안정성이 자연산지보다 낮은 것으로 분석되었다. 특히, 강우 침투양상의 경우에는 임도 상부측 사면부에서 강우 침투수의 유출이 발생하는데 이는 토층심도가 낮을수록 유출 현상이 뚜렷이 발생하는 것으로 나타났다.

주요어: 산지사면, 임도, 침투양상, 산사태, 안정성

Approximately 64 percent of Korean territory is covered with mountains, and there is occurred a continuous mountain disaster such as landslide, debris flow and slope failure around mountain slopes due to heavy rainfall and typhoon in the summer season. Even in such a reality, the development of mountain areas is being carried out through the development and expansion of social infrastructures centered on mountain areas, but systematic management is insufficient. Constructions of a forest road facility for mountain slopes can be a cause of mountain disasters intensively in the summer season due to artificially changing the mountain area. In this unstable mountain environment, efforts to build a disaster-resistant environment are urgently needed. This research is to analyze the stability of mountain slopes according to soil depth (1~5 m) and mountain slope (20~60°) considering the characteristics of rainfall infiltration under extreme rainfall conditions. As a result, the stability of the mountain slope was found to be different according to the depth of soils and the saturation area of the soil layer. As well as the stability of the mountain area was found to be lower than that of the natural mountain area. Specially, rainfall infiltration occurs at the upper slope of the forest road. For this reason, the runoff phenomenon of rainfall infiltration water occurs clearly when the depth of soil layer is low.

Key words: mountain slope, forest road, rainfall infiltration, landslide, stability

*Corresponding author: mikim@nfcf.or.kr

© 2017, 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 64% 가량이 지형 기복이 심한 산지로 이루어져 있어 하절기 집중호우 및 태풍 등으로 인해 산지재해가 빈번히 발생되고 있다. 이러한 불리한 상황 속에서도 우리나라의 지속성장을 위한 사회기반시설 확충이나 산림자원을 이용하기 위해서는 불가피하게 인위적으로 산지개발을 통해 산림경영이 진행되어 오고 있으나 관리 측면에서는 미흡한 상황으로 볼 수 있다.

이에 산지 내 기반시설을 확충하거나 시공하는 경우에는 대부분 불가피하게 인위적으로 절성토사면이 형성되게 된다. 특히, 임도의 대부분은 그 시공 대상지의 지형이 험준하여 지형의 사면 경사가 급하게 조성되고 있어 대상 지역에 대한 사면 안정성 확보를 위한 현장여건에 적합한 공법이 적용되어야 하지만 현실은 이를 적극 반영하지 못하고 있다. 이러한 문제는 산지 지반의 균형을 무너뜨리는 결과를 가져올 수 있음에도 적절한 평가와 대책이 마련되지 못하여 산지지반의 불안정성이 높아질 수 있으며, 이는 결국 강우 등에 의한 외부적인 요인이 가해져 산사태나 토석류를 야기할 수 있다.

더불어 최근에는 이상기후로 인해 지속시간은 짧고 좁은 지역에 강우가 집중되는 국지성 호우 특성을 가지게 됨에 따라 산지에서 산사태나 토석류의 발생 가능성은 과거보다 점점 높아지고 있다. 이러한 원인으로 최근까지 산지재해 저감을 위한 많은 연구(Kim et al., 2007; Kim et al., 2008; Kim and Chae., 2009; Chae and Kim, 2012; Kim et al., 2013)와 노력이 있었음에도 최근 10년간의 자연재해 사망자 중 26%에 해당하는 사망자가 산지재해로 인해 발생하였다. 이는 산지에 지속적으로 기반시설을 확충하는 과정에서 산지지반의 균형이 무너지고 이상기후로 강우패턴이 변화되었기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

본 연구에서는 산지사면의 지형특성 및 강우침투 양상을 함께 고려할 수 있도록 산지의 지반조건(토층심도와 산지사면 경사)과 임도 개설 여부에 따른 조건별 사면안정 분석을 실시하였다. 이를 통해 산지 지형의 변화와 강우 침투양상에 따른 산지사면의 안정성을 토층심도와 경사를 기준으로 분석·평가함으로써 산지재해에 강한 산지 활용 증대를 위한 방안을 제시하고자 한다.

이론적 배경

사면안정 분석모델

산지사면의 지형변화에 따른 안정성을 평가하기 위하여 무한사면모델을 활용하였으며, 이는 산사태의 길이가 매우 길다고 가정하는 모델로서 국내외에서 발생하는 산지재해 분석에 광범위하게 적용되는 모델이다(Fourie et al., 1999;

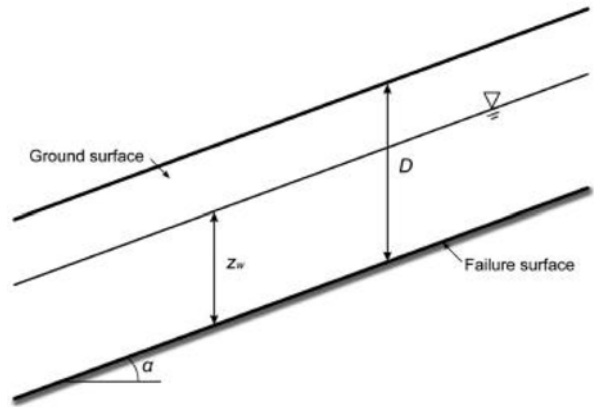


Fig. 1. Infinite Slope Model with groundwater level in unsaturated soil slope.

Tsai, 2010; Lee et al., 2012; Lee and Park, 2012)

기존의 무한사면모델에서는 사면의 안정성을 판단하기 위해 안전율을 산정하는데 Fig. 1과 같이 강우 시 무한사면 내 지하수위가 파괴면(failure surface)으로부터 z_w 되는 곳에 있으며, 사면과 평행한 방향으로 침투가 일어난다고 가정하여 사면의 안전율은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$FS = \frac{c + \gamma(1 - z_w) + (\gamma_{sat} - \gamma_w)z_w D \cos^2 \alpha \tan \Phi}{\gamma D \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

여기서, α 는 사면의 경사, c 는 흙의 점착력, Φ 는 마찰각, γ 은 흙의 단위중량, γ_{sat} 는 흙의 포화단위중량, γ_w 는 물의 단위중량, D 는 사면의 깊이를 의미한다.

이처럼 기존의 무한사면모델을 이용하여 안정해석을 수행하는 연구에서는 집중강우에 따른 강우조건을 감안하기 위하여 지하수위를 임의 가정하여 분석을 수행하였다. 그러나 지하수위를 임의로 가정하여 해석하는 경우, 강우강도와 사면 구성물질의 수리특성을 반영하지 못한다는 단점을 가지고 있기 때문에 현실적인 강우에 의해 토층이 포화되는 과정과 실제 지형에 의한 침투 양상을 검토할 수 없는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 기존 무한사면모델에 유기 시에는 현실적인 강우침투 양상을 고려하기 위하여 불포화토의 함수특성과 불포화투수계수 특성을 반영하여 사면안정성 변화를 분석하였다

공극수에 따른 체적함수비와 모관흡수력 관계 이론

불포화토에서 물의 흐름은 공극 내 공기가 차지하고 있는 부분으로는 흐르지 않으며, 공극이 연결되어 있는 조건 하에서 연속된 물로 이루어진 통로를 통해서만 흐름이 발생한다. 불포화토에서도 Darcy의 법칙이 적용 가능하나 이때는 투수계수가 상수가 아닌 모관흡수력(matric suction) 또는 포화도(Saturation) 등의 함수로 표현된다(Trandafir et al., 2008; Jeong and Choi, 2009).

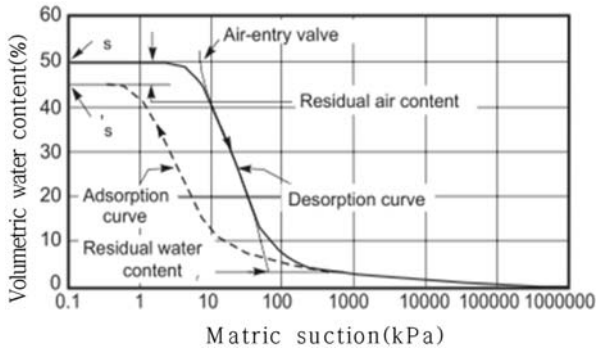


Fig. 2. Soil-Water Characteristic Curve (Fredlund and Xing, 1994).

함수특성곡선은 지반의 고유특성으로 불포화 지반의 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성으로써 흙 입자 사이에 포함된 물(공극수, pore water)의 양과 모관흡수력과 관계로 일반적으로 Fig. 2와 같이 체적함수비와 모관흡수력의 관계로 나타낼 수 있다.

포화된 공극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기유입값(air-entry value)을 초과할 때까지는 흙의 공극에서 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기유입값은 공극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 그리고 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 추출되지 않는 함수비를 잔류함수비(residual water content)라고 하며, 공극 내 잔류된 물은 열에 의해서만 제거할 수 있다. 함수특성곡선은 압력관 추출 실험장비, 모관흡수력을 측정할 수 있는 센서 등을 이용하여 측정이 가능하며, 최근에는 인공지능망을 이용한 함수특성곡선 추정기법도 이용되고 있다(Oh et al., 2008).

Fig. 3과 같이 불포화투수계수곡선은 흙 입자사이의 공극에 존재하는 물의 양인 함수비에 따라 크게 영향을 받는데 이는 함수비에 따라 투수성이 변하게 되므로 함수특성곡선과 유사한 형태로 나타난다.

모관흡수력(matric suction)은 불포화토에서 물-공기 접촉면에서는 수압보다 큰 공기압이 작용하게 되며 이의 압력차를 의미한다. 즉, 물 표면에서 공기압과 수압의 차이로써 외부

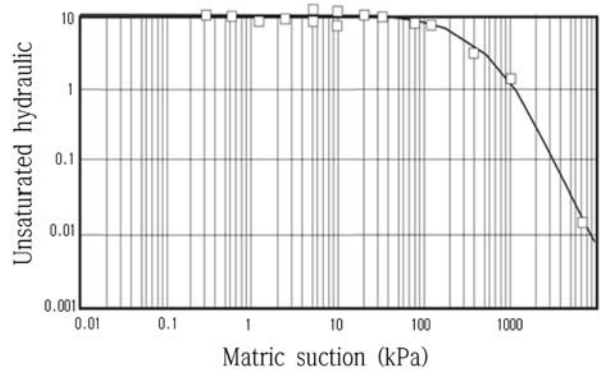


Fig. 3. Unsaturated hydraulic conductivity curve (Fredlund and Xing, 1994).

환경에 의해 변하게 되고 흙의 평형상태에 영향을 미친다. 흙 입자사이의 공극은 물이 지하수면 위로 상승하게 하는 모세관 같은 역할을 하며, 이 모세관 현상은 모관흡수력과 관련이 있다. 모관흡수력은 공극의 크기 분포에 따라 영향을 받게 되는데 공극 내 물과 흙의 접촉면에서의 평형은 모관흡수력과 표면장력이 균형을 이루어 유지된다. 이때 물-공기 접촉면을 통해 물의 자중이 흙 입자구조에 압축력을 가하여 결국 모관흡수력에 의해 전단강도가 증가하게 된다.

강우침투 해석 시 이러한 모관흡수력에 따라 침투깊이를 고려하여야 하는데 강우가 지속되면 산지사면부 내로 강우가 침투하여 표면부가 우선적으로 포화되면서 지표유출도 함께 발생되기 때문에 극한강우 조건하에서의 침투양상은 강우 침투를 고려한 침투깊을 파악하는 과정이 필요하다.

침투해석 기반의 산지사면 안정성 분석

해석 단면 결정

국내 산지지형의 특성상 복잡한 지형특성을 최대한 단순화하여 해석 모델을 Fig 4(a)와 같이 무한사면으로 가정하였으며, 임도가 개설된 산지사면은 중심부에 폭 6m의 임도를 Fig. 4(b)와 같은 형태로 모델을 구성하였다. 토층심도는 사면 경사와 수평한 형태로 1~5 m 범위 내에서 1m 단위로 적용하였다.

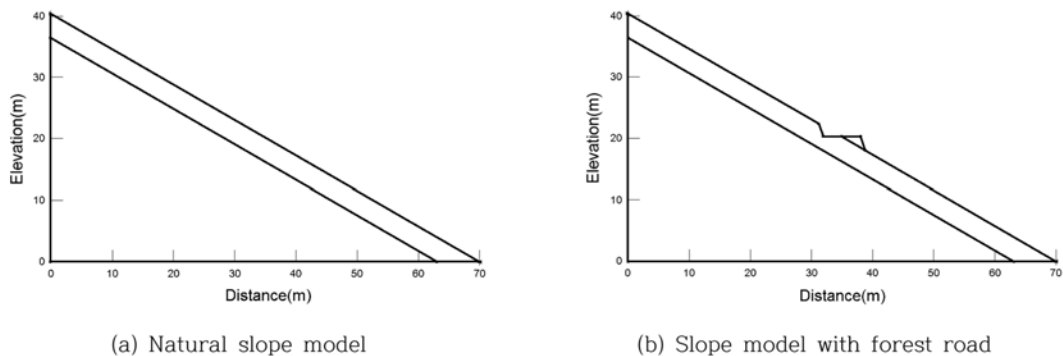


Fig. 4. Analysis Models considering the variation of soil depth and slope angle.

Table 1. Input data of geotechnical properties.

	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Permeability (m/sec)
Soil	19	20	28	1.0×10 ⁻⁴
Bed rock	21	50	35	impermeable
Slope angle	20°, 30°, 40°, 50°, 60°			

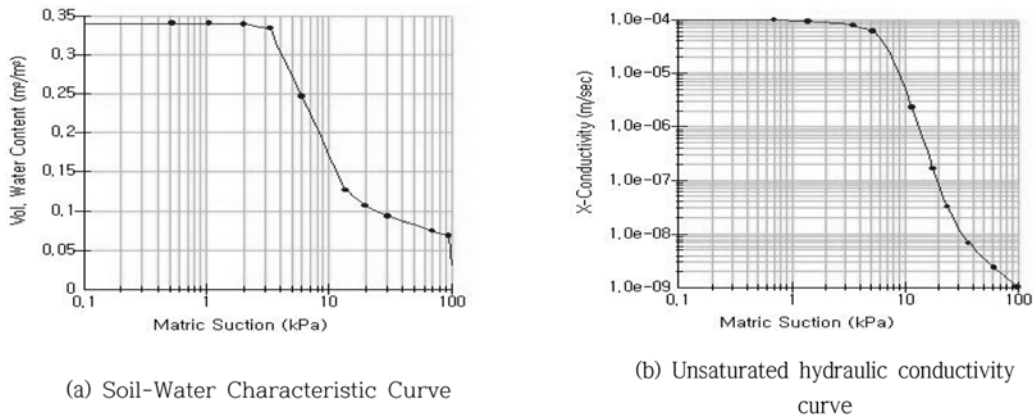


Fig. 5. Characteristics of Rainfall infiltration analysis between soil-water characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivity curve.

해석에 반영할 경사의 범위는 사방기술교본(산림청, 2014)에서 제시하고 있는 임도 개설 시에 시공이 가능하다고 평가받는 20~60°의 범위를 고려하여 10° 단위로 해석에 적용하였다. 또한, 해석에 적용된 지반물성은 강원도 홍천군 임도 개설시 실시된 조사자료에 수록된 평균값을 참고로 Table 1과 같이 적용하였다.

함수특성곡선과 불포화 투수계수곡선 선정

함수특성곡선과 불포화투수계수곡선은 흙 입자사이의 공극수 분포에 따라 불포화 지반의 거동 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이다. 함수특성곡선과 불투수계수곡선은 Green & Corey 기본이론방정식(1971)을 이용한 기존 연구 문헌을 참고하여 선정하였으며, 기반암의 경우는 불투수층으로 가정하였다(Geo-Slope, 2007). 강우침투에 대한 토층과 쌓기체에 적용된 함수특성곡선과 불투수계수곡선은 Fig. 5와 같다.

강우조건

침투해석 시 강우조건은 확률강우량도 개선 및 보완 연구의 부록에 수록되어 있는 전국 주요지점의 확률강우량을 적용하였다(Ministry of Construction and Transportation, 2011).

본 연구에서는 국내 배수시설 설계 시 적용되는 재현기간과 지속시간의 범위를 고려하여 재현기간 100년 및 지속시간 48시간 내 자료를 검토하여 최대확률강우량을 분석하였다. 분석 결과에서 대관령지역에서 재현기간 100년(지속

시간 48시간)의 경우가 637.5 mm로 우리나라 최대확률강우량을 보였다. 따라서 지속시간 48시간을 기준으로 국내에서 발생 가능한 최대확률강우량 640 mm를 선정하여 우기시 안정 해석에 적용하였다.

결과 및 토의

토심과 경사 변화에 따른 안전율 변화

수치해석 결과, 토심이 깊어지고 경사가 급해질수록 임도 개설 여부와 상관없이 안전율이 감소하는 경향을 보였다 (Table 2). 또한 건기와 우기시의 안전율의 경우 토심이 일정 깊이로 증가할 경우에는 안전율이 점진적으로 수렴하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

특히, 사면경사각 30도의 경우, 토층깊이 5 m인 산지사면 조건에서는 건기시(FS=1.692)와 우기시(FS=1.633)의 안전율 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 강우의 침투량보다 지표유출이 더 많이 발생되어 파괴면까지 포화가 진행되지 않았기 때문인 것으로 볼 수 있다.

이에 대해서는 Fig. 6에서와 같이 토층이 1 m일 경우를 고려해 보면 적용된 강우강도로 토층이 대부분 포화되는 경향을 보임에 따라 안정성 해석 시 건기와 우기의 안전율 차이가 확연하게 나타나는 반면 토층심도가 5 m에 대해서는 적용된 강우강도로 토층이 완전 포화되지 않기 때문에 건기와 우기시의 안전율의 변화폭이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

Table 2. Stability analysis results considering the two kind of slope situation.

Natural slope				Slope with forest road			
Slope (°)	Soil depth (m)	Dry season (FS)	Rainy season (FS)	Slope (°)	Soil depth (m)	Dry season (FS)	Rainy season (FS)
20	1	6.862	6.012	20	1	4.215	3.303
	2	3.994	3.208		2	3.683	3.053
	3	3.156	2.675		3	3.016	2.524
	4	2.763	2.515		4	2.725	2.379
	5	2.526	2.383		5	2.507	2.351
30	1	4.644	4.129	30	1	3.259	2.23
	2	2.766	2.449		2	2.431	2.091
	3	2.172	1.937		3	1.964	1.836
	4	1.875	1.749		4	1.790	1.588
	5	1.692	1.633		5	1.653	1.516
40	1	3.874	3.526	40	1	2.365	1.88
	2	2.256	1.993		2	1.902	1.865
	3	1.726	1.43		3	1.580	1.426
	4	1.454	1.384		4	1.409	1.351
	5	1.307	1.253		5	1.275	1.22
50	1	3.690	3.458	50	1	1.498	1.335
	2	2.220	1.856		2	1.232	1.127
	3	1.549	1.345		3	1.164	1.122
	4	1.271	1.214		4	1.139	1.056
	5	1.106	1.055		5	1.030	0.982
60	1	3.550	3.302	60	1	1.146	1.115
	2	2.110	1.815		2	0.983	0.965
	3	1.547	1.329		3	0.979	0.913
	4	1.212	1.095		4	0.911	0.905
	5	1.060	0.997		5	0.862	0.837

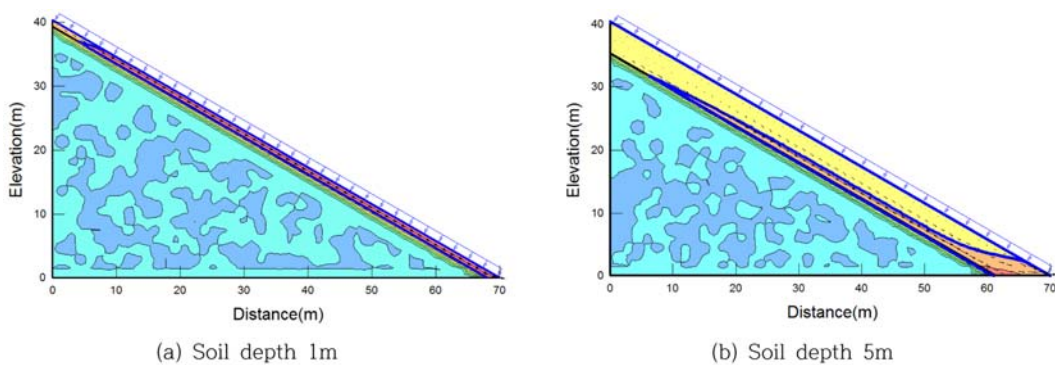


Fig. 6. Infiltration analysis considering the difference of soil depths on slope 30°.

임도 개설 유무에 따른 안전율 분석

산지사면 내 임도 개설 여부에 따라 변화되는 안정성 분석 결과, 동일한 경사와 토층을 갖는 지반조건에서 임도가 개설된 상태에서 안전율이 상대적으로 낮게 나타나는 것으로 분석되었다. 그러나 토양깊이가 깊을수록 임도개설에 따

른 산지사면의 안정성에는 영향을 주지만 큰 폭의 차이는 나타나지 않았다.

Fig. 7은 사면경사 30도를 갖는 자연산지 사면과 임도 개설 사면에 대한 파괴선의 형성 결과를 도시한 것이다. 여기서, 토층심도 2m 이하일 경우에는 임도가 개설됨에 따라

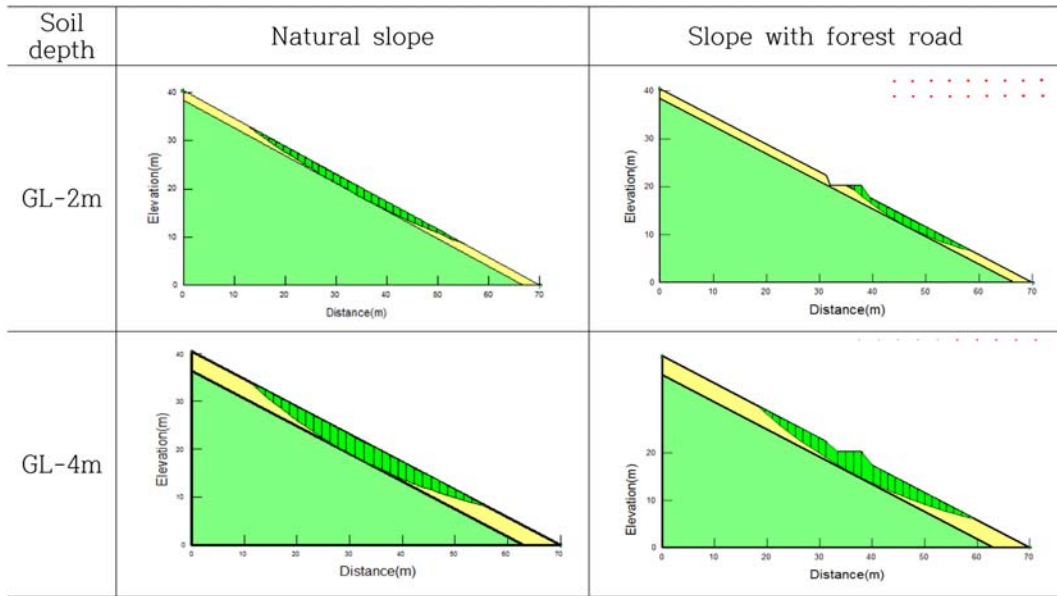


Fig. 7. Variation of slope stability caused by difference soil depth within slope 30°.

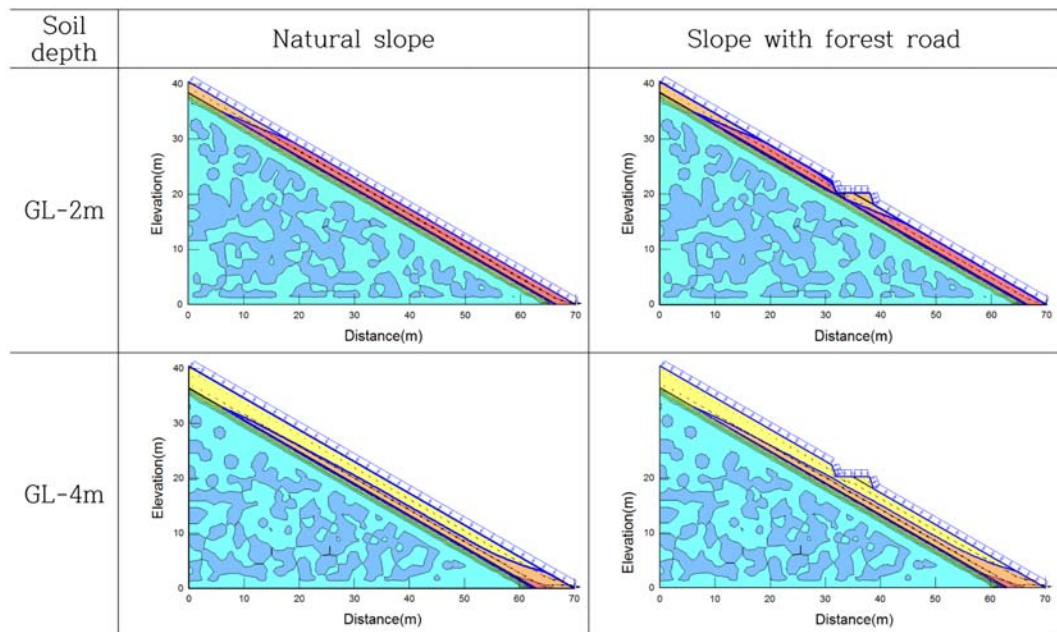


Fig. 8. Variation of rainfall infiltration caused by difference soil depth within slope 30°.

최소안전율을 갖는 파괴면이 임도가 개설된 부분에 집중되어 나타남에 따라 안전율에 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 반면에 토층심도가 4m인 경우에는 파괴면이 깊은 형태로 형성됨에 따라 임도 개설에 따른 영향은 받지 않는 것으로 판단할 수 있다.

임도 개설에 따른 침투양상 분석

임도 개설 여부에 따른 우기시 강우 침투양상 분석 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 토층심도가 낮은 자연산지 사면일

경우에는 토층이 대부분 포화된 상태로 분포하나 임도가 개설된 후에는 임도 주변으로 강우 침투양상의 변화를 확인할 수 있다. 특히, 임도를 기준으로 상부측 사면에서는 침투수 유출이 발생한 후 임도 하부측 사면에서는 강우의 침투가 다시 발생됨을 알 수 있다. 따라서 자연산지 사면에서의 강우 침투양상은 하나의 단일 침투양상으로 간주할 수 있으나, 임도 개설 후에는 임도를 기준으로 상부와 하부사면을 양분하여 침투양상을 분석할 필요가 있음을 의미한다.

즉, Fig. 9와 같이 상부 구간에 침투한 침투수가 시간이

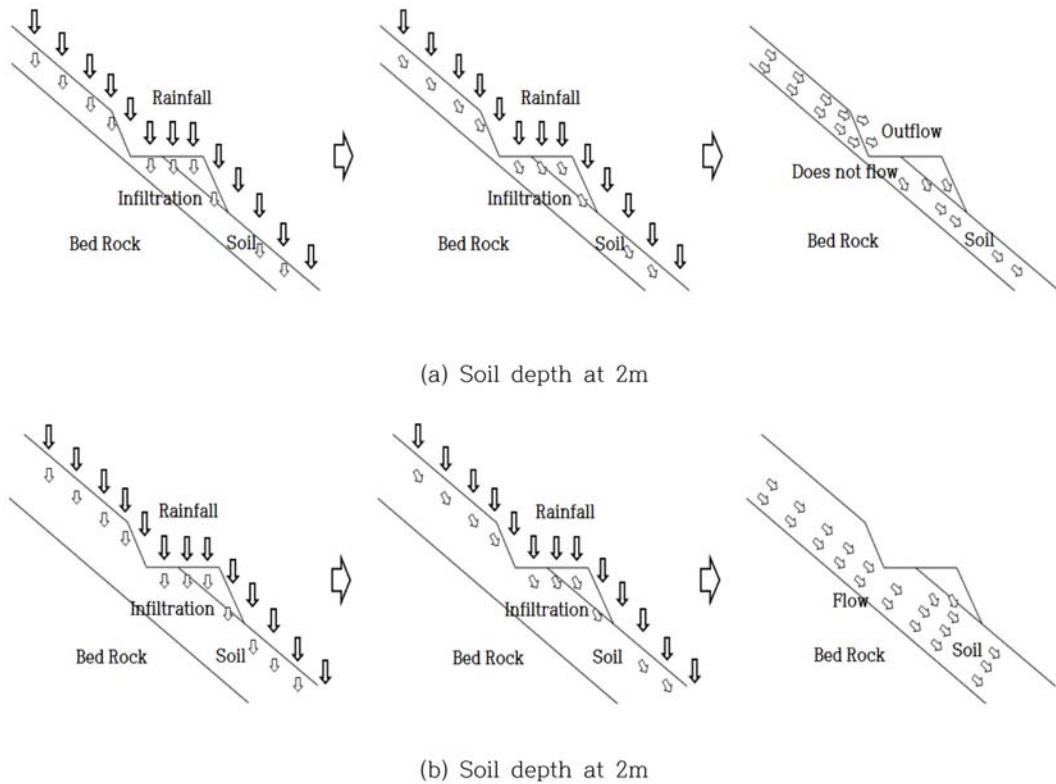


Fig. 9. Infiltration direction on slope gradient at 30°.

흐름에 따라 중력에 의해 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하게 되는데, 이 때 임도가 개설되게 되면 침투수가 흐르는 연결통로가 절토구간에 의해 없어지거나 협소해져 일부 침투수가 절토부로 유출되므로 인해서 침투양상이 변화되는 것으로 판단된다.

또한, 강우에 의한 침투수가 임도개설 여부와 상관없이 토층심도가 깊기 때문에 침투수가 흐를 수 있는 통로가 충분히 확보되기 때문에 임도개설 여부와 상관없이 침투양상이 자연사면에서의 침투양상과 유사하게 나타나는 것으로 사료된다.

결 론

본 연구는 극한강우의 침투양상을 고려해 산지사면 내 임도 등 시설지의 개설로 인해 발생할 수 있는 산지재해의 영향성 평가를 목적으로 자연산지와 산지사면 내 임도 개설 여부에 따라 토층심도를 고려한 안정성 분석을 통해 산지재해에 강한 임도 시설물의 평가방안을 제시하였다.

동일한 산지사면 경사를 갖는 조건에서 극한강우가 발생하였을 때 대상사면의 안전율은 토층심도 및 토층의 포화면적에 따라 안전율의 차이가 발생하는 것으로 확인되었다. 특히, 산지 내 임도 개설에 따라 상대적으로 산지 안정성은 감소하는 것으로 나타났는데 이는 토층심도에 큰 영향을 받

는 것으로 판단된다. 즉, 토층심도가 낮을 경우에는 임도 상부측 사면부에서 발생된 침투수가 임도 경계부에서 유출되어 사면의 안정성을 저하시키는 요인으로 작용한 것으로 볼 수 있다.

따라서, 실제 산지에서의 사면붕괴 내지 산사태는 지질 및 지반구조, 지반의 강도정수 외에, 사면활동에 영향을 줄 수 있는 토층심도, 산지 내 임도시설의 개설 여부가 장기적인 관점에서는 사면 안정성과 밀접한 관계를 갖고 있으므로 산지재해에 적극 대응하기 위해서는 이에 대한 충분한 조사와 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MPSS-자연-2015-79].

References

Chae, B.-G. and Kim, M.-I., 2012, Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration, Environmental Earth Sciences, 66, 1973-1986.
 Fourie, A. B., Rowe, D. and Blight, G. E., 1999, The effect of

- infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump, *Geotechnique*, 49, 1-13.
- Fredlund, D. G., Xing, A., 1994. Equations for the soil water characteristic curve, *Geotech*, 31, 512-532 (in Canada).
- Geo-Slope, User's Guide for SEEP/W v2007, Geo-slope international Ltd. 369-417.
- Green, R. E., Corey, J. C., 1971, Calculation of hydraulic conductivity : a further evaluation of predictive methods, *Soil Science Society of America, Proceedings*, 35, 3-8.
- Jeong, S. S. and Choi, J. Y., 2009, Stability analysis of unsaturated weathered soil slopes considering rainfall duration, *Korean Society of Civil Engineers*, 29(1), 1-9 (in Korean with English abstract)
- Kim, J. H. and Kim, W. Y., 2013, Review of research trends on landslides hazards, *Korean Journal of Engineering Geology*, 23(3), 305-314 (in Korean with English abstract)
- Kim, K. S., Song, Y. S., Chae, B. G., Cho, Y. C. and Lee, C. O., 2007, Geometric characteristics of landslides on natural terrain according to the geological condition, *Korean Journal of Engineering Geology*, 17(1), 75-87 (in Korean with English abstract)
- Kim, M.-I., Chae, B.-G. and Han, B.-W., 2008, Evaluation of infiltration characteristics of rainfall in gneiss weathered soil by a filed monitoring, *Korean Journal of Engineering Geology*, 18(4), 567-575 (in Korean with English abstract)
- Kim, W. Y. and Chae, B. G., 2009, Characteristics of rainfall, geology and failure geometry of the landslide areas on natural terrains, Korea, *Korean Journal of Engineering Geology*, 19(3), 331-344 (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service, 2014, Technical textbook of erosion control, 432p.
- Lee, G. H., Oh, S. R., Lee, D. U. and Jung, K. S., 2012, Analysis on Mt. Umyeon landslide using infinite slope stability model, *Academic publication of Korea water resources association*, 737-741.
- Lee, G. H. and Park, J. P., 2012, Assessment of landslide susceptibility using a coupled infinite slope model and hydrologic model in Jinbu area, Gangwon-Do, *Economic and Environmental Geology*, 45(6), 697-707
- Ministry of Construction and Transportation, 2011, Road drainage design and maintenance instructions, Appendix. (in Korean)
- Oh, S. B., Mun, J. H., Kim, T. K. and Kim, Y. K., 2008, A case study of rainfall-induced slope failures on the effect of unsaturated soil characteristics, 28(3), *Korean Society of Civil Engineers*, 28(3), 167-178 (in Korean with English abstract)
- Trandafir, A. C., Sidle, R. C., Gomi, T. and Kamai, T., 2008, Monitored and simulated variations in matric suction during rainfall in a residual soil slope, *Environmental Earth Sciences*, 55, 951-961.
- Tsai, T.-L., 2010, Influence of soil water characteristic curve on rainfall-induced shallow landslides, *Environmental Earth Sciences*, DOI 10.1007/s12665-101-0868-9.

김만일

산림조합중앙회 산림공학연구소
34417 대전광역시 대덕구 동서대로 1800
Tel: 042-341-1026
Fax: 042-637-8046
E-mail: mikim@nfcf.or.kr

이승우

산림조합중앙회 산림공학연구소
34417 대전광역시 대덕구 동서대로 1800
Tel: 042-341-1020
Fax: 042-637-8046
E-mail: happyguy84@hanmail.net

김병식

강원대학교 방재전문대학원
강원도 삼척시 중앙로 346
Tel: 033-570-6819
Fax: 033-570-6469
E-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr