

지하수위 변화에 따른 옥산 산사태 지역의 3차원 사면안정성 해석

서용석* · 김성권 · 이경미

충북대학교 지구환경과학과

3-D Slope Stability Analysis on Influence of Groundwater Level Changes in Oksan Landslide Area

Yong-Seok Seo*, Sung-Kwon Kim, and Kyoung-Mi Lee

Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

본 연구에서는 3차원 한계평형법을 이용하여 산사태 시점부가 붕괴되기 시작할 때의 전단강도정수를 역해석으로 도출하고, 파괴시의 활동면에 작용하는 응력상태를 분석하였으며, 지하수위의 변화에 따른 사면안정성 해석을 수행하였다. 해석결과에 의하면 토질의 전단강도시험 결과치가 역해석으로 도출된 임계 전단강도보다 낮은 범위에 분포함을 알 수 있었다. 산사태 시점부에 분포하는 응력의 크기는 계곡의 중심부로 갈수록 커지며 활동방향은 상부에서 하부로 향하는 것으로 나타났다. 또한 건기시에는 사면이 안정한 상태에 있으나, 강우로 인해 지하수면이 지표하 0.85 m 심도보다 얕게 상승하면 사면은 급격히 불안정해지는 것으로 나타났다.

주요어 : 산사태, 토석류, 3차원 사면안정성 해석, 지하수위, 응력상태

In the study, we carried out a 3-D analysis to assess the influence of groundwater level changes on the slope stability, conducting a series of back-numerical analysis to delineate the critical line of the shear strength of the failure surface of a landslide, and a laboratory test to determine the geo-mechanical properties of soil samples. The analysis result shows that the shear strength determined by the laboratory test was distributed below the critical line of shear strength estimated by back-analysis. Differences between driving and resisting force were also analyzed in groundwater conditions of dry and saturation. It appeared that the stress gets greater towards the slope center of the landslide, and the debris mass moves downwards. According to the analysis, the factor of safety becomes 1 with the rise of groundwater level up to -0.85 m from the slope surface, while the slope tends to stay stable during dry seasons.

Key words : landslide, debris flow, 3D slope stability analysis, groundwater level, stress state

서 론

산사태는 사면에 분포하는 구성물질의 전단강도가 현저히 저하될 때 발생하며, 지표면 및 활동면의 형태에 따라 다양한 파괴양상을 보인다. 우리나라 산사태는 주로 하절기 장마, 태풍 및 게릴라성 집중호우에 의해 가장 많이 발생하며 인명과 재산에 심각한 피해를 주고 있다. 특히, 산사태와 같은 자연사면의 붕괴는 절개지 및 축대 붕괴 등과 같은 인공사면의 붕괴에 비해 상대적으로 발

생빈도가 높다(박덕근 외, 2006). 이러한 자연사면의 붕괴는 지형 및 지질조건에 의해 큰 영향을 받는다. 지형학적으로는 오목한 구간이 퇴적물들이 집적되기 쉬우며 산사태에 취약하다(Dietrich and Dunne, 1978; Dietrich and Dorn, 1984; Marron, 1985; Dietrich *et al.*, 1986; Reneau *et al.*, 1986, 1989; Reneau and Dietrich, 1987, 1990, 1991; Crozier *et al.*, 1990; Yamada, 1995, 1999). 국내 지질조건에 따른 산사태 발생빈도와 관련된 연구에서는 편마암 지역이 단위면적당 산사태 발생빈도가 가

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

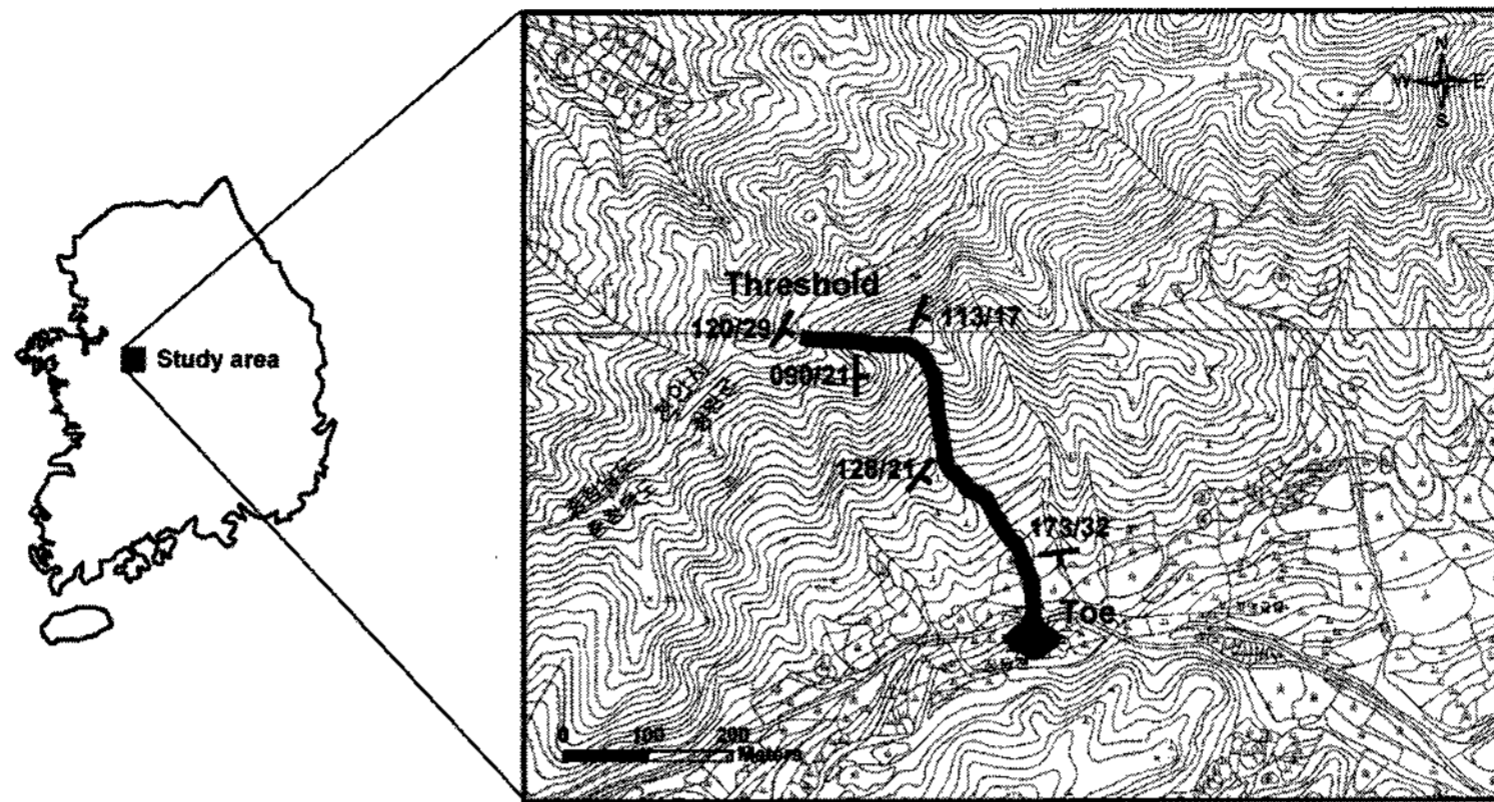


Fig. 1. Location of the study area and runout migration route of debris.

장 높은 것으로 나타났다(김원영 외, 2000).

사면의 안정성을 평가하고 대책공법을 수립하기 위해서 일반적으로 수치해석이 이용되는데, 안정해석에는 실용적인 목적으로 2차원 해석이 주로 수행되고 있다. 하지만 2차원 해석에서는 비대칭 활동면 형상이나 지형 및 활동면의 평면적 기복 등과 같은 해석모델상의 특성이 무시되고 있다. Ohta & Hayashi(1998)의 연구에 의하면, 사면의 말단형상, 절토형태 및 사면의 형상비(폭/깊이의 비) 등이 사면의 안전율을 변화시키는 인자들로 작용하는 것으로 나타났다. 최근 국내에서는 테일러스(talus) 및 구조물과 인접한 자연사면과 같은 복잡한 지형에 대해서 3차원적인 해석이 시도된 바 있다(이경미 외, 2007a; 이경미 외, 2007b).

본 연구에서는 집중호우로 인해 산사태가 발생한 충청북도 옥산면 장동리 지역에 위치한 사면을 대상으로 3차원 한계평형해석을 실시하여 산사태 시점부가 붕괴되기 시작할 때의 전단강도정수를 역해석으로 도출하였으며 이를 실내토질시험 결과와 비교하였다. 또한 시점부에 분포하는 응력상태를 3차원적으로 밝히고, 강우로 인한 지하수위의 변화가 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

연구지역의 지형 및 지질

본 연구지역은 충청북도 청원군 옥산면 장동리 장동저수지 전방에 위치한 자연사면으로서 2005년 9월 추석 연휴기간에 내린 집중강우에 의해 산사태가 발생하였다(Fig. 1). 산사태 유형은 다양한 크기의 입자들이 혼재된 토석류(debris flow)에 해당하며, 산사태 시점부는 해발

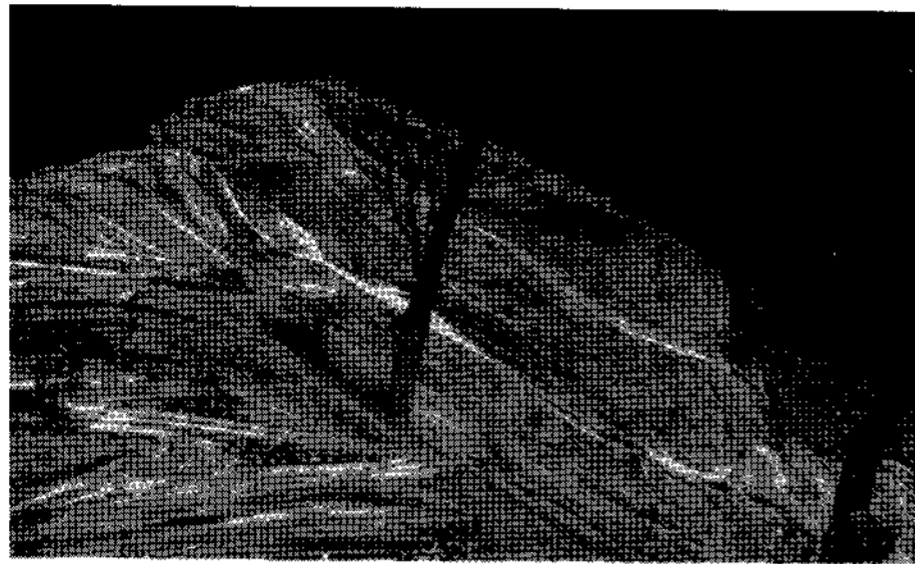
고도 350 m 지점인 산 정상부에 위치한다. 산사태의 특성 및 변화양상을 면밀히 관찰하기 위하여 현장조사를 실시한 결과, 시점부에는 풍화토 및 붕적토가 2 m 내외의 심도로 집적되어 있다. 붕괴된 사면은 현재 N30E/29SE의 방향성을 가지며 준원호(semi-circular)형태의 파괴양상을 보인다. 또한 사면은 단축 및 장축방향으로 각각 20 m, 33 m의 활동폭을 가진다(Fig. 2). 사태물질은 계곡부를 따라 약 505 m 거리를 이동하였으며, 산 하부 도로에서 확산되어 인근 농경지와 비닐하우스, 도로 및 저수지 등 약 2만여 평에 심각한 피해를 주었다.

계곡부는 토층이 대부분 씻겨 내려가 기반암이 노출되어 있는 상태이며, 기반암에는 엽리를 포함하여 3조의 규칙적인 불연속면이 관찰된다. 불연속면의 방향성은 각각 N66E/70NW(엽리), N10W/88NE, N50E/20SE이며, 모든 절리면에서 보통 풍화된 상태를 보인다.

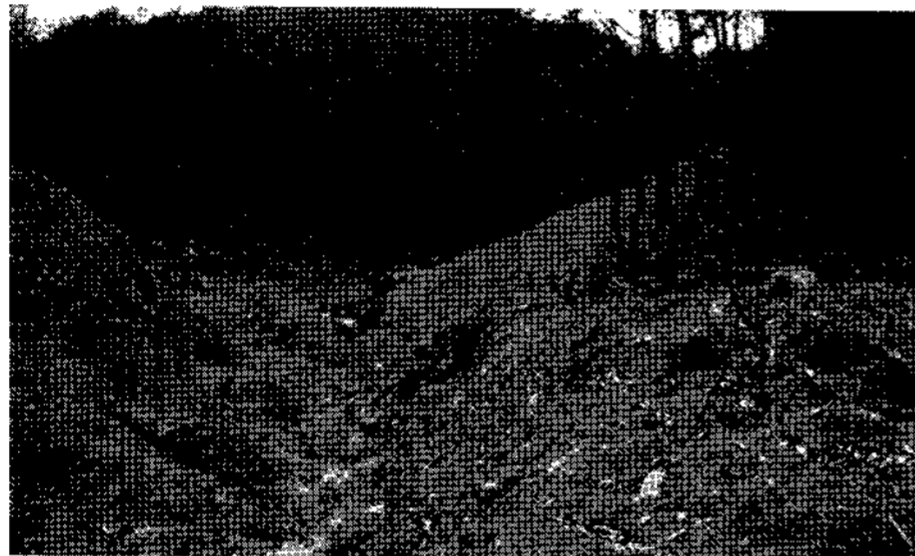
본 연구지역에 대한 실내에서의 지형분석 결과, 산사태가 발생한 구간은 타 구간에 비해 상대적으로 고도가 높고, 급경사지를 이루고 있다. 또한 연구지역은 산정상부에서 하부까지 계곡형태를 이루고 있는데, 이는 강우시 침수되기 쉬운 지형에 해당한다(Fig. 3).

본 연구지역 일대의 지질은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 선캠브리아기 흑운모 편마암이 기반암을 이루고 있으며, 이를 관입한 중생대 화성암류와 제4기 충적층으로 구성되어 있다(이하영 외, 1989). 사태물질이 이동한 계곡부의 노두에서는 흑운모 편마암 및 반상변정질 편마암이 주로 관찰되며, 표층부는 대부분 이들 모암의 풍화산물인 잔류토 및 붕적토로 덮여 있다. 이들 토층은 혼합된 입자크기를 보이며 다소 느슨한 상태를 유지하고 있다.

이러한 지형 및 지질학적인 특성은 사면고도를 기준



(a) Starting point of landslide



(b) Mid point of landslide



(c) End point of landslide

Fig. 2. Photographs of the landslide area showing a failure type.

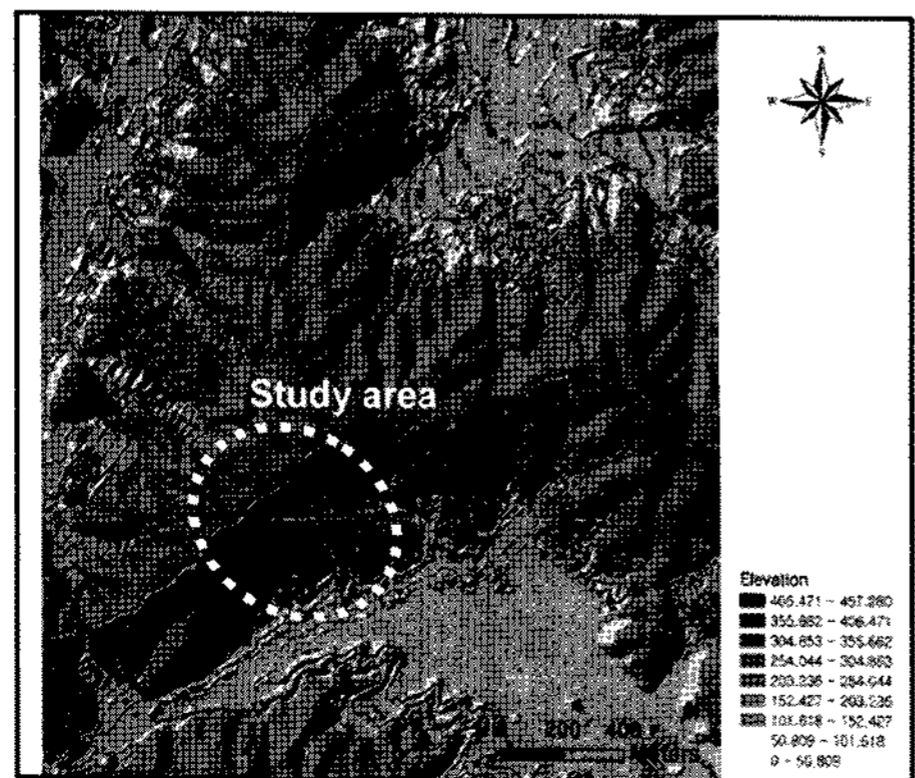


Fig. 3. DEM analysis in the study area.

으로 볼 때, 편마암류 지역에서 산사태가 90%이상의 사면고도에서 가장 빈번하게 발생하고, 사태물질은 계곡을 따라 유동한다는 기존의 연구결과(김경수 외, 2006)와 잘 일치한다.

토질특성

산사태 시점부에 분포하는 흙의 물리적·역학적 특성을 파악하기 위해 실내 토질시험을 실시하였다. 토층 시료는 지표하 50 cm 정도의 위치에서 링샘플러를 이용하여 교란 및 불교란 시료로 구분하여 채취하였으며, 시험은 KS 및 ASTM의 관리규정에 근거하여 수행하였다. 입도분석결과 산사태 시점부는 모래사이즈의 입자가 전체 입도의 90% 이상으로 우세하게 분포하고 있으며, 토질은 통일분류법에 의해 SP로 분류되었다. 토질의 전단강도 특성을 분석하기 위해 급속압밀배수법으로 직접전단시험을 실시한 결과 점착력은 0.1 t/m^2 , 내부마찰각은 30.3° 로 분석되었다(Table 1). 점착력은 다른 토질의 값에 비해 상대적으로 낮게 나타나는데 이는 점토성분의 함량이 매우 낮기 때문인 것으로 판단된다. 토질시험결과를 요약하면 Table 1과 같다.

3차원 사면안정해석

사면은 붕괴시 다양한 기하학적 특성을 가지며 3차원으로 거동한다. 특히, 토층에서 발생하는 사면붕괴는 일반적으로 원호 또는 준원호 형태로, 사면의 가장자리 부에서 중심부로 갈수록 파괴심도가 깊어지는 특성을 보인다. 본 연구에서는 한계평형기법이 적용된 Ohta-Geo Software(2002)를 이용하여 3차원 사면안정해석을 실시하였으며, 이를 통해 산사태 시점부에 분포하는 응력상태를 분석하고 사면의 안전율을 계산하였다. 해석에 사용되는 지형 모델은 국토지리정보원에서 발간한 1:5000 수치지형도를 바탕으로 작성하였으며, 파괴면 모델은 산사태가 발생한 직후 현장측량을 통하여 획득한 실측현황도에 표고속성을 부여하여 3차원 데이터로 변환하여 작성하였다(Fig. 5, Fig. 6). 지하수위 모델은 지형데이터를 기초로 하여 모든 구간에서 동일한 심도로 분포하도록 작성하였으며, 포화시에는 지하수위가 지형의 표고와 일치하도록 구성하였다. 해석영역은 최초 붕괴가 시작된 산사태 시점부 구간으로 한정하였으며, 이 구간에 대해 삼각주 형태로 요소를 세분하여 안정해석을 수행하였다.

Table 1. Physical and engineering properties of soil collected in the study area.

Gs	ω (%)	Atterberg limits(%)			D ₁₀ (mm)	C _u	C _g	e	n(%)	USCS
		LL	PL	PI						
2.71	8.49	37.2	14.6	22.6	0.19	4.67	0.89	0.79	44.3	SP

Grain size(%)			Unit weight (g/cm ³)			Shear strength	
Gravel	Sand	Silt/Clay	Dry	Wet	Sat.	c(t/m ²)	φ(°)
7.73	91.68	0.59	1.50	1.63	1.95	0.1	30.3

Gs, specific gravity; w, natural moisture content; LL, liquid limit; PL, plastic limit; PI, plasticity index; D₁₀, effective size; C_u, uniformity coefficient; C_g, coefficient of gradation; e, void ratio; n, porosity; USCS, unified soil classification system; c, cohesion; φ, friction angle.

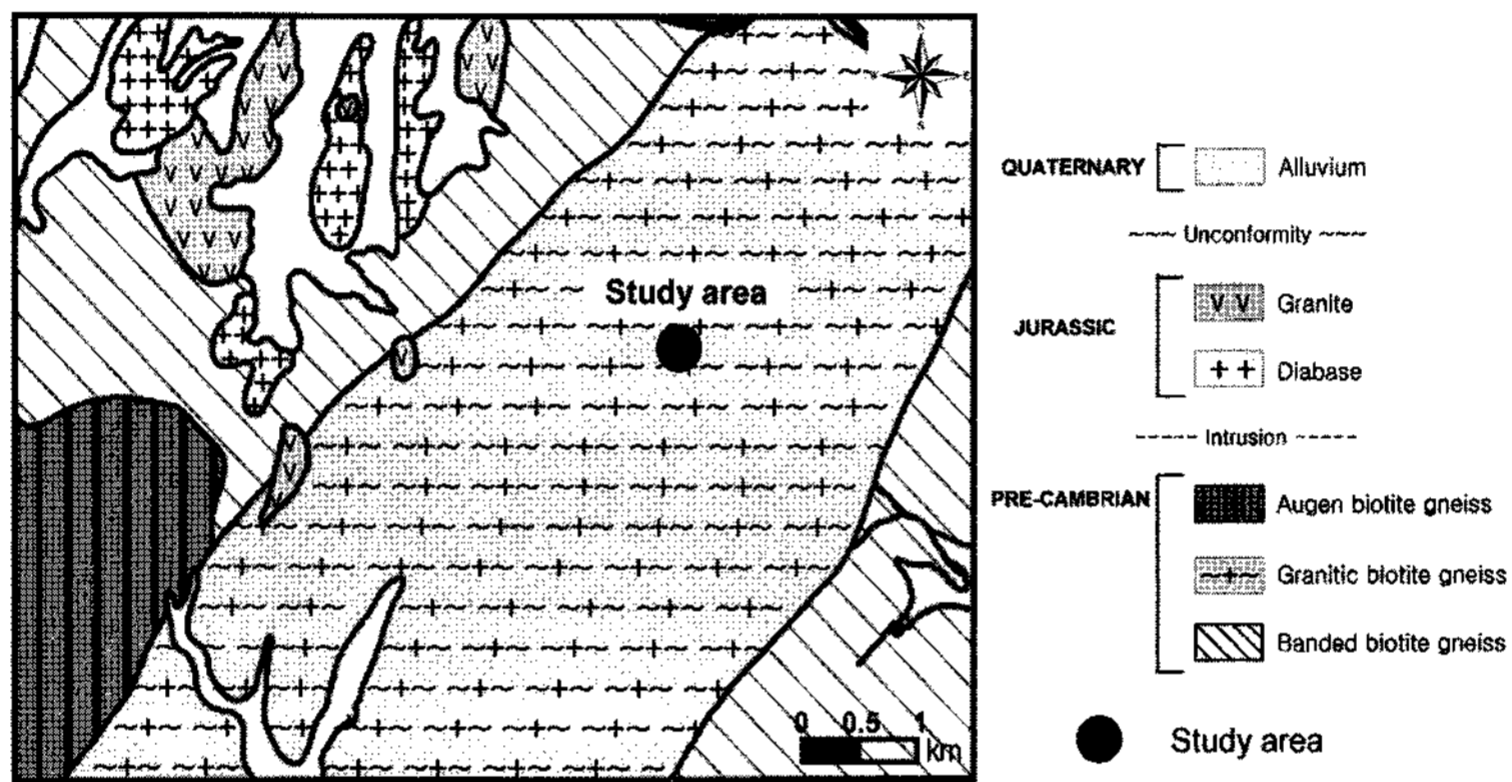


Fig. 4. Geologic map of the study area.

역해석을 통한 강도정수 도출

한계평형해석에서 사면이 붕괴되는 시점은 임의의 파괴면에 작용하는 활동력과 저항력이 같아지는 시점으로 안전율이 1인 극한상태이다. 따라서 본 연구에서는 집중호우로 인해 사면이 완전 포화되었을 경우를 가정하여 안전율을 1로 고정한 후 점착력과 내부마찰각을 변화시켜 가며 전단강도정수의 범위를 산정해 보았다(Fig. 7). 그래프에서 도시된 점들을 연결한 선은 안정과 불안정 영역을 구분하는 임계선으로 토질의 전단강도가 임계선 아래 영역에 포함되면 사면은 불안정한 것으로, 임계선 위 영역에 포함되면 사면은 안정한 것으로 판단할 수 있다. 연구지역에서 채취된 토질의 전단강도정수를 그래프에 표시하면 임계선 아래영역에 포함되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구지역의 사면은 집중호우로 인해 완전 포화될 경우 불안정한 상태로 존재함을 알 수 있다.

응력상태 및 안정성 해석

사면의 활동면 위에 분포하는 토체 및 암괴의 규모는 상재하중으로 작용하여 사면의 거동에 영향을 미친다.

본 연구지역의 산사태 시점부에 분포하는 3차원 응력상태에 대한 해석은 포화시와 건기시로 구분하여 수행되었으며, 해석에 적용된 지반정수는 Table 1에 제시되어 있다. 해석결과 산사태가 발생한 시점부는 1219m³의 체적을 가지며 건기시에는 활동력과 저항력이 각각 588.1t, 959.7t으로 계산되었다. 따라서 건기시에는 저항력이 활동력보다 상대적으로 우세하게 작용하며, 안전율은 1.632로 안정한 상태에 있는 것으로 파악되었다. 그러나 강우로 인해 사면이 포화될 경우에는 활동력과 저항력이 각각 764.9t, 562.4t으로써 활동력이 저항력에 비해 크게 작용하는 것으로 계산되었고, 안전율은 0.736으로 급격히 불안정한 상태에 도달하는 것으로 나타났다(Table 2). 이러한 해석결과는 강우에 의한 지하수위의 변화가 사면의 안정성에 크게 영향을 미치는 인자로 작용함을 의미한다. 지하수위의 변화에 따른 안정해석을 수행하여 사면이 붕괴될 당시 지하수면의 위치를 분석한 결과, 지하수면이 지표하 0.85 m 위치까지 상승하게 되면 사면은 극한상태에 이르게 되어 붕괴되기 시작하는 것으로 나타났다.

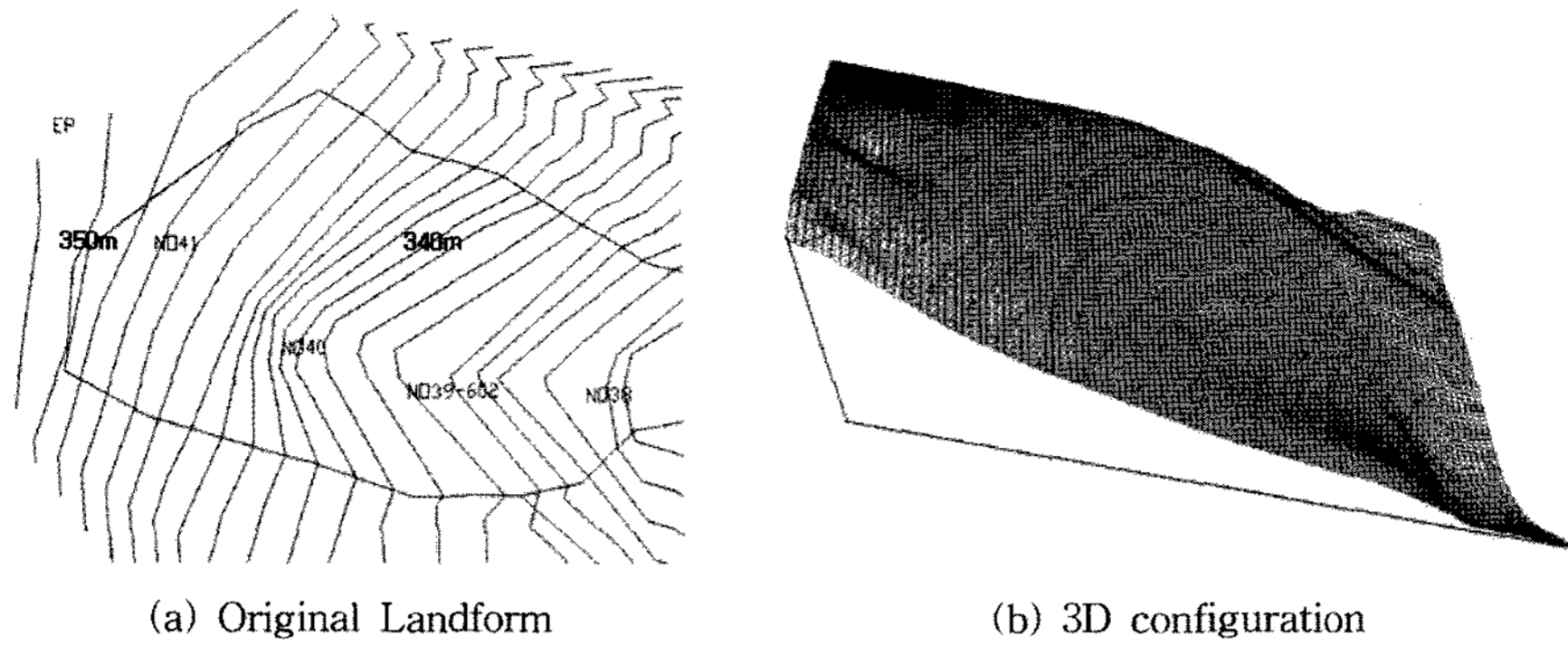


Fig. 5. Configuration of the landform before occurring landslide in the study area.

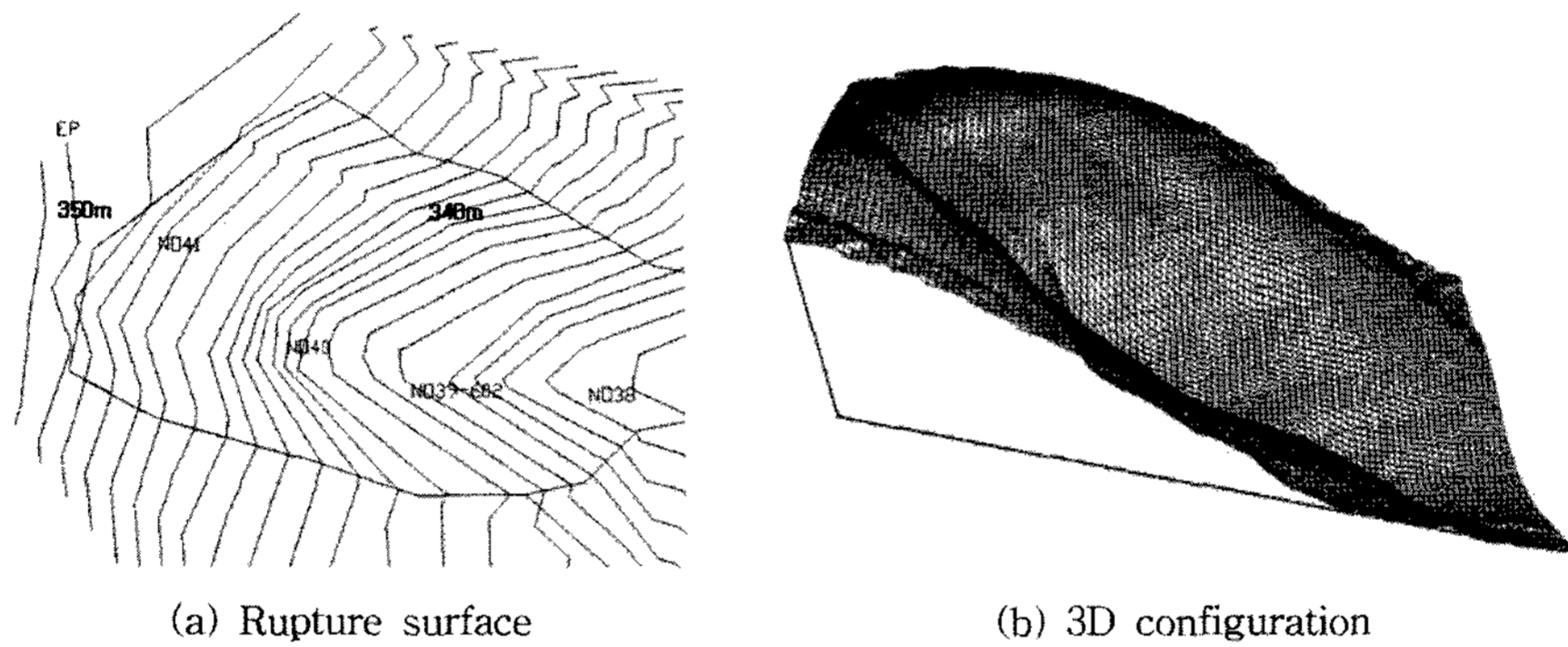


Fig. 6. Configuration of the failure surface in the study landslide area.

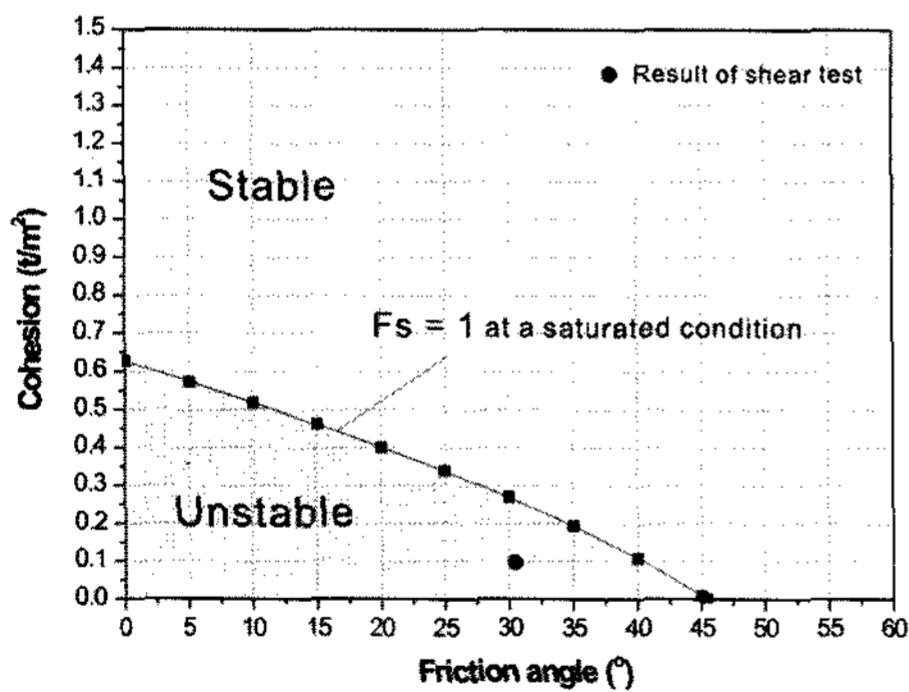


Fig. 7. Estimated critical line of shear strength based upon the results of back analysis for the study landslide area.

3차원 사면안정성 해석결과, 산사태 시점부의 각 요소에 작용하는 활동력과 저항력을 각각 벡터(크기와 방향)와 원으로 나타내면 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. 각 요소에 표시된 붉은색 벡터는 사면의 주 활동방향과 유사한 방향성을 가지는 활동력을 의미하며, 푸른색 벡터는 사면의 활동을 거스르는 방향으로 작용하는 저항력을 의미

한다. 또한 각 요소에 표시된 원들은 활동력과 저항력의 상대적 크기 차로 표현되며 붉은색 원은 활동력이, 푸른색 원은 저항력이 우세하게 작용하는 요소를 나타낸다. 포화시 산사태 시점부에 분포하는 응력의 전체적인 크기는 계곡의 중심부로 갈수록 커지며, 활동방향은 상부에서 하부로 향한다.

결론

본 연구에서는 집중호우로 인해 산사태가 발생한 충청북도 옥산면 장동리에 위치한 자연사면을 대상으로 현장조사 및 실내 토질시험을 실시하였다. 3차원 한계평형법을 이용하여 산사태 시점부가 붕괴되기 시작할 때의 전단강도정수를 역해석으로 도출하여 실내실험결과와 비교하였고, 활동면에 분포하는 응력상태를 분석하였다. 또한 지하수위의 변화에 따른 사면안정성 해석을 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연구지역의 산사태 유형은 토석류(debris flow)에 해당하며, 해발고도 350 m인 산 정상부 사면에서 준원

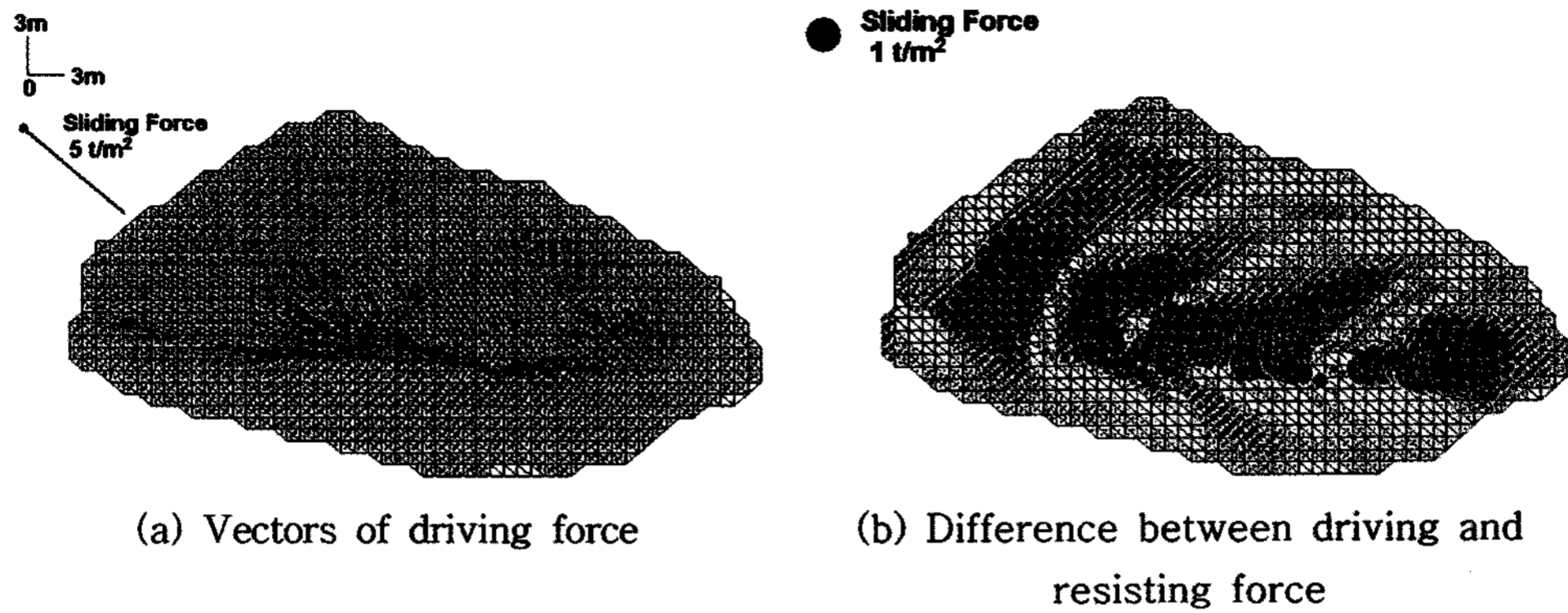


Fig. 8. Stress distribution under dry condition in the study slope. The blue and the red mean resisting and driving force, respectively.

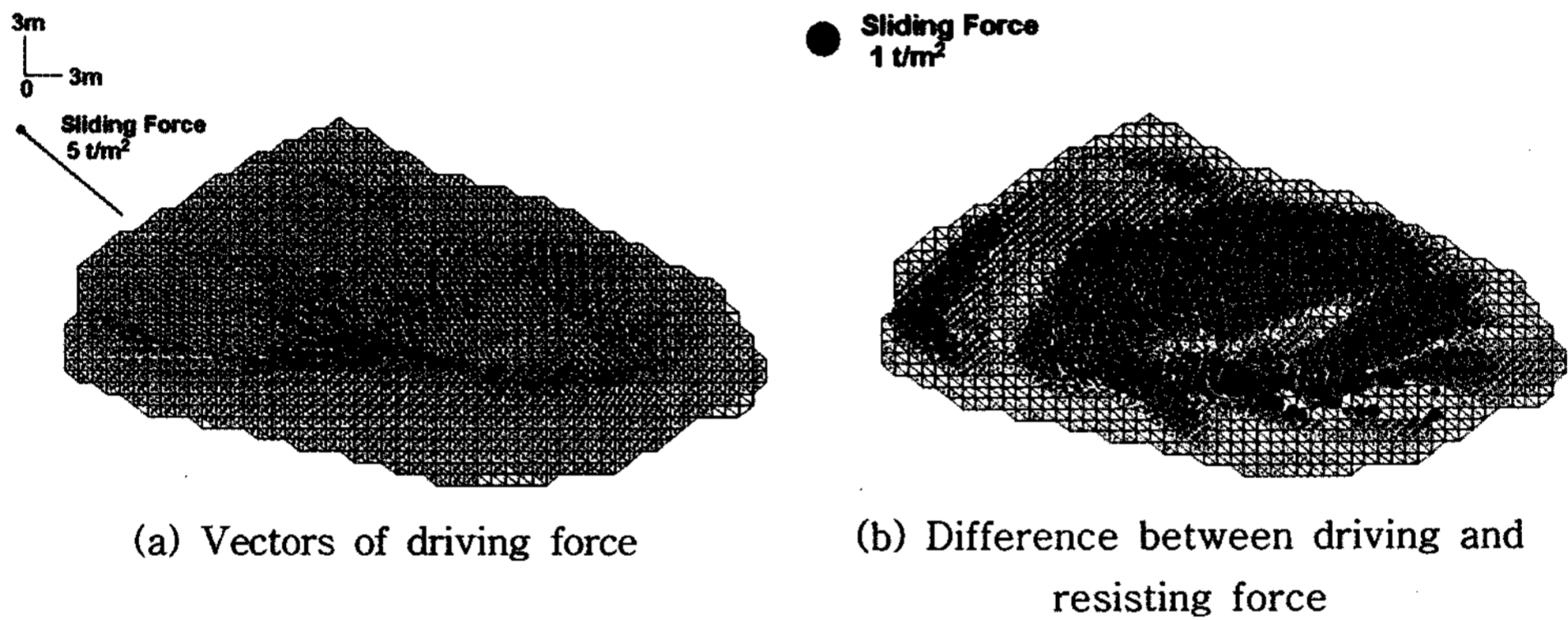


Fig. 9. Stress distribution under saturated condition in the study slope. The blue and the red mean resisting and driving force, respectively.

Table 2. Forces and safety factors calculated by 3D limit equilibrium analysis.

Condition of groundwater	Driving force(ton)	Resisting force(ton)	Safety factor
Dry	588.1	959.7	1.632
0.85m below the surface	743.7	743.7	1
Saturated	764.9	562.4	0.735

호(semi-circular)형태로 최초 붕괴가 시작되었다. 사태물질은 계곡부를 따라 505 m 거리를 이동하여 산하부 도로에서 확산되었다. 수치지형도를 이용한 지형분석결과, 산사태가 발생한 구간은 타 구간에 비해 상대적으로 고도가 높고, 급경사지를 이루고 있으며 강우시 집수되기 쉬운 오목한 형태의 지형특성을 보였다.

2) 산사태 시점부에 분포하는 토층은 모래가 90% 이상의 함량을 차지하고 있으며 통일분류법에 의해 SP로 분류된다. 직접전단시험 결과, 토질의 점착력과 내부마찰각은 각각 0.1 t/m², 30.3°로 분석되었다. 점착력이 다른

토질들의 값보다 작은 이유는 점토성분의 함량이 낮기 때문인 것으로 판단된다.

3) 파괴가 시작되는 임계 전단강도의 도출을 위해 안전율을 1로 고정하여 역해석을 수행하였고, 임계선을 기준으로 안정영역과 불안정영역으로 구분하였다. 토질의 전단시험결과는 불안정 영역에 포함되므로 연구지역 사면은 포화시 불안정한 상태로 존재함을 알 수 있었다.

4) 연구지역 사면은 건기시에 저항력이 활동력보다 우세하게 작용하며, 안전율은 1.632로 안정하게 나타났다. 포화시에는 활동력이 저항력보다 커지고, 안전율이 0.736

으로 떨어지게 되어 사면은 불안정한 상태에 도달하는 것으로 나타났다. 또한, 지하수위의 변화에 따른 안정해석을 수행한 결과로부터 지하수위가 지표아래 0.85 m 위치까지 상승하게 되면 사면이 붕괴되기 시작하는 것으로 분석되었다.

5) 산사태 시점부에 작용하는 응력해석 결과에서는 응력이 계곡의 중심부로 갈수록 증가하며 활동방향은 상부에서 하부로 향하는 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 이춘오, 송영석, 2006, 자연사면에서 발생된 토석류산사태의 기하양상, KSEG Conference, pp.51-59.
- 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09, p.642.
- 박덕근, 오정림, 김태훈, 박정훈, 2006, 우리나라 사면재해 피해현황과 대책, 한국지반공학회지, 22(6), pp.6-18.
- 이하영, 윤혜수, 이준동, 1989, 병천도폭 지질보고서 (1:50,000), 한국동력자원연구소.
- 이경미, 김성권, 서용석, 이선복, 김동현, 김도식, 2007, 2차원 유한요소법과 3차원 한계평형법을 이용한 테일러스 사면안정성 해석, 대한지질공학회지, 17(3), pp.381-391.
- 이경미, 김현, 이재혁, 서용석, 김지수, 2007, 지구물리탐사를 이용한 산사태지역의 지하수위에 따른 안정성 해석, 대한지질공학회지, 17(4), pp.545-554.
- Crozier, M.J., Vaughan, E.E., Tippett, J.M., 1990, Relative instability of colluvium-filled bedrock depressions, Earth Surface Processes and Landforms, 15, pp.329-339.
- Dietrich, W.E., Dorn, R., 1984, Significance of thick deposits of colluvium on hillslopes: a case study involving the use of pollen analysis in the coastal mountains of Northern California, The Journal of Geology, 92, pp.147-158.
- Dietrich, W.E., Dunne, T., 1978, Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain, Geomorphology, Suppl., 29, pp.191-206.
- Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Reneau, S.L., 1986, Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes, In: Abrahams, A.D. (Ed.), Hillslope Processes, Allen and Unwin, London, pp.361-388.
- Ohta, H. and Hayashi, Y., 1998, A study of three-dimensional analysis of slope stability (part 1), 日本地すべり學會研究發表會, pp.441-444.
- Reneau, S.L., Dietrich, W.E., 1987, The importance of hollows in debris flow studies: examples from Marin County, California. In: Costa, J. E., Wieczorek, G. F. (Ed.), Debris flows Avalanches; Process, Recognition, and Mitigation, Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, pp.165-180.
- Reneau, S.L., Dietrich, W.E., 1990, Depositional history of hollows on steep hillslopes, coastal Oregon and Washington, National Geographic Research, 16, pp.220-230.
- Yamada, S., 1995, Relations between topographic conditions and debris movement deduced from distribution of regolith in a zero order basin near Sapporo, Hokkaido, Japan, Geomorphology, 16, pp.349-360.
- Yamada, S., 1999, The role of soil creep and slope failure in the landscape evolution of a head water basin: field measurements in a zero order basin of northern Japan, Geomorphology, 28, pp.329-344.

2008년 5월 15일 원고접수, 2008년 6월 16일 게재승인

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

김성권

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: geologist302@hotmail.com

이경미

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: kmlee924@hanmail.net