

프랙탈 차원과 표면적 지수를 이용한 지형인자와 사면안정성 비교 연구

Study on the comparison topographical factor with slope stability using fractal dimension and surface area index

노수각*·장병욱·차경섭 (서울대)

Noh, Soo Kack-Chang, Pyoung Wuck-Cha, Kyung Seob

Abstract

The research was performed to predict the potential landslide with roughness index. It was known that fractal dimension and surface area index can be represented the topography, specially when the natural slopes were rough or rugged.

A test site was selected and fractal dimension and surface area index were calculated from the irregular triangle network. Fractal dimension were ranged between 2.016~2.046 and surface area index 1.56E+07~2.59E+07. Surface area index increased as fractal dimension increased. Slope stability was calculated by infinite slope stability analysis model and was compared to slope stability by fractal and surface area index. In the result, unsafe zones where slope stability is under 1.1 were 5.11~6.25% for the test site. It can be said that fractal dimension and surface area index are a good index to evaluate the slope stability because when fractal dimension and surface area index are greater, then stability of the site is more unsafe.

1. 서론

우리나라는 국토의 70%가 산지라는 지형적 조건과 강우가 장마와 태풍으로 여름철에 집중되어 있다는 기후적 특징으로 인해 산사태 발생빈도가 높다. 산사태는 1차적으로 자연경관과 산지의 훼손과 함께 2차적인 인명, 재산피해 등을 유발하기 때문에 그 예측과 예방이 중요하다.

산사태는 강우가 직접적인 영향을 주지만 지형, 지질, 토질, 식생 등 간접적인 요인에 따라 그 특성과 발생 가능성이 달라진다. 특히 지형은 자연사면 형태를 결정하고 지표수 및 지중수의 침투, 분산, 가속, 감속 등에 영향을 주어 유수의 침투 능력과 산사태 발생에 영향을 준다. 이중 지형의 기복은 경사도, 자연사면형태 등을 내포하며 수리, 생태, 토양 등의 환경에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 하지만 아직 지형의 기복을 수치로 표현하는 정확한 기법들은 미비한 실정이다.

본 연구는 프랙탈 차원과 표면적 지수를 이용하여 지형의 기복을 수치화하고 이에 대한 적용성 평가와 함께 대상지에 대한 무한사면안전율과의 비교를 통해 산사태 위험지 판정에 대한 실효성을 검증하는데 그 목적이 있다.

2. 기본이론

2.1 표면적 지수(Surface area index)

지형의 수직적 구조를 복합적으로 표현하는 방법으로 표면 기복도와 표면적 지수가 제안되었다(Forman 1995, 이도원 2001). Beasom 등(1983)은 등고선의 복잡성과 지형의 기복을 연관시켜 단위 면적에 들어가는 전체 등고선의 길이로 기복도를 표현하였다.

기복도가 가지는 한계성으로 인하여 그 대안으로 표면적지수가 제안되었다. 표면적 지수는 단위 면적에 대한 공기노출면적으로 정의하였다(Forman 1995, 이도원 2001). 표면적 지수 산출식은 식

(1)과 같다.

$$\text{표면적 지수} = \frac{\text{공기노출면적}}{\text{수직투영 그림자 면적(단위면적)}} \quad \text{식 (1)}$$

위 식에서 공기노출면적은 그 불확실성 때문에 현재 산출의 방법에 대한 많은 논의가 이루어지고 있다.

2.2 프랙탈 차원

프랙탈이라는 용어는 Mandelbrot(1982)에 의해 처음 소개되었다. 프랙탈 이론은 아주 불규칙하게 보이는 해안선, 눈의 결정, 동물체내 혈관 분포, 나뭇가지 형태, 지형 등과 같은 자연현상 내에도 어떤 법칙이나 규칙성이 있다는 것이다.

프랙탈 차원을 측정하는 방법은 크게 기하학적 방법(geometric method)와 기능적 방법(functional method)으로 나뉜다. 기하학적 방법은 분할자법, 박스집계법, 삼각형법 등이 있으며 등고선, 경계선, 곡선 및 다면선의 길이를 직접 측정하거나 면적을 측정하여 프랙탈 차원을 산정한다. 기능적 방법은 적분변환을 이용한 스펙트럼 방법, 통계적 방법인 배리오그램(variogram) 및 크기 분포법 등이 있다. 그 중 거친 표면을 표현하는 방법에는 삼각형법, 삼각기둥 표면적법, 불규칙삼각형망(TIN) 총 삼각형 면적을 이용한 방법이 있다.

박미정과 이정재(2005)는 DEM자료를 통해 프랙탈 지수를 산정하기 위하여 불규칙 삼각형망을 이용하였다. 지형의 표면적은 각 삼각형 요소 표면적의 합이므로 측정자의 크기에 의한 삼각형 요소의 평균면적과 삼각형 요소의 개수를 곱한 식으로 표현할 수 있다(식 (2)). 측정자의 크기(Step-size)에 따른 삼각형 요소의 개수의 관계를 구하기 위해 Fig. 1과 같이 도시해본 결과 식 (3)와 같은 관계식을 설정할 수 있다.

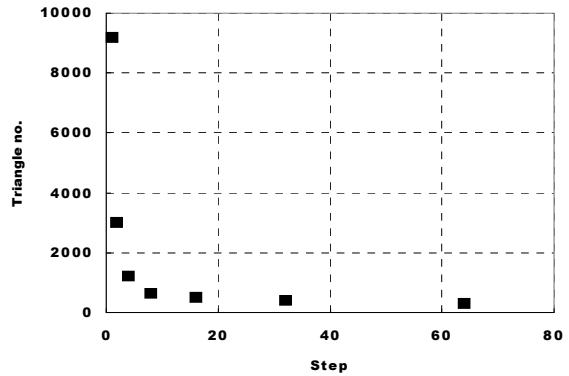


Fig. 1 Relation between step-size and the number of triangle

$$T_a = A \times S^2 \times T_n \quad \text{식 (2)}$$

$$T_n = B \times S^{-D} \quad \text{식 (3)}$$

따라서 식 (2)에 식 (3)을 대입하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$T_a = C \times S^2 \times S^{-D} \quad \text{식 (4)}$$

이를 다시 선형 변환하면 다음 식과 같이 삼각기둥 표면적법과 매우 유사한 식을 얻을 수 있다.

$$\log T_a = \log C + (2 - D) \times \log(S) \quad \text{식 (5)}$$

$$H = 2 - D \quad \text{식 (6)}$$

$$D = 2 - H \quad \text{식 (7)}$$

따라서 식 (7)로 프랙탈 차원을 구할 수 있게 된다. 여기서 T_a 는 표면적, T_n 는 삼각형의 개수, S 는 측정자의 크기, H 는 스케일 지수, D 는 프랙탈 차원을 나타내며, A , B , C 는 비례상수이다.

2.3 무한사면안정해석모형

무한사면해석법은 활동면의 형태를 사면 표면에 평행한 직선으로 가정한 계산법으로 활동면의 길이가 활동면의 깊이에 비하여 충분히 큰 사면의 안정계산에 사용한다. 흙의 성질과 지하수위 조건은 전체 사면에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정한다. 그림 2에서 요소 ABCD를 생각하여 사면의 경사각을 β , 흙의 점착력을 c' , 내부마찰각 ϕ' , 흙의 단위중량 γ 라 하면 요소의 중량 $W = \gamma z b$, 공극수압 $u = \gamma_w h_w$, 공극수의 단위중량은 $\gamma_u = \frac{u}{\gamma_z}$ 이다.

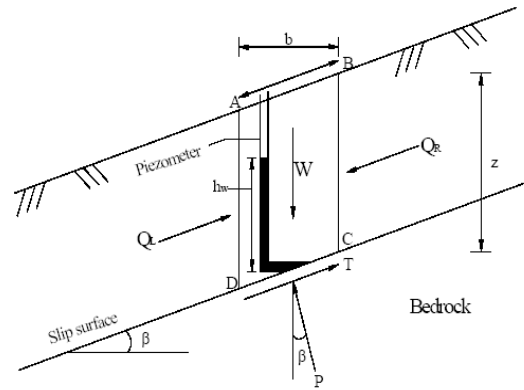


Fig. 2 Schema of infinite slope stability analysis

요소에 작용하는 연직응력을 σ , 전단응력을 τ 라 하면 사면이 무한이므로 $Q_L = Q_R$ 이다. 이로부터, 무한사면의 안전율은 식 (8)과 같다.

$$F_s = \frac{s}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u)\tan\phi'}{\gamma z \sin\beta \cos\beta} \quad \text{식 (8)}$$

여기서, 전토층의 깊이에 대한 지하수위의 깊이의 비인 습윤지수(Wetness index, WI)를 고려하면 식 (9)와 같다.

$$F_s = \frac{s}{\tau} = \frac{c' + [(1 - WI)\gamma_t + m\gamma_{sub}] \cdot z \cdot \cos^2\beta \phi'}{[(1 - WI)\gamma_t + m\gamma_{sat}] z \cdot \sin\beta \cos\beta} \quad \text{식 (9)}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 표면적 지수와 프랙탈 차원 산출

본 연구를 위해 1:5000 축척의 NGIS 수치 지형도 도엽 5개(36707005, 36707021, 36707034, 36701035, 36701044)를 선택하였다. 표면적 지수를 산출하기 위해 불규칙 삼각망을 형성하고 총 삼각형 면적을 계산하였고 프랙탈 차원을 산출하기 위해 각기 다른 해상도로 불규칙 삼각형망을 생성하였다. 불규칙 삼각망을 형성하고 출력하는 데에는 JAVA를 이용하였다.

같은 축척의 NGIS 지형도는 총 면적이 같다고 가정하고 실제 지형을 가장 잘 표현하는 최고 해상도의 불규칙 삼각형망 총 표면적을 표면적 지수로 사용했다. 프랙탈 지수는 해상도별 표면적 변화를 통해 산출한다. Table 1은 각 도엽의 해상도에 따른 표면적 변화이다.

Table 1. Total surface area change for resolution

Cell size (m)		25	50	100	200	400
Surface area (m^2)	A(36707021)	1.56E+07	1.47E+07	1.41E+07	1.38E+07	1.34E+07
	B(36707005)	1.74E+07	1.63E+07	1.54E+07	1.48E+07	1.42E+07
	C(36707034)	2.33E+07	2.23E+07	2.08E+07	1.98E+07	1.83E+07
	D(36707035)	2.34E+07	2.09E+07	2.05E+07	1.90E+07	1.74E+07
	E(36707044)	2.59E+07	2.37E+07	2.04E+07	1.91E+07	1.70E+07

해상도와 표면적 값을 log-log 단위로 환산, log 표면적 값을 정규화하여 Fig. 3에 도시하였다.

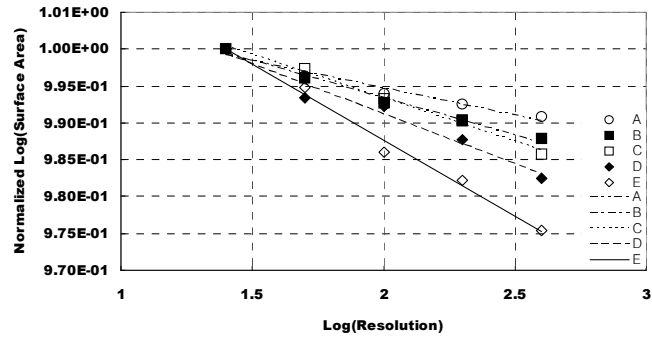


Fig. 3 Normalized relation between surface area and resolution

25m해상도로 불규칙 삼각형망을 형성하고 총 표면적을 계산한 결과, 표면적 지수는 $1.56E+07 \sim 2.59E+07$ 이었고, 식 (7)을 이용하여 위 그래프의 기울기를 통해 프랙탈 차원을 계산하여 산출한 프랙탈 차원은 2.016~2.046 이었다. 각 도엽별 결과는 Table 2에 정리하였다. 본 결과를 살펴보면 그래프의 기울기는 초기값(최고 해상도)그 클수록 커져 프랙탈 차원이 크게 나온다는 것을 알 수 있다. 즉, 표면적 지수와 프랙탈 차원은 서로 비례관계인 것으로 나타났다.

Table 2. Fractal dimension and surface area index of each map

Map	Fractal dimension	Surface area index
A	2.016	$1.56E+07$
B	2.022	$1.74E+07$
C	2.026	$2.33E+07$
D	2.030	$2.34E+07$
E	2.046	$2.59E+07$

3.2 무한사면 사면안전을 산출

프랙탈 지수 및 표면적 지수를 구한 지역에 대하여 사면안전을 계산하였다. 사면안전 해석에는 1차원 무한사면 사면안정해석법을 선택하였다. 사면안전을 계산을 위해 지리정보시스템 소프트웨어 ArcMap을 이용하였고 NGIS 수치지형도(36707005, 36707021, 36707034, 36701035, 36701044)를 입력 자료로 이용하였다. 불규칙삼각형망 형성을 통해 사면 경사를 추출하고 식 (9)로 안전율을 계산하였다. 자연사면 최소안전율의 기준을 절토사면 기준과 동일하게 적용하여 최소안전율은 1.1 이상이 되어야 하는 것으로 판정하였다. 안전율 계산을 위한 기본 조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Condition for analysis of slope stability

Condition	Value	Remark
Resolution(m)	25	
Soil Depth (m)	1.5	
Wetness Index(D)	1.0D	D:Depth(m), Saturated
Cohesion(kPa)	10	
$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20	
Friction Angle($^{\circ}$)	30	

선정 지역의 안전율 해석 결과 안전율이 비교적 높게 나타났다. 산사태 위험지로 판정되는 안전

율 1.1미만인 경우가 5.11~6.25%이었다. Fig 4는 각 지역에 대한 안전을 분포이다.

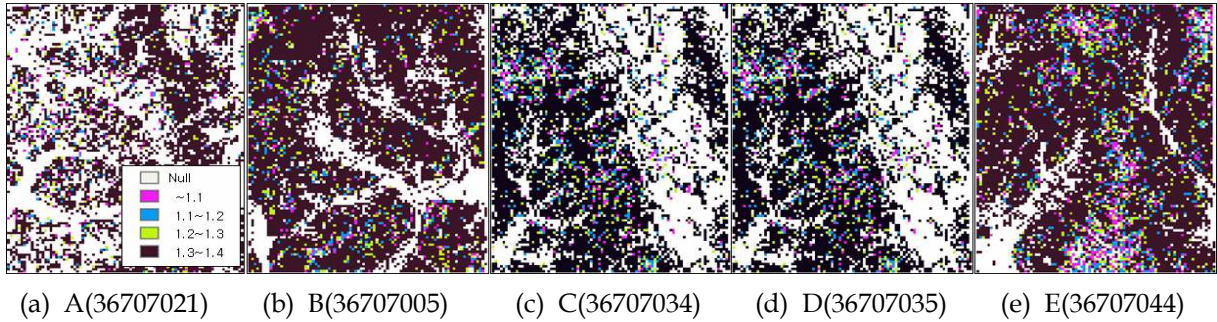


Fig. 4 Slope stability of each map

3.3 표면적 지수 및 프랙탈 차원과 사면안전을 비교

표면적 지수 및 프랙탈 차원과 사면안전율과의 관계를 알아보기 위하여 각각의 지수에 따른 사면안전율 1.1미만의 백분율을 비교하였고 안전율과 평균 경사, 평균 고도와의 관계도 함께 그림 5에 도시하였다.

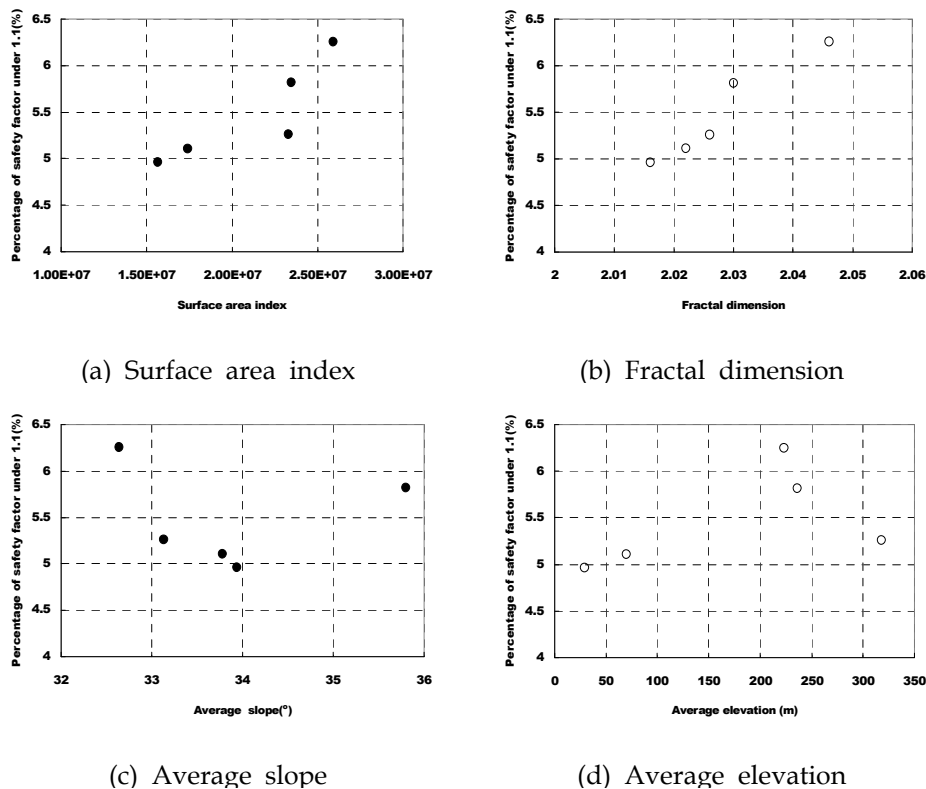


Fig 5. Relation between slope stability and topographical factors

Fig 5 (a)에서 표면적 지수가 증가함에 따라 사면안전율 1.1 미만의 백분율도 증가한다. 또한 프랙탈 지수도 같은 추세를 보인다. 이는 같은 조건 하에서 지형의 기복이 복잡할수록 사면안전율이 낮아짐을 알 수 있다. 반면 평균고도와 평균 경사도와의 비교에서는 큰 추세를 발견할 수 없었다. 이는 평균 고도 및 평균 경사도보다 프랙탈 차원과 표면적 지수가 지형인자를 더 잘 표현한다고

할 수 있다. 본 연구에서는 5개의 지형도에 대하여 비교를 했기 때문에 단순한 프랙탈 차원 및 표면적 지수의 증가에 따라 불안정한 지역의 비율이 증가한다는 것만을 알 수 있었다. 추후 더 많은 경우에 대한 해석을 통해 한 지역에 대한 프랙탈 지수 및 표면적 지수의 정확한 수치에 따른 사면안정성을 알아 낼 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 사면안정성 평가에 있어 지형인자로서 지형의 기복을 반영하기 위하여 프랙탈 지수 및 표면적 지수를 산출하였다. 이론적으로 지형의 기복이 큰 지형은 프랙탈 지수와 표면적 지수가 크게 나온다는 것을 이용, 대상지에 대하여 무한사면안정해석을 하여 프랙탈 지수 및 표면적 지수와의 비교를 통해 그 적용성을 평가하였다.

- 가. 프랙탈 차원을 구하기 위하여 삼각기둥 표면적법을 수정한 불규칙 삼각망의 삼각형을 이용한 방법을 사용하였다. 표면적 지수는 같은 축적의 수치 지형도는 총 면적이 같다는 가정 하에 가장 해상도가 높은 불규칙 삼각망의 총 삼각형 면적을 이용하였다.
- 나. 프랙탈 차원과 표면적 지수의 산출 결과 표면적 지수는 1.56E+07~2.59E+07, 프랙탈 차원은 2.016~2.046의 분포를 보였다. 두 수치의 비교 결과, 프랙탈 지수와 표면적 지수는 서로 비례 관계에 있음을 알 수 있었다.
- 다. 대상 지역에 대한 사면안정성 해석에는 ArcMap을 이용하였고 해석조건들을 가정하여 무한 사면 사면안정해석법을 실행한 결과, 위험지역으로 분류되는 안전율 1.1미만의 백분율은 5.11~6.25%로 비교적 안정한 것으로 판단되었다.
- 라. 안전율 해석 결과와 프랙탈 차원 및 표면적 지수를 비교해본 결과 각 지수가 증가함에 따라 불안정한 지역도 증가한다는 것을 알 수 있었지만 적용지역이 적어 정확한 추세를 파악하기 힘들었다. 추후 더 많은 대상 지역을 선정하여 분석하면 보완할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 토질 조건들을 가정하였으나 추후 실제 토질 조건들을 적용하여 보다 정확한 사면안정해석 결과를 도입할 수 있을 것으로 예상되며 더 많은 대상지역의 해석을 통해 프랙탈 차원과 표면적 지수의 정확한 수치에 대한 사면안정성 평가를 할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

- 박미정, 이정재, 2005, 프랙탈 기법을 이용한 3차원 지형의 다중 추상화, 한국농촌계획학회, 제11권, 제1호, pp. 9~15.
- 이도원, 2001, 경관생태학: 환경계획과 설계, 관리를 위한 공간생리, 서울대학교출판부, 서울.
- 조수민, 2005, 자연지형 정지가 사면안정성 및 식생발달에 미치는 영향에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문
- 차경섭, 2004, 다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측, 서울대학교 박사학위논문.
- Clarke, Keith C., 1986, Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method, Computers & Geoscience, Vol. 12, No. 5, pp 713~722.
- Cox, B. Lea and Wang, Y. S. Y., 1993, Fractal surfaces: Measurement and applications in the earth sciences, Fractals, Vol. 1, No. 1, pp. 87~115.
- Forman, R. T. T. and M. Godron, 1986, Landscape Ecology, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY
- Mandelbrot, B. B., 1982, The fractal Geometry of Nature, Freeman and Co., San Francisco.
- Sugihara, G. and May, R. M., 1990, Application of fractals in ecology, Trends in Ecology and Evolution, Vol. 5, No. 3, pp. 79~86