GIS와 확률론적 해석 기법을 기반으로 한 평면파괴의 운동학적 안정성 해석

이석환 · 박혁진*

세종대학교 지구정보공학과

Kinematic Analysis of Plane Failure for Rock Slope Using GIS and Probabilistic Analysis Method

Seok Hwan Lee and Hyuck Jin Park*

Department of Geoinformation Engineering, Sejong University, Seoul 143-747 Korea

The stability of rock slope is mainly controlled by the orientation and shear strength of discontinuities in rock mass. Therefore, in kinematic analysis, the orientation of the combination of discontinuities and slope face is examined to determine if certain modes of failure can be occurred. In previous kinematic analysis, a representative orientation of the slope face and mean orientation of discontinuity set were used as input parameters. However, since the orientations of slope face varies according to locations of measurement, the representative slope face orientation could cause misunderstanding for kinematic instability. In addition, since the orientations of each discontinuity are scattered in the same discontinuity set, there is the possibility that uncertainties are involved in the procedure of kinematic analysis. Therefore, in this study, the detailed digital topographic map was used to obtain the orientation of slope face. In addition, the probabilistic analysis approach was utilized to deal properly with the uncertainties in discontinuity orientation. The proposed approach was applied to steep slopes in mountain road located in Baehuryeong, Chunncheon city, Gangwon-Do. The analysis results obtained from the deterministic and probabilistic analysis were compared to check the feasibility of proposed the analysis.

Key words : kinematic analysis, plane failure, Monte Carlo simulation, rock slope, GIS

암반으로 구성된 사면의 안정성은 암반 내에 포함되어 있는 불연속면의 방향과 강도 특성에 의해 좌우된다. 특히 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요인은 암반 내 불연속면의 방향과 사면 방향의 상대적 위치로 운동학적 분석에서는 이러한 사면의 방향성과 불연속면의 방향의 상대적 위치를 고려하여 사면 붕괴의 발생 여부를 판단한다. 기존의 운동학적 분석은 사면의 대표적인 방향을 먼저 결정하고 사면내에 분포하는 대표적인 불연속면의 방향성과의 비교를 통해 사면에서의 파괴 발생 여부를 평가하는 방식으로 수행되어왔다. 그러나 사면의 대표적인 방향성만을 이용하여 운동학적 분석을 수행하는 경우 사면 내에서 발생하는 사면 방향의 변화를 분석에 고려하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 또한 불연속면 방향의 경우 불확실성에 의해 동일한 불연속면군에 속한 불연속면이라도 분산이 커지는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 수치지형도를 이용하여 사면을 여러 개의 cell로 구분하고 각 cell에서 사면의 경사방향과 경사를 획득하였다. 그리고 각 cell의 사면 방향을 불연속면의 방향성과 비교하여 각 cell에서의 평면파괴에 대한 운동학적 분석을 수행하였다. 또한 불연속면 방향성에 개입된 불확실성을 고려하기 위하여 불연속면의 경사와 경사방향을 확률변수로 선정하고 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 확률론적 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 제안된 해석기법의 적정성을 파악하기 위하여 급경사지의 사면이 분포하고 있는 강원도 춘천시 관내 배후령길을 대상으로 분석을 수행하였다.

주요어 : 운동학적 분석, 평면파괴, 몬테카를로 시뮬레이션, 암반사면, GIS

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 original work is properly cited.

*Corresponding author: hjpark@sejong.ac.kr

1. 서 론

암반사면의 안정성은 사면 내에 분포하는 불연속면의 기하학적 특성 및 역학적 특성에 의해 좌우되며 이러한 안정성에 대한 해석은 접근 방법에 따라 크게 운동학적 분석(kinematic analysis)과 역학적 분석(kinetic analysis)으로 구분된다. 운동학적 분석은 사면에 작용하는 힘에 대한 고려 없이 불연속면과 사면의 상대적인 위치에 따라 안정성을 파악하는 분석 방법이다. 반면 역학적 분석은 불연속면의 강도 특성과 암반에 작용하는 힘을 고려하여 암반사면의 안정성을 분석하는 방법이다(Wyllie and Mah, 2004). 운동학적 분석은 암반과 불연속면의 강도 특성을 필요로 하는 역학적 분석과는 달리 현장조사를 통해 불연속면과 사면의 방향성을 획득하고 평사투영법을 이용하여 사면의 파괴 유형과 안정성을 분석하는 특징을 가지고 있다. 따라서 기존의 운동학적 분석에서는 현장조사를 통해 불연속면과 사면의 대표적인 방향을 획득한 후 이를 평사투영도에 도시하여 사면의 안정성 분석을 수행하여 왔다(Shin, 2012; Sun, 2012; Yu, 2012). 그러나 이러한 분석에서는 불연속면과 사면의 대표적인 방향성만을 고려하여 분석을 수행하였기 때문에 사면 내의 위치에 따라 분석 대상 사면의 경사나 방향이 변화되는 것을 고려하지 못하였다. 또한 현장으로부터 획득된 불연속면 방향의 경우 불연속면군의 대표 방향성만을 분석에 활용하기 때문에 동일한 절리군 내의 불연속면이 분산되어 분포하고 있는 현장 상황을 반영하지 못했다. 특히 운동학적 분석은 주로 단일 사면을 대상으로 수행되어져 왔는데 최근 들어 GIS(Geographic Information System, 지리정보시스템)의 활용을 통해 공간데이터를 효율적으로 획득하고 처리할 수 있게 됨에 따라 광역적인 지역에 분포하는 사면들에 대해 동시에 분석을 수행할 수 있으며 이를 효과적으로 시각화할 수 있게 되었다(Günther *et al.*, 2004; Günther and Thiel, 2009; Grelle *et al.*, 2011; Yilmaz *et al.*, 2012). 따라서 본 연구에서는 대표 방향성만을 분석에 사용하던 기존 연구의 한계점을 보완하고 GIS 기법의 장점을 활용하여 도로 상에 분포하는 다수의 사면에 대해 효과적으로 운동학적 해석을 수행할 수 있는 기법을 제안하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 각 사면을 여러 개의 cell로 구분하고 연구지역에 대한 고해상도 DEM을 통해 각 cell에 대한 사면의 방향을 획득하였으며 도로를 따라 선형적으로 분포하고 있는 다수의 사면에 대한 운동학적 분석을 수행하였다. 또한 불연속면의 방

향성 자료에 포함된 불확실성을 고려하기 위하여 확률론적 해석기법인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation) 기법을 활용한 분석 모듈을 개발하고 이를 분석에 활용하였다. 본 연구에서는 암반사면의 붕괴 유형 중 평면파괴에 대하여 개발된 분석 모듈을 활용하여 운동학적 분석을 수행하였으며 불연속면과 사면의 대표 방향성만을 이용하는 기존의 분석 방식에 의한 결과와 비교해 보았다.

2. 평면파괴의 안정성 분석

2.1. 운동학적 분석

암반사면에서 발생하는 파괴는 대상 암반 내에 존재하는 지질학적 불연속면의 방향성에 의해 파괴의 유형이 결정된다. 본 연구에서는 암반사면의 다양한 파괴 유형 중 평면파괴에 대한 안정성 분석 기법을 제안하였으며 평면파괴의 운동학적인 조건(Hoek and Bray, 1981)은 다음과 같다(Fig. 1).

1. 미끄러짐이 발생하는 면은 경사면에 평행하거나 거의 평행한 (대략 $\pm 20^\circ$ 이내) 주향을 가져야 한다.
2. 미끄러짐이 발생하는 면은 경사면에 노출되어야 한다. 즉, 사면의 경사각(ψ_p)이 미끄러짐이 발생하는 면의 경사각(ψ_f)보다 커야 함($\psi_f > \psi_p$)을 의미한다.
3. 미끄러짐이 발생하는 면의 경사각(ψ_p)은 그 면의 마찰각(ϕ)보다 더 커야한다. 즉, $\psi_p > \phi$ 이다.
4. 미끄러짐에 대하여 저항력을 거의 갖지 못하는 이완면이 미끄러짐의 측면 경계부로서 암반 내에 존재하여야 한다. 또 다른 형태로는 미끄러짐이 발생하는 면이 사면에서 불록하게 튀어나온 부분을 통과할 때도 파괴가 발생할 수 있다.

2.2. 몬테카를로 시뮬레이션 기법(Monte Carlo simulation method)

몬테카를로 시뮬레이션은 상태함수에 대한 반복적인 계산을 통해 결과를 획득하는 시뮬레이션 기법이다. 즉, 상태함수를 구성하는 확률변수의 확률분포함수로부터 무작위로 값들을 발생시키고 각 확률변수로부터 발생된 임의의 수들을 상태함수에 넣어 값을 획득한다. 그리고 이러한 계산을 여러 차례 반복하여 많은 수의 상태함수 값을 얻어 파괴확률(probability of failure)을 계산한다. 몬테카를로 시뮬레이션은 확률론적 해석기법 중에서 가장 폭 넓게 사용되는 방법 중의 하나로 이론적으로는 결정론적 해석이 가능한 모든 모델에 적용이

Fig. 1. Kinematic conditions for plane failure in rock slope (Norrish and Wyllie, 1996).

가능하며 반복적인 계산을 통해 파괴확률을 계산한다 (Park, 2007). 몬테카를로 시뮬레이션은 상태함수에 변형을 가하지 않고 기존 상태 함수의 형태를 그대로 보존하여 파괴확률을 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다.

몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 파괴확률을 구하기 위해서는 우선적으로 상태함수의 모델인 평면파괴의 운동학적 조건에 대한 함수식을 결정해야 한다. 그리고 상태 함수식의 입력변수 중 불확실성을 포함한 확률변수에 대하여 통계적인 분석을 수행하여 확률분포, 평균, 표준편차 등과 같은 확률특성을 획득한다. 이

렇게 획득된 각 확률변수들의 확률분포를 활용하여 무작위 난수(random value)를 생성하고 이를 상태함수에 입력하여 반복적인 계산을 수행, 상태 함수 값에 대한 확률밀도분포곡선을 획득한다. 이렇게 획득한 확률밀도분포함수를 이용하여 전체 반복 계산 횟수 중 불안정한 것으로 분석된 계산 횟수를 다음과 같이 계산하여 파괴확률(probability of failure, PF)을 산정하게 된다.

$$PF = \frac{M}{N}$$

이때 N 은 반복 계산된 총 계산 횟수이고 M 은 반복 계산 중 불안정한 것으로 해석된 경우의 횟수를 의미한다. 본 연구에서는 현장조사 시 측정된 불연속면의 경사와 경사방향을 확률변수로 선정하고, 위의 순서에 따라 파괴확률을 산정하였다.

3. 연구지역

본 연구에서 제안된 분석기법을 적용하여 평면파괴에 대한 운동학적 분석을 수행하기 위하여 급경사의 사면이 다수 분포하고 있는 강원도 춘천시 신북읍 일대의 배후령길을 연구지역으로 선정하였다. 연구지역의 위치는 지리좌표 상으로 경도 $127^{\circ}47'05.59'' \sim 127^{\circ}47'40.98''$, 위도 $37^{\circ}58'35.45'' \sim 37^{\circ}59'47.49''$ 에 해당한다(Fig. 2). 본 연구지역은 경기육괴를 형성하는 경기변성암복합체를 기반암으로 대부분 여러 차례에 걸쳐 고도의 변성작용을 경험한 편마암으로 구성되어 있으며, 각섬암이 협재되어 분포한다. 연구 대상 사면은 주로 북운모 화강암과 용두리 편마암 복합체의 석류석 편마암으로 구성되어 있다. 북운모 화강암은 연구지역 내의 용화산 전체를 구성하고 북쪽부의 반상화강암을

관입하여 분포하고 있으며 남쪽부의 함석류석 북운모 화강암과는 점이적인 관계를 가진다. 석류석 편마암은 호상편마암을 관입한 후 중생대 화천화강암에 의해 관입당하여 이 암석들 사이에 산재하여 분포하고 있다(Lee, 2007). 분석 대상 사면이 분포하고 있는 배후령길은 급경사지를 가진 험준한 산악 도로로 국도변을 따라 다수의 사면이 분포하고 있으며 MOCT(2005)에 따르면 낙석사고가 빈번히 발생하고 있는 지역이다. 본 연구에서는 배후령길을 따라 2.6 km 길이에 분포하고 있는 13개소의 암반사면을 대상으로 현장조사를 실시하여 대상 사면들의 기하학적 특성과 불연속면의 방향성을 획득하였다.

4. 공간 데이터베이스 구축 및 분석과정

본 연구에서는 도로 상에 분포하는 사면들에 대한 운동학적 분석을 수행하기 위해서 연구대상 사면의 기하학적 특성을 공간 데이터베이스로 구축하였다. 사면 형태와 방향의 경우 수치지형도와 항공사진을 통해 획득하였으며, 사면에 분포하는 불연속면의 경우 현장 조사를 통해 현장으로부터 각 사면에 분포하고 있는 불

Fig. 2. Location of study area.

연속면의 대표적인 방향성 자료를 획득하였다. 불연속면 방향성의 경우 다수의 불연속면 방향을 획득하여 이들의 분포특성을 파악하고 방향성의 평균값을 획득해야 한다. 그러나 연구지역에 분포한 사면의 경우 낙석이 빈번하게 발생하는 지역의 특성상 대부분의 사면에 낙석방지망이 설치되어 다수의 불연속면 방향성 자료를 획득하기 어려운 상황이며 따라서 대표적인 방향성만을 측정하여 이를 불연속면 방향의 평균값으로 고려하였다.

또한 분석기법 적용에 필요한 입력 자료 중 사면의 기하학적 특성의 경우 연구지역에 대한 1:5,000 축척의 수치지형도를 활용하고 Arc/Info 프로그램을 사용하여 획득하였다. 이를 위하여 수치지도로부터 각 사면을 5 m × 5 m 크기의 cell로 구성된 래스터(raster)를 구축하여 분석에 필요한 주제도(thematic map)를 작성하였다. 먼저 연구지역의 1:5,000 축척 수치지형도에서 등고선 벡터 레이어(vector layer)의 높이(elevation) 속성을 사용하여 TIN(Triangulated Irregular Network, Fig. 3)을 구축하고 이를 활용하여 각 cell에 해당하는

사면의 경사(dip angle, Fig. 4) 주제도와 경사방향(dip direction, Fig. 5)의 주제도를 작성하였다. 또한 현장조사로부터 획득된 불연속면의 경사와 경사방향의 자료를 연구 대상 사면에 속성정보로 추가하여 불연속면의 경사와 경사방향에 대한 공간자료 데이터베이스를 구축하였다. 그 밖에 분석에 필요한 불연속면 마찰각의 경우 연구지역에 대한 지질 및 지반 조사 보고서(Dongbu Engineering, 2003)를 참고하여 암종 별 평균 마찰각 값을 결정하였다. 암종별 평균 마찰각은 불연속면을 대상으로 진단시험을 실시하여 획득한 결과로 복운모 화강암과 석류석 편마암의 마찰각 평균 값은 각각 37°와 33°이었다.

이러한 과정을 통해 구축한 연구지역의 주제도는 Arc/Info 프로그램에서 ASCII 형식으로 변환하여 분석의 입력자료로 활용하였고 MATLAB을 기반으로 개발한 운동학적 분석 모듈(module)과 확률론적 분석 모듈을 활용하여 계산을 수행하였다. 운동학적 분석 모듈에서는 현장에서 측정한 불연속면의 방향과 수치지형도에서 획득한 사면의 방향을 운동학적 해석의 입력값

Fig. 3. TIN(Triangulated Irregular Network) for study area.

Fig. 4. Slope angle distribution map of the study area.

Fig. 5. Slope direction distribution map of the study area.

으로 사용하여 평면파괴에 대한 사면의 안정성을 계산하였으며 해석의 편의를 위해 전단강도가 거의 존재하지 않는 이완면이 존재한다는 가정 하에 분석을 수행하였다. 또한 확률론적 분석모델에서는 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용하여 확률론적 분석을 수행하였다. 확률론적 해석에서는 현장조사를 통해 측정된 불연속면의 경사와 경사방향의 대표값에 불확실성이 개입되어 있는 것으로 판단하여 이 두 값을 확률변수로 고려하였으며 경사와 경사방향 모두 정규분포함수를 보이는 것으로 가정하였다. 특히 몬테카를로 시뮬레이션에서는 현장에서 획득한 불연속면의 대표 방향을 평균 방향으로 가정하고 확률변수의 확률분포함수를 고려하여, 반복적으로 불연속면의 방향을 생성한 후 이를 상태함수에 입력하여 반복적인 계산을 수행하였다(Fig. 6). 이러한 반복적인 계산을 통해 계산결과의 확률밀도분포곡선을 획득하고 확률밀도분포곡선으로부터 불안정영역 내의 빈도수를 계산하여 파괴확률을 산정하였다. 두 모듈을 통해 계산한 결과는 ASCII 파일로 구축하였으며 Arc/Info 프로그램에서 래스터 파일로 변환하여 평면파괴의 취약성도와 파괴확률 지도를 작성하였다.

Fig. 6. Flow chart for Monte Carlo simulation.

5. 분석 및 결과

본 연구에서는 먼저 기존의 운동학적 분석 방식과 같이 사면의 대표적인 방향성과 현장조사를 통해 획득한 불연속면의 평균 방향을 활용하여 각 사면에 대한 운동학적 분석을 수행하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 바와 같이 사면의 방향을 고해상도의 수치지형도를 통해 획득하고 현장에서 획득한 불연속면의 방향을 활용하여 결정론적 안정성 분석을 수행하였다. 또한 불연속면의 방향을 확률변수로 고려하여 확률론적 해석을 수행하였으며 그 결과를 결정론적 해석의 결과와 비교하였다.

5.1. 기존의 해석방식에 의한 운동학적 안정성 분석

기존의 평면파괴에 대한 운동학적 분석은 사면의 대표적인 방향을 먼저 결정하고 사면내에 분포하는 대표적인 불연속면의 방향과의 비교를 통해 사면에서의 평면파괴 발생여부를 평가하는 방식으로 수행되어왔다. 따라서 본 연구에서는 기존의 해석 방식에 의한 결과와 본 연구에서 제안한 해석 방식에 의한 결과를 비교하기 위하여 기존의 방식대로 개별 사면에 대한 운동학적 해석을 수행하였다. 이를 위하여 연구대상 사면인 13개소 사면에 대하여 현장 조사를 수행하여 각 사

Table 1. Evaluation of kinematic stability using representative orientation of slope and discontinuity

Slope No.	Slope direction (dip dir./dip)	Discontinuity No. 1 (dip dir./dip)	Discontinuity No. 2 (dip dir./dip)	Discontinuity No. 3 (dip dir./dip)	Discontinuity No. 4 (dip dir./dip)	Kinematic stability
1	270/68	300/50	296/42	037/40	224/70	stable
2	304/80	328/36	237/55	315/62	102/44	stable
3	252/74	314/56	247/62	245/63	111/49	stable
4	264/64	049/69	202/77	279/77	041/33	unstable
5	276/80	306/40	309/65	262/83	121/70	unstable
6	234/80	255/74	331/76	039/28	284/59	stable
7	188/77	296/46	281/79	350/84	277/79	stable
8	310/78	008/79	297/86	273/30	018/39	unstable
9	262/80	029/71	301/79	111/05	027/89	stable
10	306/78	308/70	081/73	143/89	245/81	stable
11	314/80	112/81	202/61	301/55	205/50	stable
12	282/78	100/80	181/84	281/35	285/36	stable
13	284/68	269/21	270/59	082/80	133/76	stable

면의 대표적인 방향을 획득하였으며 각 사면으로부터 대표적인 불연속면의 방향성을 측정하였다(Table 1). 이렇게 획득된 자료를 활용하여 평면파괴에 대한 운동학

적 분석을 수행하였으며 그 결과 No. 4 사면과 No. 5 사면 그리고 No. 8 사면이 운동학적으로 불안정한 것으로 분석되었다(Fig. 7).

5.2. 결정론적 해석기법을 활용한 운동학적 안정성 분석

앞서 언급된 기존의 운동학적 해석기법은 사면과 불연속면의 대표적인 방향을 비교하여 운동학적 분석을 수행하였기 때문에 사면 내에서 발생하는 사면 방향의 변화를 분석에 고려하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 1:5,000 축척의 수치지형도를 활용하여 각 사면을 5m × 5m의 cell로 분할하고 각 cell에서 사면의 경사와 경사방향을 획득하였다. 이러한 과정을 통해 Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 동일한 사면내에서 사면의 경사와 경사방향을 변화가 있음을 확인하였으며 이렇게 획득한 사면의 방향과 불연속면의 방향을 비교하여 각 cell에서의 운동학적 분석을 수행하였다. 그리고 각 cell에서 수행한 운동학적 분석 결과는 Fig. 8에서와 같이 지도상에 표시하였다. 분석결과를 살펴보면 사면의 대표 방향성을 활용하여 분석을 수행한 결과(Table 1 and Fig. 7)에서 안정한 것으로 분석되었던 사면들(즉, 사면 No. 1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13)에서도 사면 내 일부 cell에서는 불안정한 지역이 있는 것으로 분석되었다(Table 2 and Fig. 8). 즉, 사면의 대표적인 방향으로 분석을 수행하는 경우 사면내 일부 구간의 방향 변화에 따라 평면파괴가 발생할 가능성이 있음을 인지하지 못하는 결과가 발생하였다. 특히 사면 No. 6과 7의 경우 사면의 대표방향으로부터 분석한 결과로

Fig. 7. The results of kinematic analysis using conventional approach.

Fig. 8. The results of deterministic kinematic analysis for the study area.

Fig. 9. The results of probabilistic kinematic analysis for the study area.

Table 2. Results of kinematic analysis using deterministic approach

Slope No.	% of area analyzed as stable	% of area analyzed as unstable
1	62.2%	37.8%
2	65.9%	34.1%
3	58.2%	41.8%
4	51.6%	48.4%
5	55.1%	44.9%
6	39.2%	60.8%
7	40.5%	59.5%
8	27.3%	72.7%
9	87.8%	12.2%
10	74.6%	25.4%
11	79.1%	20.9%
12	60.4%	39.6%
13	46.8%	53.2%

는 안정한 것으로 분석되었으나 사면 내 방향성의 변화를 고려하여 분석한 경우 전체 사면의 약 60.8%와

59.5%가 불안정한 것으로 분석되어 사면의 대표적인 방향성을 활용한 분석 결과가 사면의 현장 여건을 충분히 반영하고 있지 못한 것으로 분석되었다.

5.3. 확률론적 해석기법을 통한 운동학적 안정성 분석

본 연구에서는 사면 내에 분포하고 있는 불연속면이 동일한 불연속면 군이라 할지라도 분산이 심하여 불확실성이 개입된다는 사실에 기초하여 불연속면의 방향, 즉 불연속면의 경사와 경사방향을 확률변수로 선정하고 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 확률론적 해석을 수행하였다. 몬테카를로 시뮬레이션에서는 불연속면의 경사와 경사방향이 모두 정규분포곡선을 따르는 확률변수로 고려하였으며 경사와 경사방향 모두 3도의 표준편차를 가지고 평균방향 ± 10 도 내에서 변동되는 것으로 분석을 수행하였다(Fig. 9).

확률론적 분석 결과 전체 지역 중 파괴확률이 0-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%, 50-60%, 60-70%, 70-80%, 80-90%, 90-100%를 보이는 비율이

각각 46.3%, 4.8%, 2.0%, 2.6%, 28.3%, 0.9%, 1.0%, 1.1%, 2.2%, 10.8%으로 분석되었다. 결정론적 해석의 경우 안전율 1.0을 기준으로 위험한 지역과 안전한 지역을 구분하게 되나 확률론적 해석에서 이러한 경계가 존재하지 않는다. 따라서 이전의 연구들(Priest and Brown, 1983; Fell, 2000; Fell *et al.*, 2008; Liu and Wu, 2008; Silva *et al.*, 2008, Park *et al.*, 2013)을 참고하여 파괴확률 10%를 위험한 지역과 안전한 지역의 경계로 선정하였다. 즉, 파괴확률이 10% 이하인 경우 안전한 것으로, 그리고 파괴확률이 10% 이상인 경우 불안정한 것으로 판단하였다.

Table 3의 개별 사면에 대한 확률론적 해석 결과를 살펴보면 결정론적 해석 결과에 비해 모든 사면에서 불안정한 영역이 상승하였음을 볼 수 있다. 즉, 결정론적 해석의 경우 불연속면의 대푯값만을 활용하여 분석을 수행하기 때문에 대푯값이 안정한 것으로 분석된 경우라도 불연속면 방향의 분산을 고려할 경우 불안정한 것으로 해석되는 경우가 많음을 의미한다. 이는 불연속면의 대푯값만을 활용하여 분석을 수행하는 경우 해석결과에 오류가 발생할 수 있음을 보여 준다. 또한 본 연구에서는 결정론적 해석 결과와 확률론적 해석 결과 사이의 차이점을 비교하기 위하여 각 cell에서 결

정론적 해석 결과와 확률론적 해석 결과를 비교하여 분석하였다(Fig. 10, Table 4). 즉, 각 cell을 결정론적 해석과 확률론적 해석 모두 안정한 것으로 해석된 경우, 결정론적으로는 안정한 것으로 해석되었지만 확률론적으로 불안정한 것으로 해석된 경우, 결정론적으로 불안정한 것으로 해석되었지만 확률론적으로 안정한 경우, 그리고 결정론적인 해석과 확률론적 해석 모두 불안정한 것으로 해석된 경우로 구분하였다. Table 4에서와 같이 결정론적으로 불안정한 것으로 해석된 경우는 92.5%에 해당하는 cell이 확률론적 해석에서도 불안정한 것으로 해석되었고 7.5%의 경우만 해석 결과가 일치하지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 결정론

Table 3. Results of kinematic analysis using probabilistic approach

Slope No.	% of area analyzed as stable	% of area analyzed as unstable
1	46.4%	53.6%
2	58.7%	41.3%
3	39.9%	60.1%
4	18.6%	81.4%
5	38.6%	61.4%
6	25.9%	74.1%
7	10%	90%
8	7.7%	92.3%
9	81.4%	18.6%
10	58.5%	41.5%
11	55.5%	44.5%
12	48.5%	51.5%
13	20.3%	79.7%

Fig. 10. Comparison between deterministic analysis and probabilistic analysis for kinematic stability (DS: deterministically stable, PS: probabilistically stable, DU: deterministically unstable, PU: probabilistically unstable)

Table 4. Comparison between deterministic analysis and probabilistic analysis

	Deterministically stable	Deterministically unstable
Probabilistically stable	58.6%	7.5%
Probabilistically unstable	41.4%	92.5%

적으로 안정한 것으로 해석된 cell의 경우 41.4%가 확률론적으로 불안정한 것으로 해석되었다. 이러한 결과를 고려해볼 때 특히 결정론적으로 안정한 것으로 분석된 경우 불연속면의 분산에 의해 확률론적으로 불안정한 것으로 분석될 가능성이 많음을 의미하며 결정론적 해석과 같이 불연속면의 대푯값만을 활용하여 분석을 수행하는 경우 현장 상황을 충분히 반영하지 못할 수 있음을 고려해야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

현재 활용되고 있는 평면파괴에 대한 운동학적 분석은 사면의 대표적인 방향을 먼저 결정하고 사면내에 분포하는 대표적인 불연속면의 방향성과의 비교를 통해 사면에서 평면파괴가 발생할 것인지를 평가하는 방식으로 수행되어 왔다. 그러나 이러한 분석 방식은 사면 내에서 발생하는 사면 방향의 변화를 분석에 고려하지 못한다는 점과 불연속면 방향의 분산이 심할 경우 불연속면의 대표 방향을 획득하는 과정에서 불확실성이 개입되는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 수치지형도를 활용하여 각 사면을 다수의 cell로 분할하고 각 cell에서 사면의 경사방향과 경사를 획득하였으며 이를 활용하여 각 cell에서의 운동학적 분석을 수행하였다. 또한 불연속면의 경사와 경사방향을 확률변수로 선정하고 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 확률론적 해석을 수행하였으며 이렇게 개발된 해석기법을 강원도 춘천시 배후령길 지역을 대상으로 적용해 보았다. 그 결과 기존의 해석 방식에 의한 분석에서는 13개소 사면 중에 3개소의 사면만이 위험한 것으로 분석되었으나 사면 내 방향의 변화를 고려하여 분석한 경우 모든 사면에서 불안정한 지역이 나타나고 있음을 확인하였다. 특히 확률론적 해석을 수행한 결과를 분석해 보면 불안정한 지역이 훨씬 증가함을 볼 수 있다. 또한 각 cell에서 결정론적 해석과 확률론적 해석을 비교해본 결과 결정론적으로 불안정한 지역으로 분석된 경우 대부분 확률론적 분석에서도 불안정한 지역으로 해석되었다. 반면 결정론적으로 안정한 것으로 분석된 많은 cell에서 확률론적으로는 불안정한 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과로부터 기존의 해석방식은 현장 상황을 충분히 반영하지 못하는 것으로 보이며 사면 내 방향의 변화와 불연속면의 분산과 같은 불확실성에 대한 고려를 통해 좀 더 현장 상황을 충실하게 반영할 수 있는 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 2013년도 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 일부입니다(NRF-2013R1A1A2A10058724).

참고문헌

- Dongbu Engineering (2003) Technical Report on Geotechnical Site Investigation for Road Improvement between Shinbuk and Buksan, 842p.
- Fell, R. (2000) Landslide risk management concepts and guidelines-Australian Geomechanics Society Subcommittee on Landslide Risk Management In; Landslides, International Union of Geological Sciences, p.51-93.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. and Savage, W.Z. (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for landuse planning. *Engineering Geology*, v.102, n.3-4, p.85-98.
- Grelle, G., Revellino, P., Donnarumma, A. and Guadagno, F.M. (2011) Bedding control on landslides: a methodological approach for computer-aided mapping analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.11, p.1395-1409.
- Günther, A., Carstensen, A. and Pohl, W. (2004) Automated sliding susceptibility mapping of rock slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.4, p.95-102.
- Günther, A. and Thiel, C. (2009) Combined rock slope stability and shallow landslide susceptibility assessment of the Jasmund cliff area (Rügen Island, Germany). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.9, p.687-698.
- Hoek, E. and Bray, J.W. (1981) *Rock Slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy*, Third Edition, 360p.
- Jeong, N.S., You, K.H. and Park, H.J. (2011) Stability analysis of landslides using a probabilistic analysis method in the Boeun area. *The Journal of Engineering Geology*, v.21, p.247-257.
- Lee, J.K. (2007) Geological Structures and Characteristics of the Baehuryeong fault zone of the Chuncheon-Hwacheon area, Kangwon-do, Korea. Gangwon Univ., Master Thesis, 142p.
- Liu, C.N. and Wu, C.C. (2008) Mapping susceptibility of rainfall-triggered shallow landslides using a probabilistic approach. *Environmental Geology*, v.55, n.4, p.907-915.
- Ministry of Construction and Transportation(MOCT). (2005) Development and Operation of Road Cut Slope Management System, 308p.
- Norriish, N.I. and Wyllie, D.C. (1996) Rock slope stability analysis. In; Turner, A.K., and Schuster, R.L., *Landslides: Investigation and Mitigation*, National Academy Press, p.397.
- Park, H.J. (2007) Probability analysis. In; Korean Society for Rock Mechanics (ed.), *Rock Slope Engineering*, Construction Information Press, p.261-285.

- Park, H.J., Lee, J.H. and Woo, I. (2013) Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a GIS-based probabilistic approach. *Engineering Geology*, 161, p.1-15.
- Priest, S.D. and Brown, E.T. (1983) Probabilistic stability analysis of variable rock slopes, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, London, 92, A1-A2.
- Shin, S.M. (2012) A Study for the Behavior of Rock Slope the Crest of which has been excavated. Pukyong Univ., Master Thesis, 119p.
- Silva, F., Lambe, T.W. and Marr, W.A. (2008) Probability and risk of slope failure, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.134, n.12, p.1691-1699.
- Sun, J.Y. (2012) Stabilization of Different Types of Slope Failure. Chosun Univ., Master Thesis, 96p.
- Willie, D.C. and Mah, C.W. (2004) *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th ed., Spon Press, 431p.
- Yilmaz, I., Marschalko, M., Yildirim, M., Dereli, E. and Bednarik M. (2012) GIS-based kinematic slope instability and slope mass rating(SMR) maps: application to a railway route in Sivas (Turkey). *Bull Eng Geol Environ*, v.71, p.351-357.
- Yu, S.T. (2012) Stability Evaluation and Reinforcement Design Method of the Rock Slope. Pukyong Univ., Master Thesis, 72p.

2014년 3월 11일 원고접수, 2014년 4월 20일 1차수정,
2014년 4월 23일 게재승인