

절취사면에 대한 삼차원 절리암반 가시화모델 개발

허인실, 엄정기(부경대학교)

1. 서론

절리암반의 구조적 특성에 대한 확고한 이해는 암반구조물의 효과적인 설계 및 유지·관리에 있어서 매우 중요한 요소이다. 지표 및 지하의 노출된 절리암반에서 선형조사선 또는 조사창기법(Priest, 1993; Priest and Hudson, 1981)에 의하여 획득한 절리자료를 기초로 절리구조의 기하학적 모수를 추정하고, 절리암반의 삼차원적 구조특성을 통계적 과정으로 모사하는 방법론(Kulatilake et al., 1993, 1996, 2003)이 제안되었다. 이와 같은 대상 절리암반의 삼차원적 구현을 바탕으로 절리암반의 강도 및 변형 등의 역학적 특성에 대한 연구와 삼차원적 암반 지하수 특성에 대한 연구가 현재 국내외적으로 활발하게 수행되고 있다. 본 논문은 암반사면안정 해석을 위한 기초 핵심 요소 개발의 일환으로 절리암반 내에서 변동성을 수반하는 통계적 절리연결구조를 삼차원적으로 가시화하여 GUI 기초의 암반사면안정해석시스템 도출의 토대를 마련하기 위한 선행연구결과를 수록하였다.

2. 삼차원 절리연결망 모델

2.1 현장조사

본 연구 대상지역은 부산-울산 고속국도의 기장군 장안읍 좌동리에서 울주군 온양읍 운화리에 구간에 위치한 절취사면 중 평면 파괴의 가능성이 관찰되는 2개소의 사면에 대하여 선형조사선을 이용한 절리조사(SL3, SL5)를 실시하였다. 조사 사면에는 주로 유문암류가 분포하고, 열수변질의 영향으로 주로 백색 내지 담홍색을 띤다. 단층의 영향으로 절리 발달 및 파쇄 정도가 심하며, 부분적으로 열수의 영향으로 산화되어 적색을 띠는 부분도 관찰된다. Table 2.1은 SL3 및 SL5에 대한 사면 제원 및 일반현황을 나타내고 있다. 또한 Fig. 2.1 및 Fig. 2.2는 조사선 조사지역의 현장 사진이다.

Table 2.1 The specifications of surveyed rock slopes

Scanline ID	Scanline length(m)	Slope specifications				Weathering grade
		Dip Dir.(°)	Dip(°)	Hight(m)	Width(m)	
SL3	16.0	280	70	15	54	HW
SL5	24.6	298	63	19	45	SW

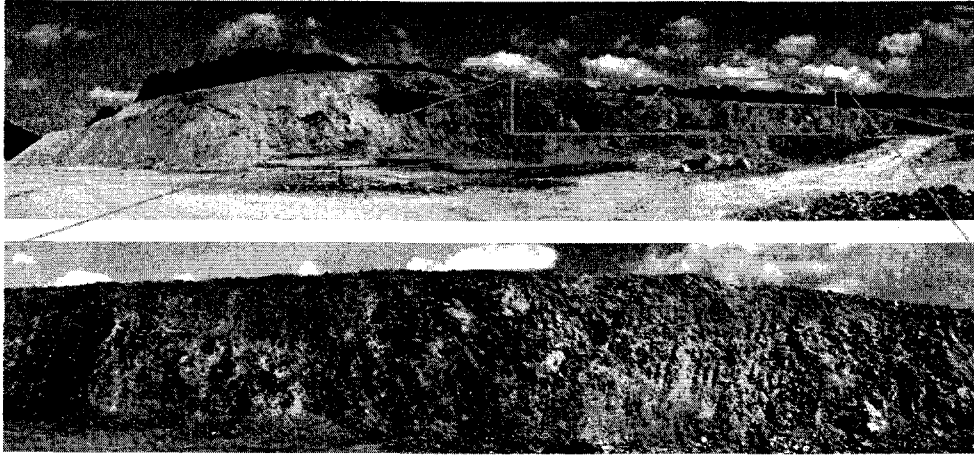


Fig. 2.1 Photographs of the SL3 in the study area



Fig. 2.2 A Photograph of the SL5 in the study area.

2.2 절리 방향성, 간격 및 크기 분석

선형 조사선에서 관측된 절리 방향 자료를 사용하여 절리군을 구분함에 있어서는 클러스터링 알고리즘(Shanley and Mahtab, 1976; Mahtab and Yegulalp, 1984)을 적용하여 절리면 법선 벡터의 밀집점(dense point)을 확인하고 이에 의한 최적의 절리군 수를 구분하는 목적함수 (objective function)에 따라 절리군을 분석하는 방법을 사용하였다. 이렇게 분류된 절리군의 방향분포에 대한 이론적인 통계분포로는 일반적으로 Fisher 분포(Fisher, 1953)가 주로 사용되고 있으며, 본 연구에서는 Fisher 분포의 적합성 검증을 수행하였다. Table 2.2는 연구지역에서 구분된 절리군의 평균 방향성과 Fisher분포에 대한 적합성 검증 결과를 수록하고 있다. 또한 Fig. 2.3은 각 조사선에서의 절리방향 분포를 나타내고 있다.

Fisher분포의 χ^2 검증 결과(Table 2.2)에서 본 연구지역에서 구분된 절리군의 대부분은 Fisher 분포 모델이 통계적으로 적합하지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 이론적 Fisher분포가 연

구지역의 절리군에 대하여 통계분포로 채택될 수 없음을 시사하며, 여러 연구자들에 의하여 기 수행된 방향분포에 대한 연구에서도 기존의 Fisher분포 혹은 이변량정규분포가 실제 현장에서 방향 자료의 통계분포로 충분하지 않음을 지적한 바 있다(Kulatilake et al., 1990; 1993; 1996; Wang et al., 2002). 이와 같이 기존의 이론적 확률분포에 의해 해석될 수 없는 절리군에 대한 방향분포 모델링을 위해서는 경험적 방향분포(empirical orientation distribution)를 적용할 수 있다(Kulatilake et al., 1993; 1996; Wang et al., 2002).

Table 2.2 Delineated joint sets and χ^2 test results for Fisher distribution of orientation data.

Scanline ID	Set No.	No. of data	Mean orientation		K	S,P	P
			Dip Dir.(°)	Dip.(°)			
SL3	1	44	348.22	86.26	13.815	0.071	<0.005
	2	37	290.72	61.23	17.242	0.056	0.279
	3	45	038.60	87.32	17.412	0.056	<0.005
	4	39	081.82	54.86	16.804	0.058	<0.005
SL5	1	27	249.45	85.87	12.639	0.076	<0.005
	2	13	358.64	68.14	23.466	0.039	0.065
	3	7	183.88	53.64	20.872	0.042	0.097
	4	13	310.68	62.27	19.806	0.047	0.020

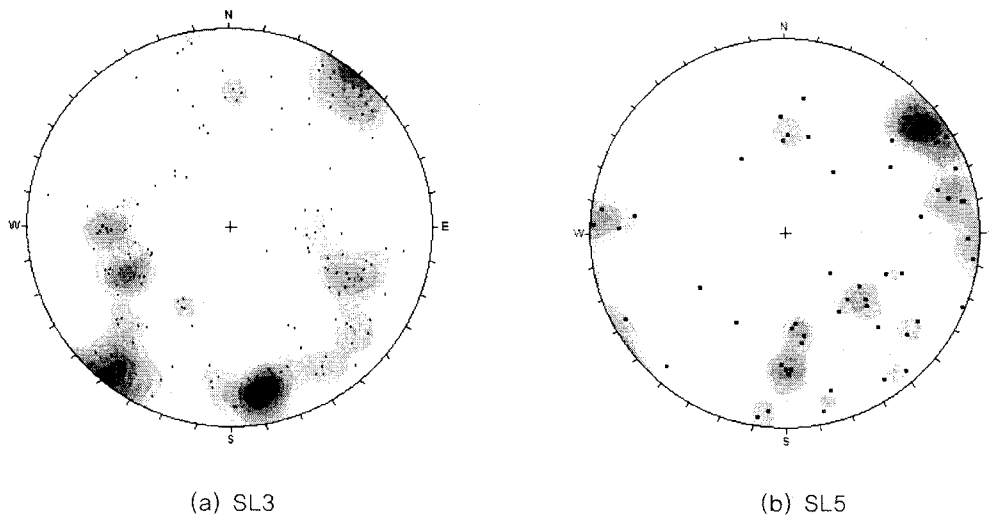


Fig. 2.3 Orientation distribution of joint sets on a lower hemispherical equal angle projection.

본 연구지역에서 실시된 조사선조사 자료를 바탕으로 개별 절리군의 절리 간격(spacing) 및 절리 크기(size)에 대한 분석결과가 Table 2.3 및 2.4에 각각 수록되어 있다. 절리 간격 및 semi-trace의

확률분포를 도출하기 위하여 Kolmogorov - Smirnov (K&S) 적합성 검증을 실시한 결과 음지수분포, 감마분포 및 대수정규분포가 모두 0.2 이상의 p값을 갖으며 절리 간격 및 semi-trace에 대한 이론적 확률분포로 모두 타당함을 나타내었다. 조사선 방향으로 산출된 절리 빈도(개수/m) 값에 조사선의 방향과 절리군의 평균 방향을 고려하여 절리군 평균 법선방향으로의 절리 빈도 값을 산정하였다. 또한 각 개별 절리군의 semi-trace를 사용하여 절리 크기에 대한 샘플링 오류(Priest, 1993)를 보정한 결과 평균 절리 크기는 SL3 및 SL5에서 각각 0.42m-0.93m 및 1.21m-1.76m 범위로 산정되었다.

Table 2.3 Mean spacings and linear frequencies along the scanline and mean normal vector directions for joint sets

(a) SL3

Joint Set No.	Observed mean spacing along scanline (m)	Corrected mean spacing along scanline (m)	Angle between scanline and MNV (°)	Corrected mean spacing along MNV (m)	1-D frequency along MNV direction
1	0.3565	0.3521	9	0.3521	2.84
2	0.4292	0.2462	55	0.2462	4.06
3	0.3477	0.1189	70	0.1189	8.41
4	0.3947	0.1350	70	0.1350	7.41

(b) SL5

Joint Set No.	Observed mean spacing along scanline (m)	Corrected mean spacing along scanline (m)	Angle between scanline and MNV (°)	Corrected mean spacing along MNV (m)	1-D frequency along MNV direction
1	0.9212	0.7056	40	0.7056	1.42
2	1.7683	1.3935	38	1.3935	0.72
3	3.2917	2.4074	43	2.4074	0.42
4	1.7583	0.6012	70	0.6012	1.661

Table 2.4 Summary of joint trace length analysis results

Scanline ID	Joint set no.	# of data	Mean(m)	Standard deviation(m)	Observed mean(m)	Corrected mean(m)
SL3	1	44	0.7241	0.24	0.7241	0.4154
	2	37	0.6324	0.31	0.6324	0.4906
	3	45	0.9851	0.37	0.9851	0.604
	4	39	1.4669	0.48	1.4669	0.9333
SL5	1	27	2.0556	1.29	2.0556	1.5534
	2	13	1.3154	1.04	1.3154	1.2101
	3	7	1.5714	0.59	1.5714	1.2944
	4	13	1.6154	1.51	1.6154	1.7639

2.3 삼차원 절리 연결망

본 연구에서는 절리의 형태를 원판으로 가정하여 삼차원 절리연결망을 모사하였다. 이를 위해 전절에서 분석한 방향성, 간격 및 크기 등의 기하학적 모수들과 관련된 3-D 절리 빈도를 산정하였으며, 여기에 절리 크기분포와 경험적 방향분포를 이용하여 통계적 3-D 절리연결망을 모사하였다. Fig. 2.4는 삼차원 절리연결망 모델 과정에 따른 절차를 나타내는 흐름도이다. Table 2.5는 본 연구에서 몬테칼로 모사기법에 의하여 생성된 절리의 공간적 위치와 방향 및 크기 등을 수록한 예이다.

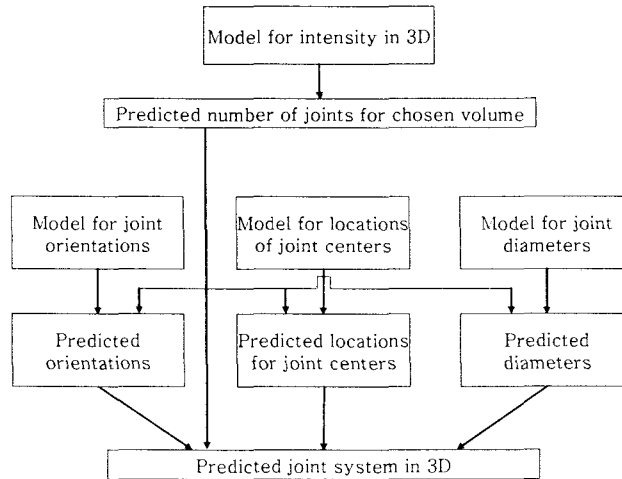


Fig. 2.4 Flow chart of the procedure used to stochastic joint geometry models.

Table 2.5 Generated fracture network in 3-D using the Monte carlo simulation

set No.	x	y	z	diameter	alpha	phi
1	0	0	0	2.59	82	85
1	0.08	0.48	1.66	0.66	84	66
1	4.41	9.52	7.91	1.63	62	64
-	-	-	-	-	-	-
2	0	0	0.08	2.76	20	73
2	0.48	1.66	4.41	1.29	21	84
2	9.52	7.91	0.85	2.13	5	86
-	-	-	-	-	-	-
3	6.69	3.61	6.33	0.35	30	48
3	6.08	4.12	1.71	1.34	28	48
3	0.08	0.5	4.21	2.26	342	60
-	-	-	-	-	-	-

3. 절리연결망 구조의 가시화

삼차원 절리연결망 모델을 바탕으로 암반사면의 삼차원 가시화모델을 개발하기 위해 사용된 삼차원 직교 좌표계(Three-Dimensional Cartesian Coordinate System)는 Fig. 3.1과 같다. 전장에서 언급하였듯이 절리연결망 모델에서 절리를 특정한 크기의 원판으로 가정할 때 원판 절리는 중심좌표와 절리의 직경 및 경사방향/경사로 구성된다. 이와 같이 모사된 절리들이 절취면과 교차할 때 나타나는 절리형태를 가시화하기 위해서는 각 원판절리의 방정식과 특정한 절취면의 방정식을 유도한 후 연립방정식의 해를 구해야 한다. 공간상에서 원판 절리를 정의하기 위한 원의 방정식은 구와 특정한 방향성을 갖는 평면의 교선으로 유도되어진다. 즉, 원의 방정식은 구와 특정한 방향성을 갖는 평면의 연립방정식으로 표현된다. Fig. 3.2는 구와 평면이 교차한 원판형 절리가 특정한 절취면과 교차하여 나타나는 트레이스를 기하학적으로 표현한 것이다.

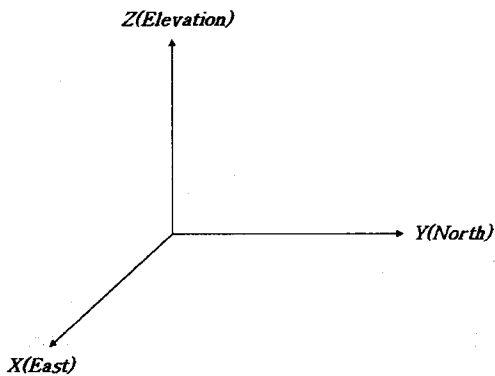


Fig. 3.1 Three-Dimensional Cartesian Coordinate System.

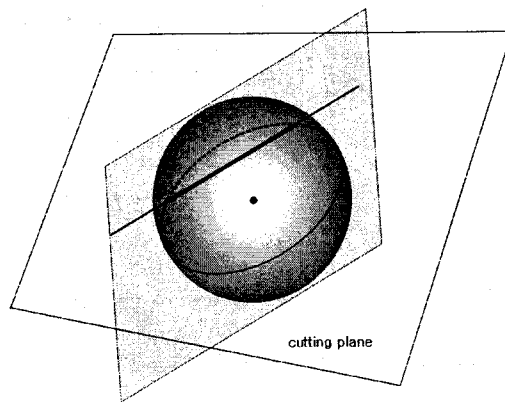


Fig. 3.2 Illustration of a circular joint trace intersected by a cutting plane.

원판 절리의 방정식은 구와 평면의 2개의 연립방정식이 필요하지만 절취면은 곡면이 아닌 평면으로 가정하여 하나의 평면식으로 나타낼 수 있다. 따라서 3개의 방정식을 연립하여 일반해를 구하면 절취면에 나타나는 절리 트레이스의 양 끝점의 공간좌표를 산정할 수 있다. 이와 같은 비선형 연립방정식의 해를 구하는 과정에서 절취면과 절리면이 평행한 경우 및 일치하는 경우에는 연산 과정을 수행할 수 없는 경우가 존재할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 경우 특이해로 분류하고 각각의 경우에 맞는 해를 유도하였다.

비선형 연립방정식을 통해 무한 절취면에 나타나는 불연속면 트레이스의 좌표를 얻을 수는 있지만 사면의 제원에 따른 절리형태의 가시화를 위해서는 절취면의 다양한 형태와 범위를 지정해야 한다. 실제 절취사면의 제원에 따라 다양한 형태와 범위를 가지는 절취면의 형태를 지정함으로써 절취면 또는 사면 횡단면에 나타나는 불연속면 트레이스를 효과적으로 가시화할 수 있다. 본 연구에서는 실제 절취면이 여러 개의 직선으로 이루어진 다각형의 형태라고 가정하고 가시화영역의 경계에 해당하는 경계선의 방정식을 추가하여 가시화영역의 외부 트레이스를 제거시키는 방법을 사용하였다. Fig. 3.3은 5개의 직선으로 이루어진 사면 횡단면을 나타낸 가시화 영역이다.

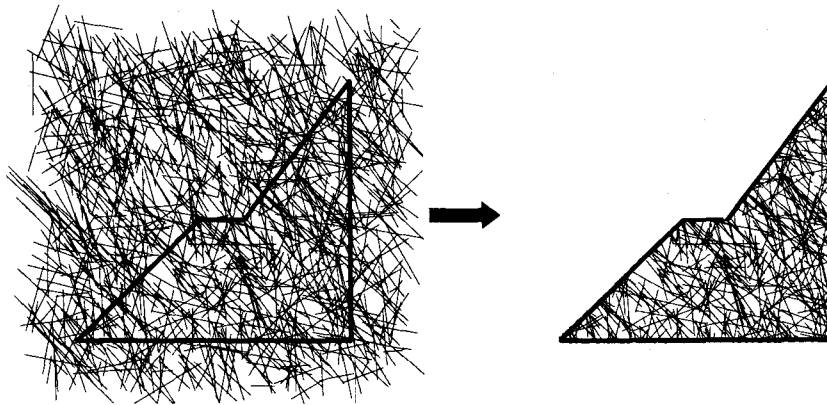


Fig. 3.3 Visualization domain in joint network model.

삼차원 공간상에서 생성된 절리연결망이 다면체의 가시화 영역과 교차하여 형성하는 절리선 구조를 파악하기 위해서는 다면체를 구성하는 직선 개수만큼의 경계선식이 필요하다. Fig. 3.4는 SL3 및 SL5에서 $10\text{m}\times 10\text{m}\times 10\text{m}$ 의 육면체에 생성된 삼차원 절리연결망에 대하여 $5\text{m}\times 5\text{m}\times 5\text{m}$ 의 육면체 및 다면체 영역을 지정하는 경계선식을 적용하여 절리선 구조를 가시화한 것이다.

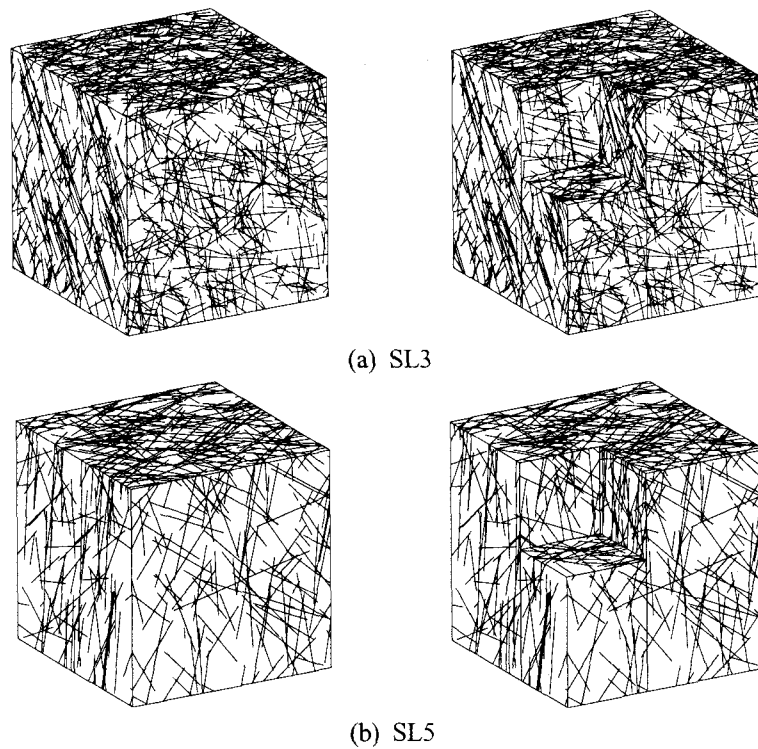
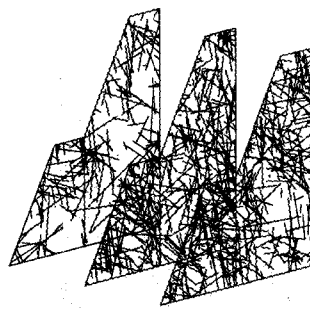
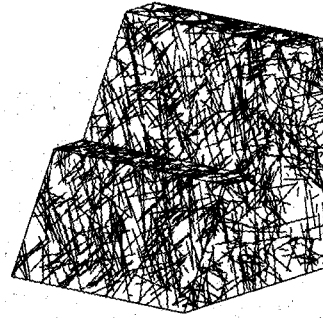


Fig. 3.4 Fracture network models on the polyhedral visualization domains for each scanline.



(a) Vertical domains(090/90)

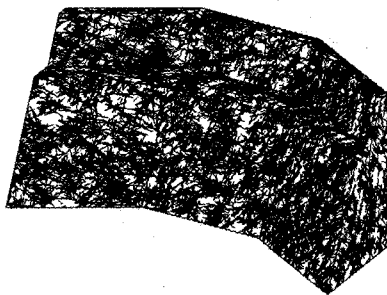


(b) Three dimensional domain

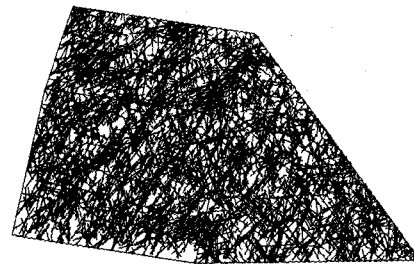
Fig. 3.5 The fracture network models on vertical and 3D domains of double bench slope at the SL3.

Fig. 3.5는 $5m \times 5m \times 5.2m$ 의 삼차원 절리연결망에서 절취면(60/180)과 1m의 소단을 포함하는 사면 형태에 대한 절리구조 가시화모델이다. Fig. 3.5(a)는 소단을 포함하는 사면의 횡단면에서 나타나는 절리연결망 구조를 가시화 하였으며, Fig. 3.5(b)는 삼차원 상에서 소단을 포함하는 사면 형상에 대한 절리선 구조를 나타내고 있다.

이와 같이 절취사면의 제원에 따른 가시화영역을 구성하기 위해서는 평면식과 경계선식을 사용해야 하지만 현장마다 다른 다양한 형태의 가시화영역에 대한 영역지정 방정식을 연구자가 일일이 지정하는 것은 편리하지 않으며, 본 연구에서는 가시화 영역의 모서리 좌표를 입력하면 가시화 영역을 전산 프로그램 내부에서 자동으로 설정하도록 전산화 하였다. Fig. 3.6은 연구지역의 각 조사선 조사지역에 설계된 절취사면에 대한 특징적인 사면형상과 절리선 구조를 가시화한 것이다. Fig. 3.6(a)는 연장 30m의 SL3 지역 사면으로 소단을 포함하고 있으며 꼭각형태로 이루어진 사면(Fig. 2.1)이다. 여기서는 3개의 경사방향을 갖는 평면을 연결하여 꼭각형태를 단순화하였으며, 소단상부의 절취면도 같은 방법을 사용하여 가시화 하였다. Fig. 3.6(b)는 연장 30m의 SL5 지역 사면의 우측 일부분으로 절취면 상부가 하부보다 완만하며 우측으로 사면고가 감소하는 형태(Fig. 2.2)이다. 여기서는 경사방향과 경사를 달리하는 4개의 절취면을 가시화 영역으로 하여 절리선 구조를 구현 하였다.



(a) SL3



(b) SL5

Fig. 3.6 The fracture network visualization models for cut slopes of the study area

4. 절리암반 가시화모델을 통한 사면안정성 검토

평사투영해석 결과 SL3 및 SL5 지역은 평면파괴의 가능성이 존재하는 것으로 나타났다(Fig.

4.1). 특히, SL3 지역은 사면경사가 45°이상인 경우 절리군 2에 의한 평면파괴의 위험성이 매우 높은 것으로 해석된다. Fig. 5.2는 사면 경사에 따른 평면파괴의 규모 및 양상을 고찰하기 위하여 SL3 지점에서 절취면 횡단면을 가시화 영역으로 적용한 결과이다. 여기서 굵은 선으로 표시된 절리 트레이스는 평면파괴의 위험이 있는 절리군 2에 해당하는 절리이다. Fig. 5.2(a) 및 (b)는 각각 사면경사가 1:0.5 및 1:1인 경우의 절리 연결구조를 가시화한 것으로 절리군 2에 해당하는 절리 트레이스로 인한 파괴 규모 및 양상을 쉽게 인지할 수 있으며 사면경사를 완화하였을 때 안정성을 유지하는 것을 가시화를 통해 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5.2(c) 및 (d)와 같이 소단을 포함하는 가시화모델에서도 사면경사가 완화됨에 따라 평면파괴의 위험성이 낮아짐을 확인할 수 있다.

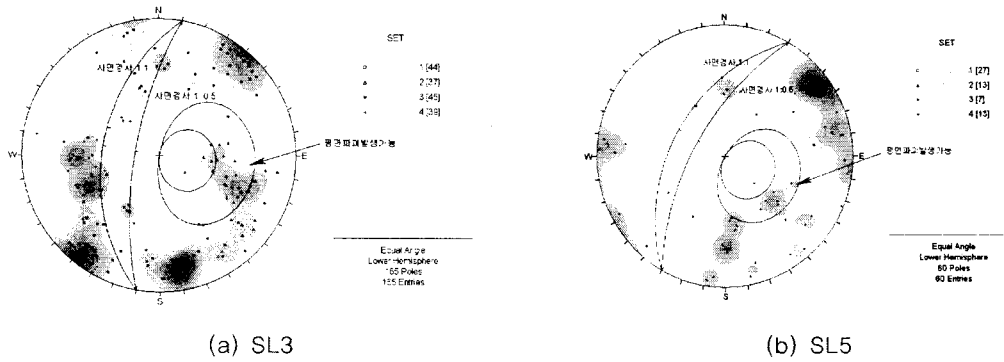


Fig. 4.1 Kinematic tests for plane sliding.

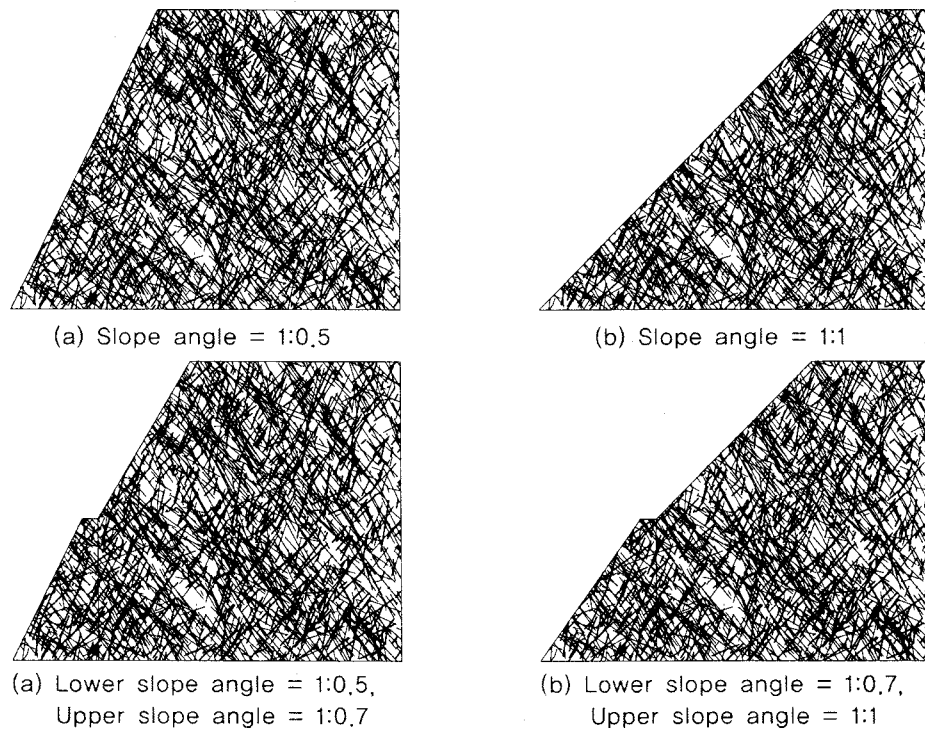


Fig. 4.2 Joints lead to plane failure at the SL3.

5. 결 언

본 연구에서는 현장에서 조사된 절리의 방향, 간격 및 길이분포를 바탕으로 절리암반의 통계적 삼차원 절리연결모델을 구현하고, 절취사면의 제원에 따른 절리연결구조에 대한 가시화모델을 개발하여 전산화하였다. 절리의 연결구조를 통계적 과정으로 모사하기위해서 기존의 연구방법인 몬테칼로 기법을 이용하였으며, 모사된 절리연결구조의 삼차원적 가시화를 위해서 원판으로 가정된 개별절리면의 평면식과 절취면의 평면식에 대한 비선형 연립방정식의 해를 유도하고 연산과정을 수행하는 전산프로그램을 개발하였다. 개발된 삼차원 절리암반 가시화모델의 현장 적용성을 고찰하기 위하여 평면파괴의 가능성이 존재하는 사면구간에 대해 절취사면의 제원에 따른 삼차원 절리암반 가시화모델을 구현한 후 파괴양상 및 규모를 고찰한 결과 개발된 가시화모델이 파괴양상을 효과적으로 반영함으로써 통계적 절리 연결구조를 고려한 안정성 해석에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 도출된 삼차원 절리암반 가시화모델은 차후 확률론적 키블록 안정성해석을 위한 핵심요소로 사용될 수 있을 것으로 기대되며 이에 대한 후속연구가 이루어질 것이다.

■ 참고문헌 ■

1. Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, 473 p.
2. Priest, S. D. and Hudson, J., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline survey, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 18(3), pp. 183~197.
3. Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N. and Stephansson, O., 1993, Joint network modeling including a validation to an area in Strip mine, Int. J. Rock Mechanics & Min. Sci., In press, pp. 503~526.
4. Kulatilake, P. H. S. W., Chen, J., Teng, J., Shufang, X. and Pan, G., 1996, Discontinuity geometry characterization in a tunnel close to the proposed permanent shiplock area of the three gorges dam site in China, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 33(3), pp. 255~277.
5. Kulatilake, P.H.S.W., J. Um, M. Wang and R.F. Escandon, 2003, Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East tunnel site, California, USA, Engineering Geology, 70, pp. 131-155.
6. Shanley, R. J. and Mahtab, M. A., 1976, Delineation and analysis of centers in orientation data, Mathematical Geology, 13, pp. 9~23.
7. Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M., 1984. A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics. Proc. of the 25th U.S. Symp. on Rock Mech., 495-502.
8. Fisher, R., 1953, Dispersion on a sphere, Proceedings, Royal Society of London, A217, pp. 295~305.
9. Kulatilake, P. H. S. W., Wu, T. H. and Wathugala, D. N., 1990, Probabilistic modelling of joint orientation, International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 14, pp. 325~350.

10. Wang, M., Kulatilake, P. H. S. W., Um, J. G. and Narvaiz, J., 2002, Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(7), pp. 887~904.