

3차원 스캐닝을 활용한 사면의 안정성 평가 및 대책공법수립 Establishment of remedial methods and evaluation of slope stability using 3D scanning

임은상¹⁾, Eun-Sang Im, 김범주¹⁾, Bum-Joo Kim, 오석훈²⁾, Seok-Hoon Oh, 임정열¹⁾, Jeong-Yeul Lim, 김영경³⁾, Young-Kyung Kim

¹⁾ 한국수자원공사 선임연구원, Senior Researcher, Dam Engineering Research Center, KOWACO

²⁾ 한국수자원공사 책임연구원, Chief Researcher, Dam Engineering Research Center, KOWACO

³⁾ 한국수자원공사 연구원, Researcher, Dam Engineering Research Center, KOWACO

SYNOPSIS : In this study, a 3D laser scanner is applied to evaluate of the stability of rock slope and to establish a adequate counter-method. From 3D scanning results, three dimensional digital data of rock slope is acquired, and then it is investigated for the engineering properties of discontinuities in rock mass. On the base of the result, we carry out the analysis of slope stability using the methods of the stereographic projection. In particular, the use of a 3D laser scanner is powerful about the slope on which person is difficult to approach because we can obtain the informations of discontinuities from the 3D digital data.

Key words : 3D laser scanning, Slope stability, 3D digital data, Counter-method, Stereographic projection method

1. 서 론

암반사면의 안정성은 암반불연속면의 공학적 특성에 지배된다고 할 수 있지만, 파괴의 위험성을 가지고 있는 암반사면은 접근성이 좋지 않는 사면이 대부분이기 때문에 주향/경사 등의 불연속면에 대한 정보를 취득하기가 쉽지 않다. 이러한 사면에 대해서는 3차원 스캐너를 이용하여 그 안정성 검토하는 것이 아주 유용하다고 할 수 있다. 즉 암반사면의 불연속면을 직접 측정하는 방법이 아니라 원거리에서 암반사면의 3차원 디지털 정보를 획득한 후에 실내에서 이 스캐닝 데이터를 분석하여 각 불연속면에 대한 정보를 측정함으로써 현장 여건의 제약을 받지 않고(현장 접근성 한계 극복) 전체 사면의 다양한 불연속면에 대한 정보를 비교적 빠른 속도로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이와 같이 획득된 정보를 바탕으로 평사투영법을 이용하여 암반사면의 위험성을 검토하였으며 적절한 대책공법을 수립하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 3D 레이저 스캐닝의 원리

2.1 개요

3차원 Laser Scanner는 상대적으로 짧은 시간 안에 대상물체 표면의 수많은 측정점들(point-cloud)의 3차원 공간 좌표로 기록된다. 이를 완성하기 위해서는 물체 표면위에 laser beam을 투사해야 한다. 이

러한 scanning 효과는 일정량 굴절각의 증분에 따른 하나 또는 두 개의 mirror를 사용하여 수행된다. 또한, 물체의 완전한 3차원 측정의 적용범위를 달성하기 위해 회전하기도 한다. 물체에 투사된 레이저 point의 위치를 결정하는 것은 거리와 각이므로 각 결정의 높은 정밀도는 매우 중요하다. 레이저 스캐닝의 주요 측정 방법은 다음과 같으며 본 연구에서는 Time of Flight Method가 이용되었다.

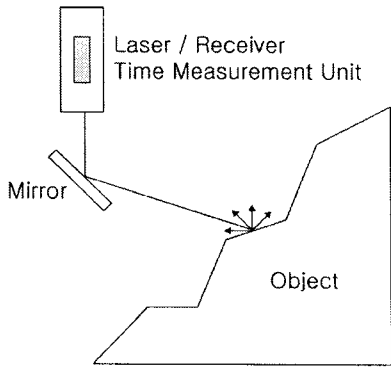


그림 1. Time-Of-Flight Method

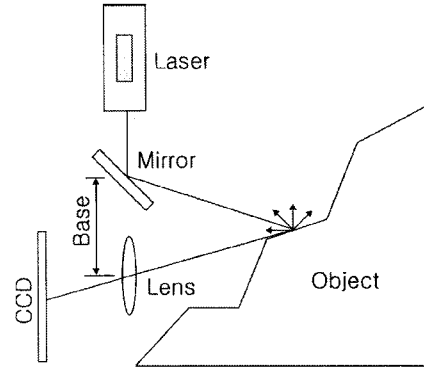


그림 2. Triangulation Method

2.2 Time-Of-Flight Method(TOF)

Time-Of-Flight 또는 ranging 으로 불리는 스캐너는 대상물체로 레이저 빔을 보내는 레이저 diode가 장착되어 있다. 레이저 광은 표면에서 반사되어 일부가 receiver로 되돌아온다. 이 방법은 광삼각법보다 먼 거리를 측정할 수 있다. 그러나 정확도가 다소 떨어질수 있다. 정확도는 몇 mm에서 2~3cm이며 대상물체와 스캐너 사이의 거리에 의존한다.

대부분의 레이저 스캐너가 이 방법을 사용하고 있으며, 시간차를 사용하므로 측정시간도 상당히 단축되는 장점을 가지고 있다.

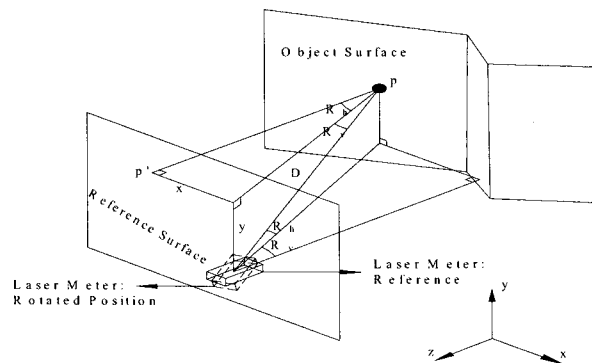


그림 3. Schematic of the time-of-flight principle.

$$R_{TOF} = c \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

여기서, c : 빛의 속도, τ : laser pulse 전파 시간

레이저가 반사되어 돌아오는 시간을 계산하여 거리를 결정하고 R_h 와 R_v 각도만큼 수평, 수직으로 회

전하여 측정된 점 p 치를 결정하는 방법으로서, 다음과 같이 삼각함수 계산에 따라 정의 될 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= D \times \sin(R_h) \\ y &= D \times \sin(R_v) \\ z &= D \times \cos(R_v) \times \cos(R_h) \end{aligned} \quad (2)$$

본 연구에서는 이 방법을 이용한 프랑스 MENSIS의 GS-200을 사용하였다. 이 장비는 1초당 최대 5,000 포인트를 측정, 300m의 측정거리, 360°(H)×60°(V) 측정범위를 갖고 1mm~6mm의 정확도(accuracy)와 1mm~3mm 정밀도(resolution)를 갖고 있다.

3. 대상 암반사면의 3D 스캐닝 및 안정성 해석

3.1 대상사면의 개요

A암반사면은 지질학적으로 반상변정화강암질편마암으로 구성되어 있으며 대부분 중립 내지 조립질의 암회색을 띠나 부분적으로 세립질의 암녹색을 띠며 그림 4와 같으며 전체 사면 및 일부 절리 및 파쇄대가 발달한 취약부 사면에 대하여 크게 세 구간으로 구분하여 조사를 수행하였다.

또한, B암반 사면은 그림 5에서 보는 것과 같이 급경한 경사를 이루고 있어서 보강의 차원에서 옹벽이 설치되고 있는 상황이며 좌측과 우측의 절리 방향이 달라서 쇄기파괴의 가능성이 보이고 약 15m부근에서 낙석의 흔적도 관찰되었다. 그림 4. A 암반사면의 조사구간 그림 5. B 암반사면의 스캐닝광경

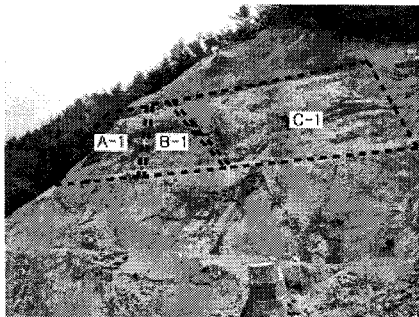


그림 4 A 암반사면의 조사구간

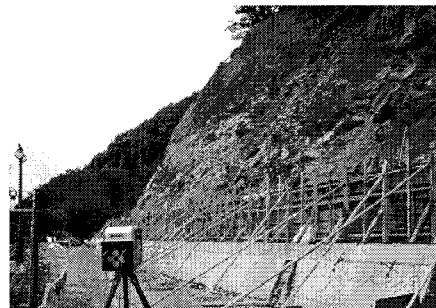


그림 5 B 암반사면의 스캐닝광경

3.2 3D 스캐닝 결과

각 암반사면에 대한 3차원 레이저 스캐닝 결과(그림 6, 7)와 취득한 사면 point 데이터를 이용하여 3차원 모델링을 수행한 결과는 그림 8, 9와 같다.

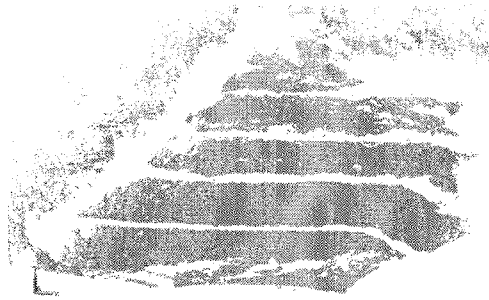


그림 6. A 암반사면의 스캐닝 결과

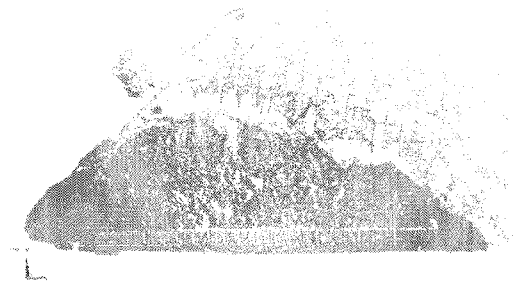


그림 7. B 암반사면의 스캐닝 결과

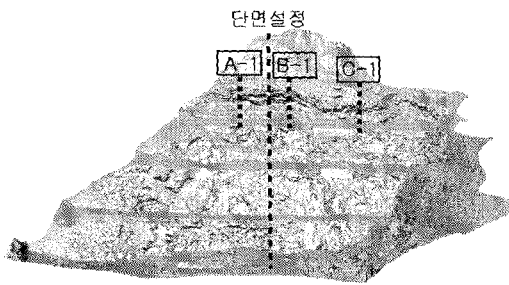


그림 8. A 암반사면의 모델링 결과 및 해석단면

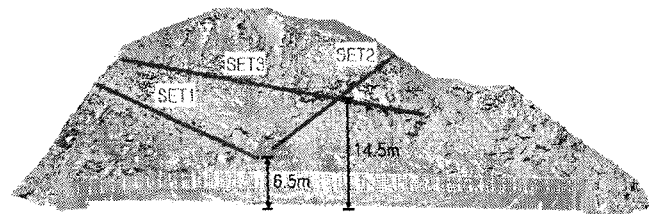


그림 9. B 암반사면의 모델링 결과 및 주절리

3.3 평사투영법에 의한 사면의 안정성 해석

대상사면에 대한 안정성 분석은 우선적으로 3차원 레이저 스캐닝 결과 취득한 사면 불연속면들에 대한 주향과 경사 기록을 이용하여 평사투영해석을 실시하였고, 평사투영해석 결과 예상되는 사면파괴 형태에 대하여 한계평형해석을 실시하여 사면의 안전율을 계산하고 사면 안정성 여부를 판단하였다.

A 암반사면의 경우에는 전체사면과 취약부 사면인 조사구간(그림 4 참조)에 대하여 평사투영해석을 수행하였다. 전체사면 중 취약부 사면을 제외한 부분에서 일부 평면파괴 가능성이 나타나고 있으나, 이는 절취과정에서 나타난 불연속면을 채취하여 분석하는 과정에서 나타난 것으로 파악되며 전체적으로는 안정한 상태를 유지하고 있는 것으로 판단되었다. 그러나 취약부 사면에 대한 평사투영 해석결과는 조사 구간의 모든 사면에 대하여 평면파괴 가능성이 높은 것으로 나타났으며 C-1 구간에 대해서는 썩기 파괴 가능성도 존재하는 것으로 나타났다.

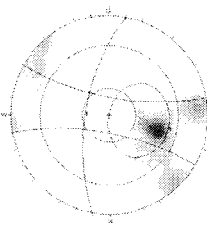
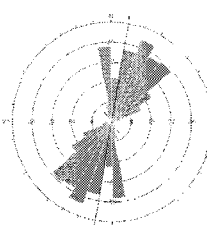
위치	전체 사면	경사/경사방향	63/280
평면·전도			
Rosette plot			
해석 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 평면파괴 가능성 존재 		

그림 10. 전체 사면에 대한 평사투영해석결과

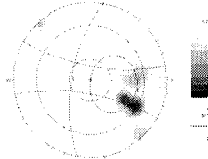
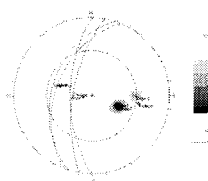
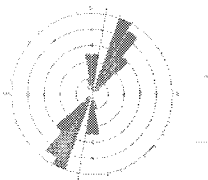
위치	A-1	경사/경사방향	63/280
평면·전도			
썰기			
Rosette plot			
해석 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 평면파괴 : ○ • 전도파괴 : × • 썰기파괴 : × 		

그림 11. A-1 구간에 대한 평사투영해석결과

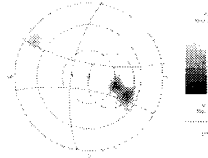
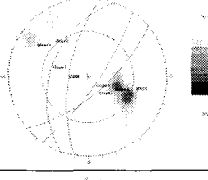
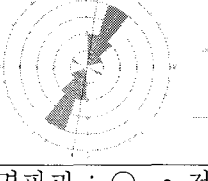
위치	B-1	경사/경사방향	63/280
평면·전도			
썰기			
Rosette plot			
해석 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 평면파괴 : ○ • 전도파괴 : × • 썰기파괴 : × 		

그림 12. B-1 구간에 대한 평사투영해석결과

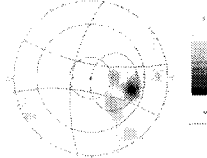
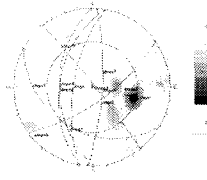
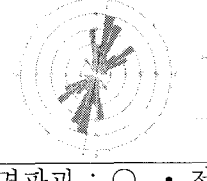
위치	C-1	경사/경사방향	63/280
평면·전도			
썰기			
Rosette plot			
해석 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 평면파괴 : ○ • 전도파괴 : △ • 썰기파괴 : ○ 		

그림 13. C-1 구간에 대한 평사투영해석결과

B 암반사면의 경우에는 전체사면의 60/150(경사/경사방향)에 대하여 62/135(SET1), 46/192(SET2), 상부에 설치된 망 때문에 경사/경사방향을 정확히 추출할 수 없었던 3개의 주절리가 발견되었고(그림 9 참조) 평사투영해석결과, 그림 14에서 보는 것과 같이 쉐기과파의 위험성이 있는 것으로 나타났다.

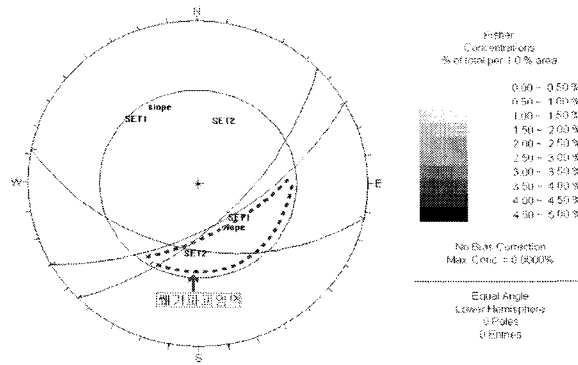


그림 14. B 암반사면의 평사투영해석 결과

4. 대상 암반사면에 대한 대책공법

4.1 A 암반사면에 대한 대책공법

사면 안정성 해석결과, 취약부 사면 전 구간(A-1, B-1, C-1)에 걸쳐 평면과파 가능성이 높은 것으로 나타나 이에 대한 대책이 필요한 것으로 판단되나 취약부 사면 이하의 사면들에 대하여는 암반의 상태가 매우 신선한 화강암으로 분포하고 불연속면이 발달하지 않아 현 상태에서 안정상의 문제는 없을 것으로 사료되었다.

취약부 사면에 대한 보강대책으로는 크게 1) 평면활동이 예상되는 불안정한 암괴들을 제거하여 사면 경사를 완화시키는 방법과 2) 불안정한 부분에 대하여 Rock bolt 등의 보강재를 시공하여 사면을 안정화 시키는 방법이 있으나, 현재의 현장 여건상 1)의 방법을 적용하기에는 장비 진입의 어려움 등이 예상되어 그림 15와 같이 2)안을 적용하여 사면을 보강하는 방법을 추천하였다.

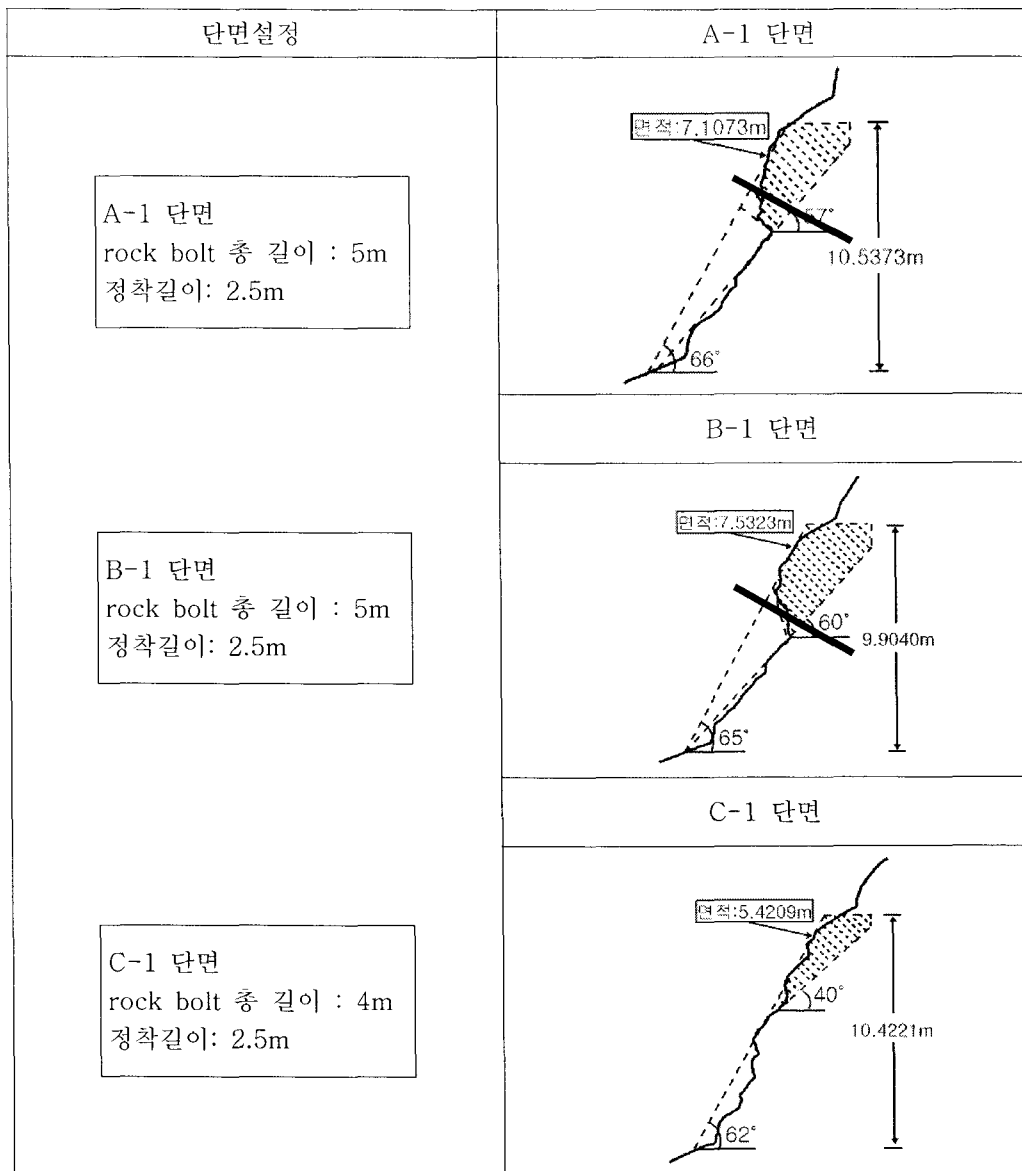
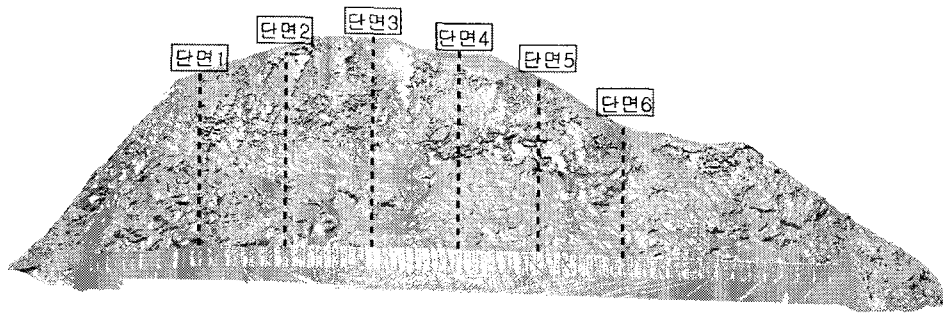


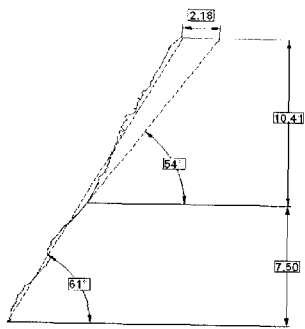
그림 15. Rock bolt 설치 개요도

4.2 B 암반사면에 대한 대책공법

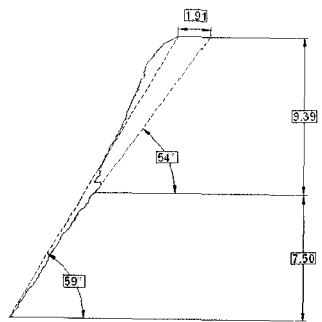
이 암반사면의 보강대책으로서 사면상부를 절취하는 절취공이 적절한 대책공법으로 판단되어진다. 즉, 그림 16에서처럼 사면높이 12m에서 경사 54°이하가 되도록 사면의 상부를 절취하면 그림 17에서 보는 것과 같이 파쇄파괴의 발생가능성이 없어짐을 확인할 수 있었으며 이 경사는 건설교통부의 리핑암(풍화암)의 경사기준인 1:0.7 (55°)에 해당한다.



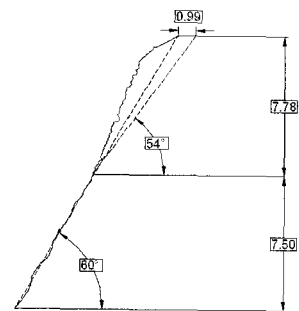
(a) B 암반사면에 대한 단면 설정



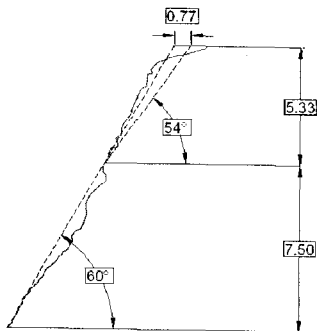
(b) 단면 1



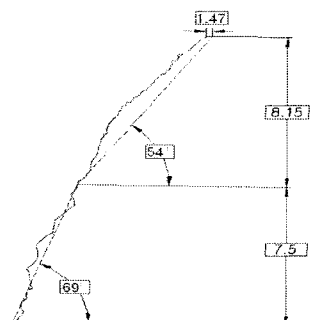
(c) 단면 2



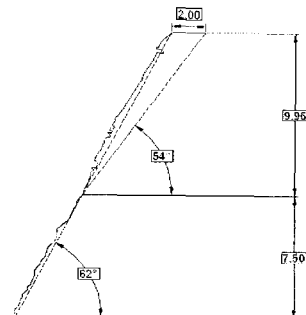
(d) 단면 3



(e) 단면 4



(f) 단면 5



(g) 단면 6

그림 16. B 암반사면의 절취단면

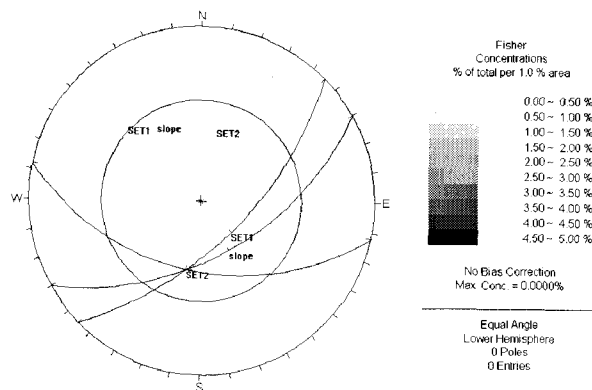


그림 17. 절취후의 평사투영해석 결과

5. 결 론

본 연구에서는 3D 레이저 스캐너를 활용하여 사면의 안정성을 해석하고 그 대책공법에 대한 검토를 수행하였다. 원거리에서 측정이 가능한 3D 레이저 스캐너를 이용함으로써 사람이 접근하기 힘든 사면에 대한 3차원의 디지털 데이터를 획득하여 보다 정확하고 다량의 불연속면에 대한 정보를 획득할 수 있었다. 이렇게 획득한 정보를 활용함으로써 보다 정확한 안정해석을 수행할 수 있고 안정성이 확인되지 않은 사면에 대해서는 적절한 대책공법에 선택하고 검증하여 보다 합리적인 판단을 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Giani, G. P.(1992), *Rock Slope Stability Analysis*, p.361, A.A.Balkema.
2. Jeon, Je-Sung(2003), "Influence of Weak Ground Ahead of the Tunnel Face on 3D-displacement and Face Extrusion", 한국지반공학회논문집 제 19권 6호, p.189-190.
3. John A. Hudson and JohnP. Harrison, *ENGINEERING ROCK MECHANICS*, Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London, UK.
4. Romana, M. R.(1993), "A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating", *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. 3-II, pp575-599.
5. Vollmer, J., Mencl, R. and Muller, H.(1992), "Improved laplacian smoothing of noisy surface meshes," In *Computer Graphics Forum(Proc. Eurographics)*, Vol. 26, pp. 55-64.
6. 홍성균, 김연술, 이회관, 김형찬, 양균(2003) "레이저 스캐너를 이용한 측정 및 레지스트레이션시 오차감소에 관한 연구" 한국정밀공학회지 제20권 제9호.