

신뢰도에 근거한 암반사면의 최적설계 Reliability-Based-Optimization for Rock Slopes

이명재, MYUNG-JAE LEE*¹, 이인모, IN-MO LEE*²

*1 (주) 경호기술단 토질부 부장 Manager, Dept. of Geotechnical Eng., Kyung-Ho Eng. Co., Ltd.

*2 고려대학교 토목환경공학과 부교수 Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

SYNOPSIS : This paper concerns the analytical method of the RBO(Reliability-Based-Optimization) for rock slopes. A reasonable assessment of the rock slope stability needs considering uncertainties of discontinuity characteristics and evaluating the multi-failure modes : the plane failure, wedge failure and toppling failure. The case study shows that the optimum direction and cutting angle can be successfully evaluated by the RBO method for a rock slope using the risk map of failure probability

1. 서론

암반사면의 파괴형태는 불연속면과 굴착면의 방향에 따라 크게 평면파괴, 쐐기파괴 및 전도파괴(Toppling Failure) 등으로 분류된다. 암반내 불연속면의 방향, 빈도, 투수성 및 강도 등의 공학적특성은 지질조건, 응력상태 및 조사방법오차 등으로 인한 많은 불확실성을 내포하고 있다. 암반사면의 합리적인 안정해석을 위해서는 불연속면의 통계처리에 의한 신뢰도해석방법이 유용하나 암반사면의 여러 파괴형태(Multi-Failure Modes)를 합리적으로 고려한 최적설계는 여러 가지의 제약으로 인하여 실제 적용에 어려움이 있다.

암반사면의 여러파괴형태를 고려한 최적설계를 위해서는 불연속면의 방향 및 강도의 불확실성을 적절히 반영하면서 각각의 파괴형태에 대한 확률적인 파괴기준을 고려한 신뢰도에 근거한 최적화기법(Reliability-Based-Optimization)이 유용한 방법이다. 본 논문에서는 암반사면의 신뢰도에 근거한 최적설계를 위하여 암반 사면 안정해석은 불연속면의 방향 및 강도를 무작위변수로 고려한 Monte-Carlo Simulation으로 분석하였고 사면의 굴착량을 최소화하기 위하여 암반사면의 파괴형태 중 평면파괴, 쐐기파괴 및 전도파괴의 파괴확률 등가곡선을 작성하여 허용파괴 확률조건에 따라 굴착면의 방향 및 굴착각의 최적화 방법을 제안하고 예제해석을 통해 검증하였다.

2. 암반사면의 파괴형태 및 안정해석

암반사면의 파괴는 불연속면(Discontinuity)을 따라 발생하기 때문에 일반적으로 원형파괴(Circular Failure), 평면파괴(Plane Failure), 쐐기파괴(Wedge Failure) 및 전도파괴(Toppling Failure)의 네가지로 분류한다(Hoek & Bray, 1981). 본 논문에서는 평면파괴와 쐐기파괴는 벡터해석에 의한 블록이론(Goodman & Shi, 1985)을 이용하였으며 전도파괴는 Goodman (1980)의 경험식을 이용하였다. 원형파괴의 경우는 토사사면의 안정해석과 근본적으로 동일한 방법에 의해 검토되므로 제외하였다.

2.1 평면파괴와 썩기파괴

평면파괴와 썩기파괴 형태에서 불연속면으로 구성되는 블록은 유한성(Finiteness), 이동가능성(Removability) 및 안정성(Stability)에 따라 5가지의 형태로 분류되며(Goodman & Shi, 1985), 이동가능한 블록이 불안정할 때 키블럭(Key Block)으로 분류되고 파괴가 발생한다. 이동가능한 블록의 안정해석과정을 아래에 나타내었다.

평면파괴와 썩기파괴의 벡터해석을 위하여, 불연속면 i 의 법선단위벡터 \hat{n}_i 는 불연속면 i 의 경사(Dip, α_i)와 경사방향(Dip Direction, β_i)으로부터 식 (1)로 정의된다.

$$\hat{n}_i = (\sin \alpha_i \sin \beta_i, \sin \alpha_i \cos \beta_i, \cos \alpha_i) \quad (1)$$

불연속면과 굴착면으로 구성된 블록이 이동 가능하면, 한계평형 법칙에 의한 안정해석을 통하여 Key 블록을 찾는다. 경사면에 놓은 블록 B에 작용하는 힘들을 그림 1.에 도시하였다.

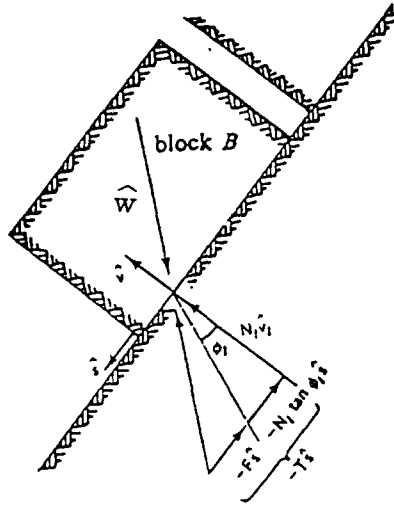


그림 1. 마찰력과 활동방향벡터

활동면의 반력의 법선성분(N)은

$$N = \sum N_l \hat{v}_l, \quad N_l \geq 0 \quad (2)$$

여기서, \hat{v}_l : 면 l 의 블록 B로 향한 법선단위벡터

접선 마찰력의 성분(T)은

$$T_l = -N_l \tan \phi_l \hat{s} \quad (3)$$

$$T = \sum N_l \tan \phi_l + F \quad (4)$$

여기서, F : 지보력

ϕ_i : 면 l 의 마찰각

\hat{s} : 활동방향 단위벡터 ($\hat{s} \subset JP$)

힘의 평형을 고려하여 벡터로 표현하면,

$$\vec{w} + \sum N_l \hat{v}_l - T\hat{s} = 0 \quad (5)$$

여기서, \vec{w} : 블록 B에 작용하는 하중

안정해석 결과는 활동형태에 따라서 평면파괴와 쉐기파괴로 나눌 수 있으며, 활동형태별로 표 1.과 같이 산정 할 수 있다. 위 식들에 의해서 F(지보력)의 산정결과 지보력이 양(Positive)의 값을 가지면 Key 블록이며, 음(Negative)의 값을 가지면 Potential Key 블록이다.

표 1. 파괴형태별 활동방향벡터와 지보력

평면파괴	\hat{s}	$\frac{(\hat{n}_i \times \vec{w}) \times \hat{n}_i}{ \hat{n}_i \times \vec{w} }$
	F	$ \hat{n}_i \times \vec{w} - \hat{n}_i \cdot \vec{w} \tan \phi_i$
쉐기파괴	\hat{s}	$\frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{ \hat{n}_i \times \hat{n}_j } \text{sign}((\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \vec{w})$
	F	$\frac{1}{ \hat{n}_i \times \hat{n}_j ^2} [\vec{w} \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \hat{n}_i \times \hat{n}_j - (\vec{w} \times \hat{n}_j)(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \tan \phi_i - (\vec{w} \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \tan \phi_j]$

2.2 전도파괴 (Toppling Failure)

암반사면의 전도파괴는 인접한 암괴 나 암주 들의 전도(Overturning)에 대한 불안정으로 인해 발생하며 Goodman(1980)은 전도파괴 조건으로 굴착면과 암반내 절리면의 경사방향이 서로 반대방향(일반적으로 30° 이내)이고, 굴착각이 아래의 (6)식을 만족할 때 발생하는 것으로 제안하였다. 본 논문에서도 이 해석방법을 적용하였다.

$$\alpha > 90^\circ - \delta + \varphi : \text{Condition of Toppling Failure} \quad (6)$$

여기서, α = 굴착면의 굴착각

δ = 절리면의 경사각

φ = 절리면의 마찰각

3. 신뢰도에 근거한 암반사면의 최적설계

3.1 암반사면의 신뢰도해석

암반사면에서의 파괴의 정의로 본 연구는 Safety Margin 개념을 사용하였다.

$$\text{Safety Margin } M = R - Q \tag{7}$$

여기서, R : 활동에 대한 저항력 Q : 활동하중

활동에 대한 저항력이 활동하중보다 작은상태, 즉 $M < 0$ 인 상태를 파괴상태로 정의한다. 따라서 평면파괴와 쉐기파괴 형태는 지보력 F 값의 반대부호, 즉 $-F$ 값을 Safety Margin으로 정의하며, 전도파괴는 $(90^\circ - \delta + \varphi)$ 값을 R 로 α 를 Q 로 하여 Safety Margin을 정의하였다..

파괴확률은 그림 2.에서와 같이 $M < 0$ 부분의 비율인 식 (8)로 정의한다.

$$P_f = P (M=(R-Q) < 0) \tag{8}$$

여기서, P : Safety Margin M 의 확률

P_f : 파괴확률

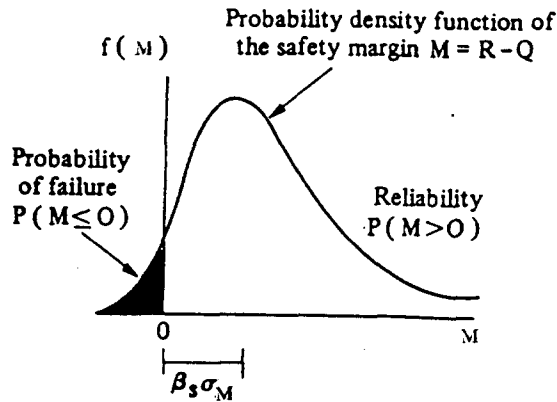


그림 2. 파괴확률

Safety Margin M 의 기대치 $E(M)$ 은 R 의 기대치 $E(R)$, Q 의 기대치 $E(Q)$ 에 의해 식 (9)로 표현된다.

$$E(M) = E(R) - E(Q) \tag{9}$$

3.2 MCS(Monte-Carlo Simulation) 방법

불연속면의 가장 중요한 특성은 불연속면 방향과 마찰각이다. 본 논문에서는 각 불연속면의 Clustering 과정을 통해 대표적인 Cluster를 산정하고 불연속면 방향의 평균치와 분산정도는 Fisher Distribution으로 가정하였으며, 마찰각은 정규 분포로 가정하였다.(Priest,1993 & 조성로,1995). 불연속면의 방향과 마찰각이 통계처리되면 이들 분포형으로 암반사면의 확률론적 해석이 수행된다. 본 연구에서는 불연속면 방향과 마찰각은 무작위 변수(Random Variable)로 고려하였고, 중력 등의 하중은 상수(Constant)로 가정하였다. 암반사면의 평면파괴, 쉐기파괴 및 전도파괴를 고려한 암반사면의 확률론적 해석은 Monte-Carlo Simulation에 의해 수행되었으며 그림 3.에 해석과정의 흐름도를 나타내었다.

3.3 파괴확률의 산정

MCS 방법에 의해 반복적으로 안정해석을 수행한다. Simulation 수행결과 파괴형태는 어느 불연속면 한 방향으로의 평면파괴나 두 불연속면의 교차선으로의 쉐기파괴, 혹은 전도파괴형태를 취한다. 평면파괴확률, 쉐기파괴확률 및 전도파괴확률은 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{p_i} = \frac{N_{p_i}}{N_t}, \quad P_{w_{ij}} = \frac{N_{w_{ij}}}{N_t}, \quad P_{t_i} = \frac{N_{t_i}}{N_t} \quad (10)$$

여기서 N_{p_i} : i면 평면파괴 빈도, $N_{w_{ij}}$: i & j면 쉐기파괴 빈도, N_{t_i} : i면 전도파괴 빈도

N_t : Monte-Carlo 해석 횟수

P_{p_i} : i 면 평면파괴 확률, $P_{w_{ij}}$: i & j면 쉐기파괴 확률($i \neq j$), P_{t_i} : i 면 전도파괴 확률

MCS 방법에 의해 반복 안정해석시 전체파괴확률은 각 반복단계에서의 합집합으로 식 (11)로 정의한다.

$$P_f = P_p \cup P_t \cup P_w \quad (11)$$

여기서, P_f : 전체파괴 확률, P_p : 평면파괴 확률, P_w : 쉐기파괴 확률, P_t : 전도파괴 확률

3.4 신뢰도에 근거한 암반사면의 최적설계

암반사면의 신뢰도에 근거한 최적설계는 그림 4.에 보인 바와 같이 절취면의 시공가능한 경사방향과 굴착각을 적절한 간격($5^\circ \sim 10^\circ$)으로 선택하여 불연속면의 방향 및 강도를 무작위변수로 고려한 Monte-Carlo Simulation으로 암반사면 안정해석을 수행한다. 사면의 굴착량이 최소화되도록 암반사면의 파괴형태 중 평면파괴, 쉐기파괴 및 Toppling 파괴의 파괴확률 증가곡선을 작성하여 암반사면의 중요도에 따른 허용파괴 확률조건에 따라 굴착면의 방향 및 굴착각의 최적치를 추정한다.

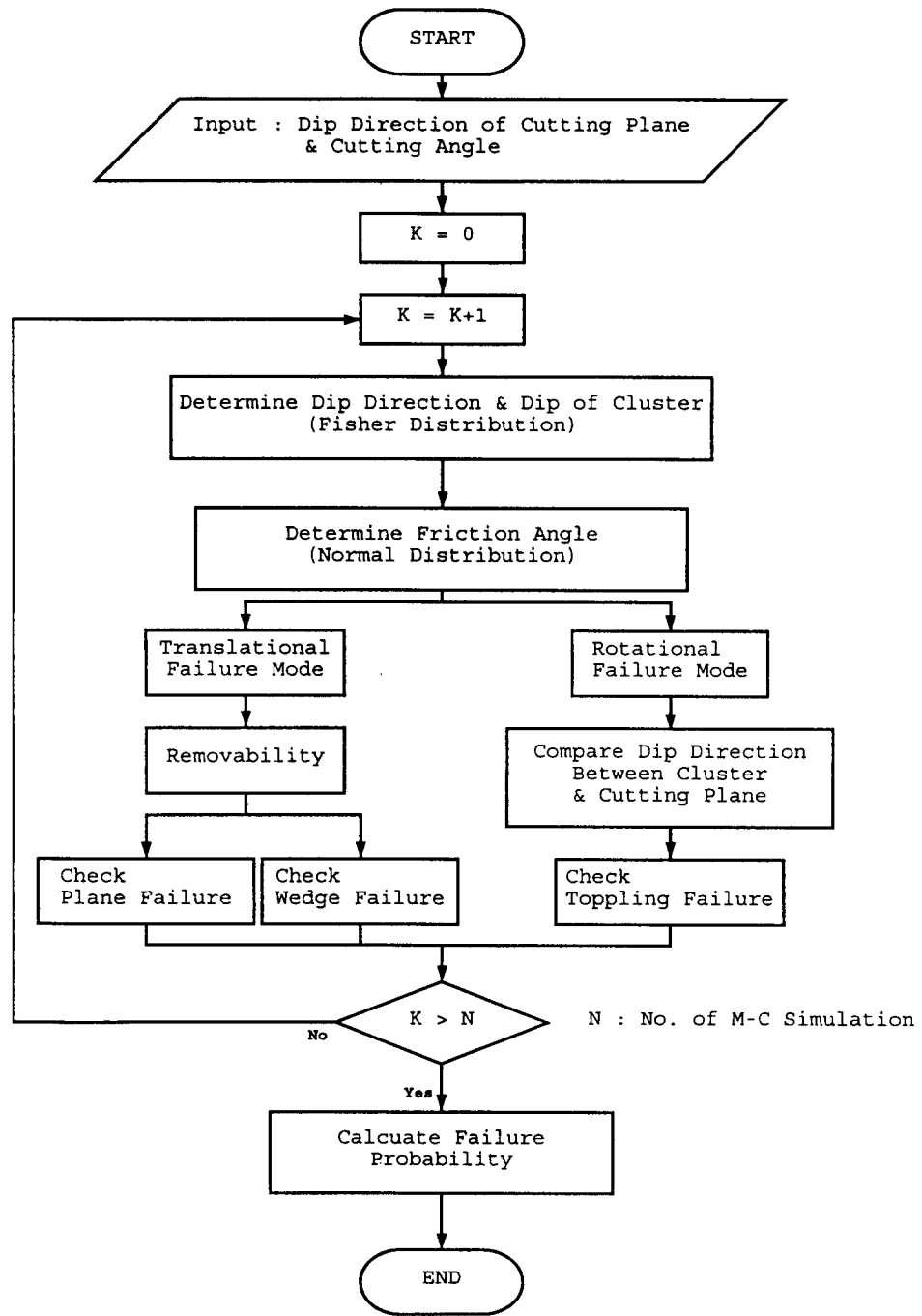


그림 3. 암반사면의 확률론적 해석 흐름도

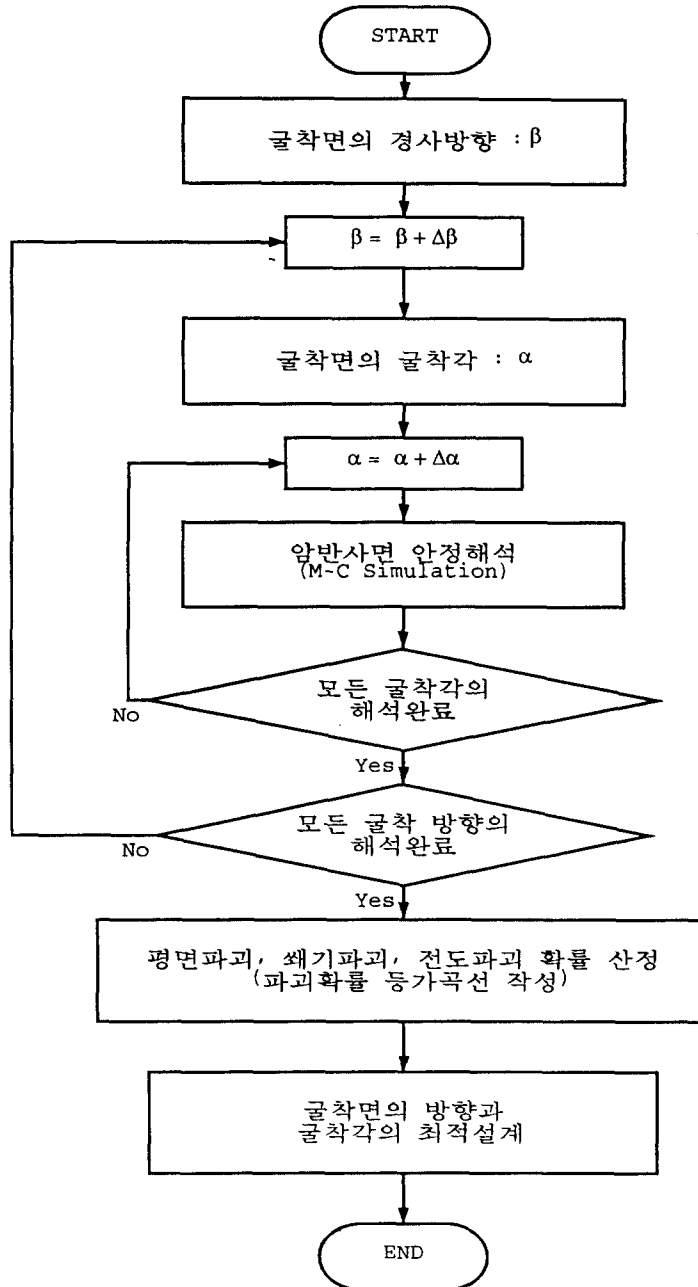


그림 4. 신뢰도를 고려한 암반사면의 최적설계

4. 예제 해석

4.1 조사결과

Scanline Survey에 의해 조사된 암반사면의 절리 방향을 표 2.에 나타내었으며(조성로,1995), 4종류의 Cluster Set로 분포하고, i Cluster를 구성하는 불연속면들의 경사와 경사방향의 평균치 ($E(\alpha_i, \beta_i)$) 및 Fisher's Constant K_i 를 나타내었다. 암의 종류는 편마암이며 Tilt Test와 Pullout Test, 불연속면 진단강도시험에 의해 구한 마찰각(ϕ)는 평균 30° 를 취하였고 $\tan(\phi)$ 의 변동계수인 $\Omega(\tan(\phi))$ 는 0.10을 가정하여 사용하였다.

표 2. 불연속면의 통계처리 결과

Cluster Set	경사/경사방향	K_i
1	45/90	71
2	42/125	51
3	66/222	53
4	52/241	74

4.2 굴착각에 따른 파괴확률분포

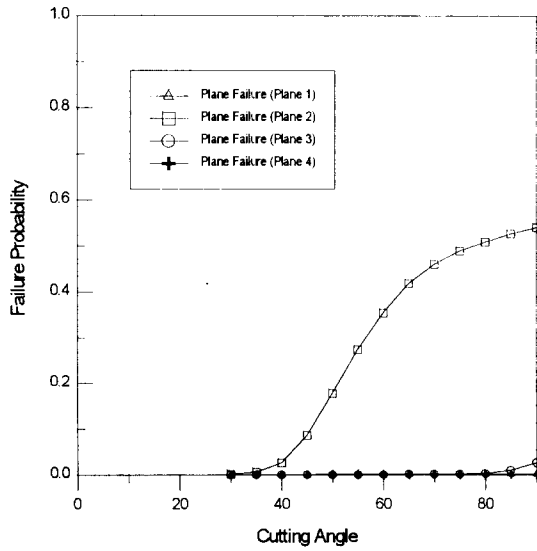
굴착면의 경사방향이 140° 인 경우 굴착각에 따른 파괴확률의 분포를 그림 5.에 나타내었다. 평면파괴는 그림 5.(a)에 보인 바와 같이 Plane 2의 파괴가 우세하며, 굴착각에 관계없이 전도파괴는 발생하지 않는다. 쉼기파괴는 Plane 2 & 3의 파괴가 우세하고, 굴착면의 경사방향을 140° 로 고정할 때 전체적인 안정이 쉼기파괴에 좌우된다. 허용파괴확률과 그림 5.(d)에 나타낸 전체파괴확률을 비교하여 최적의 굴착각을 선정할 수 있다.

4.3 굴착면의 방향에 따른 파괴확률

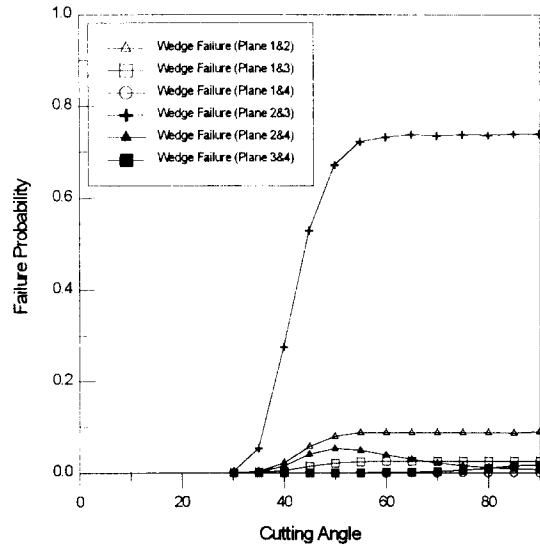
굴착각이 70° 인 경우에 굴착면의 방향에 따른 파괴확률의 분포특성을 조사하여 그림 6.에 나타내었다. 그림 6.(a)에 보인 바와 같이 굴착면의 경사방향이 $30^\circ \sim 150^\circ$ 범위에서는 Plane 1과 Plane 2의 평면파괴가 주로 발생하며, $200^\circ \sim 250^\circ$ 범위에서는 Plane 3과 Plane 4의 평면파괴가 발생한다. 쉼기파괴의 경우는 Plane 2 & 3의 쉼기파괴가 가장 우세하며 굴착면의 경사방향이 $50^\circ \sim 230^\circ$ 범위에서 주로 발생한다. 전도파괴는 굴착면의 경사방향이 $0^\circ \sim 90^\circ$ 범위에서 Plane 3와 Plane 4의 파괴형태가 가장 우세하게 나타난다. 그림 6.(d)에 보인 바와 같이 굴착각이 70° 인 경우 모든 파괴형태를 고려하면 굴착면의 경사방향을 $250^\circ \sim 360^\circ$ 범위로 선정하는 것이 가장 유리하다.

4.4 파괴확률의 증가곡선

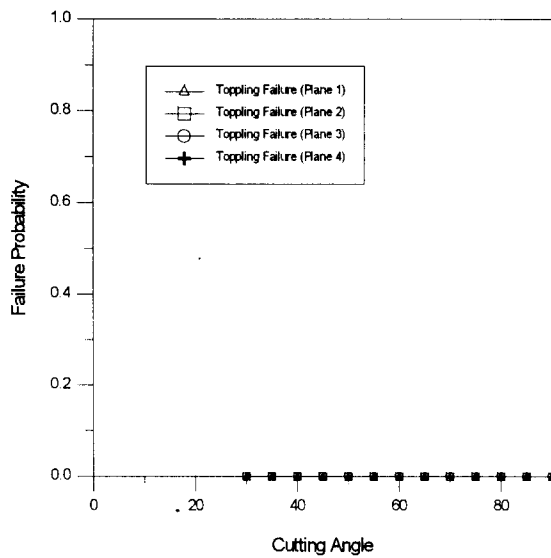
굴착면의 경사방향과 굴착각에 따른 각각의 평면파괴, 쉼기파괴 및 전도파괴의 파괴확률 증가곡선을 그림 7., 그림 8. 및 그림 9.에 나타내었다. 평면파괴의 경우 경사방향에 따라 파괴확률의 증가곡선의 변화폭이 크며 각 절리면의 경사방향을 중심으로 높은 파괴확률 분포경향을 보인다. 쉼기파괴의 경우는 2 & 3 절리면의 쉼기파괴 형태가 가장 우세하며, 다른 쉼기파괴의 파괴확률은 그리 크지 않다. 전도파괴의 경우는 굴착면과 절리면의 경사방향이 반대방향일 때 높은 파괴확률 분포 경향을 보인다. 굴착면의 경사방향과 굴착각의 최적설계는 그림 10.에 나타낸 전체파괴확률 증가곡선과 허용파괴확률의 크기를 비교하여 선정할 수 있다. 허용파괴확률을 0.1로 하면, 굴착면의 경사방향이 $0^\circ \sim 200^\circ$ 범위는 굴착각을 $40^\circ \sim 45^\circ$ 정도가 가능하며, 경사방향이 $250^\circ \sim 360^\circ$ 사이는 $60^\circ \sim 70^\circ$ 정도의 굴착각으로 설계가능하다.



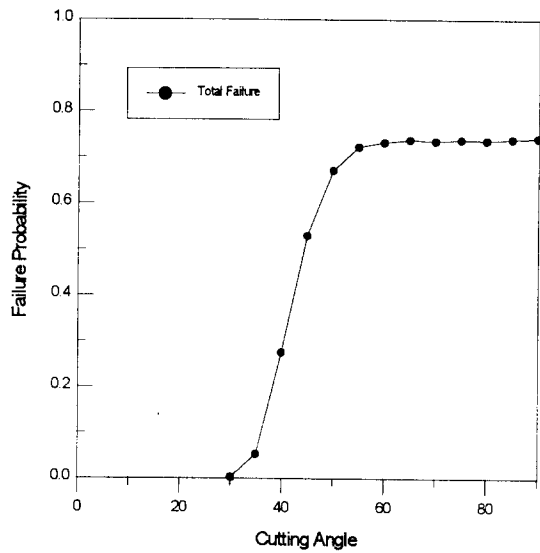
(a) 평면파괴



(b) 쐐기파괴

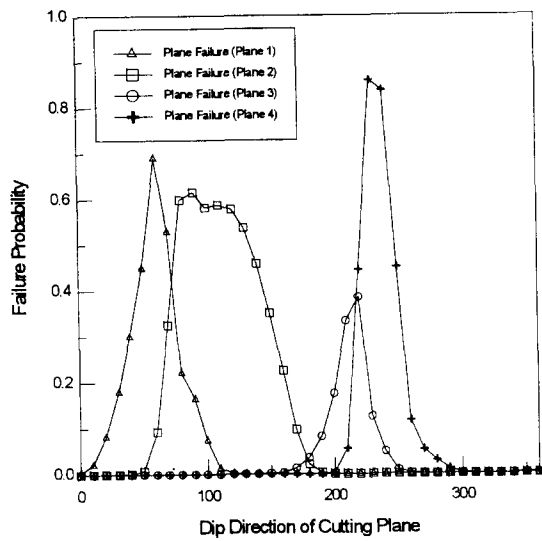


(c) 전도파괴

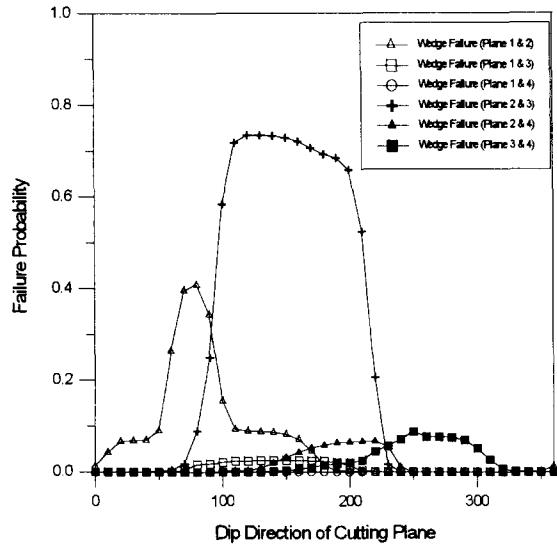


(d) 전체파괴

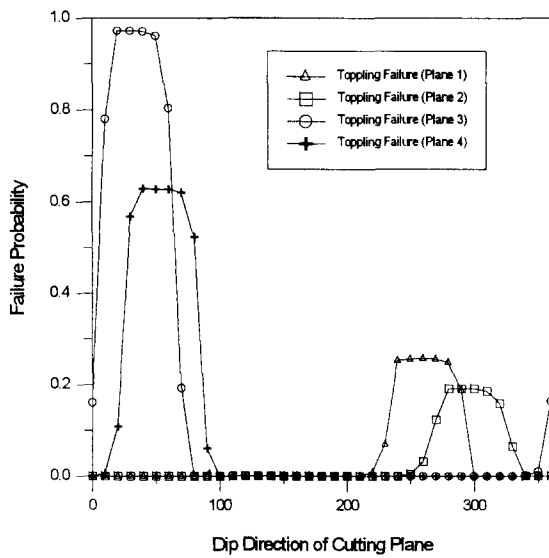
그림 5. 굴착각에 따른 파괴확률 곡선 (굴착면의 경사방향이 140° 인 경우)



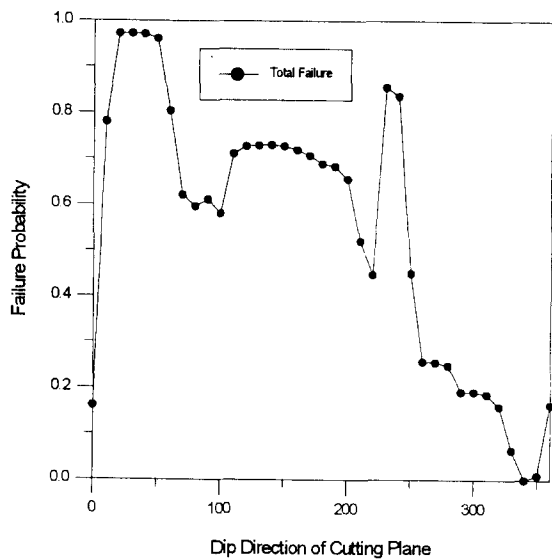
(a) 평면파괴



(b) 쉐기파괴

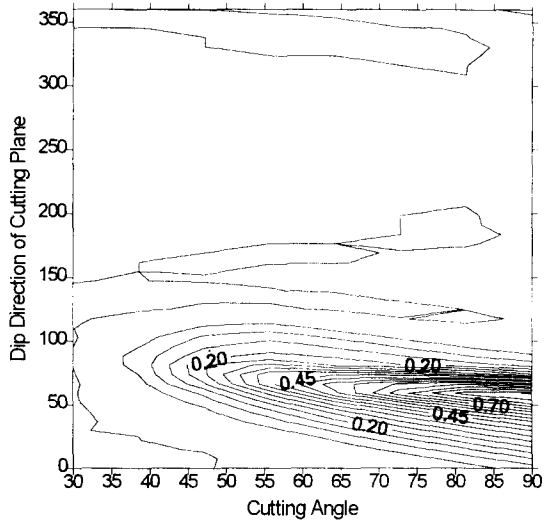


(c) 전도파괴

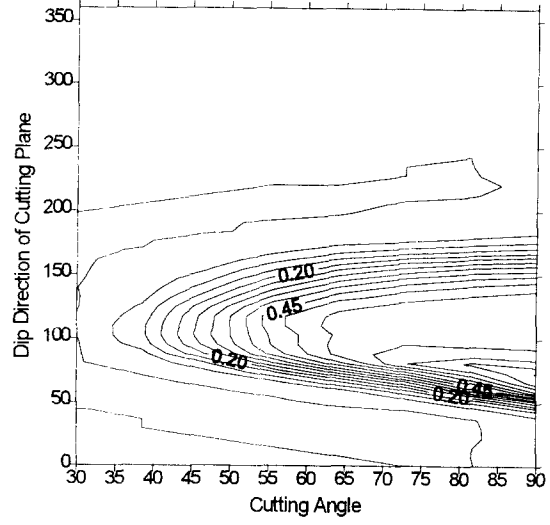


(d) 전체파괴

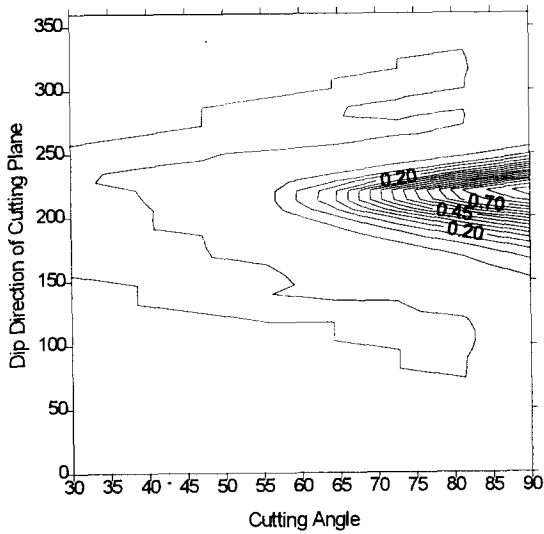
그림 6. 굴착면의 경사방향에 따른 파괴확률 곡선 (굴착각이 70° 인 경우)



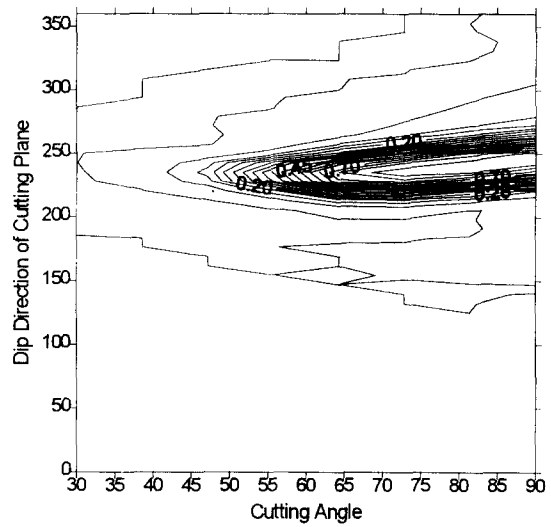
(a) Plane 1



(b) Plane 2

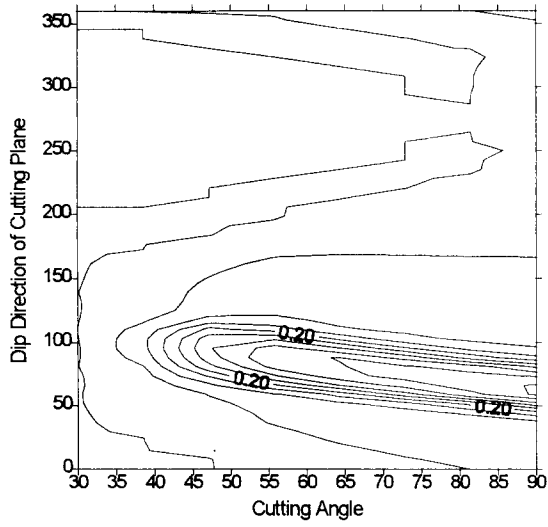


(c) Plane 3

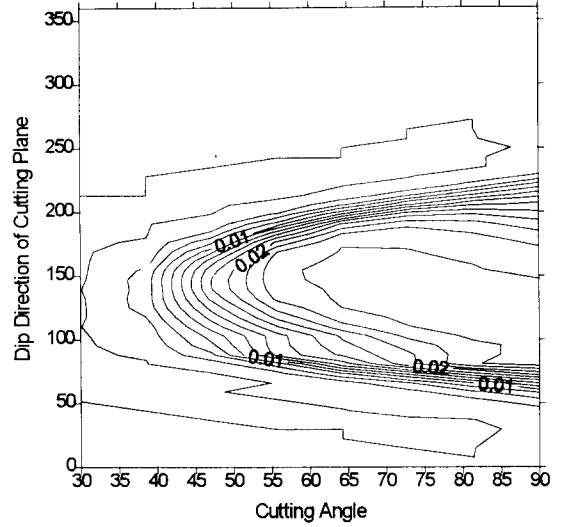


(d) Plane 4

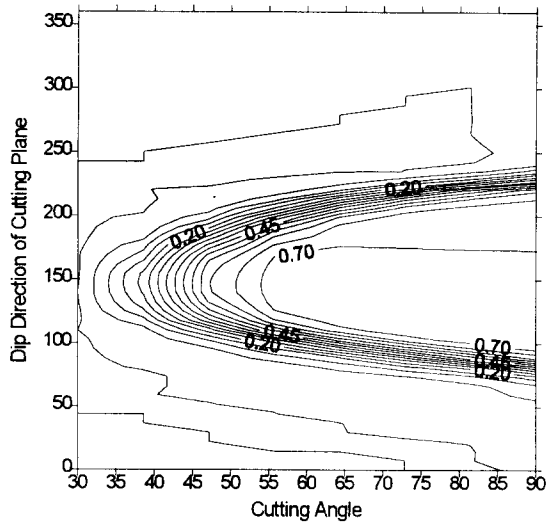
그림 7. 굴착면의 경사방향과 굴착각에 따른 평면파괴 확률의 등가곡선



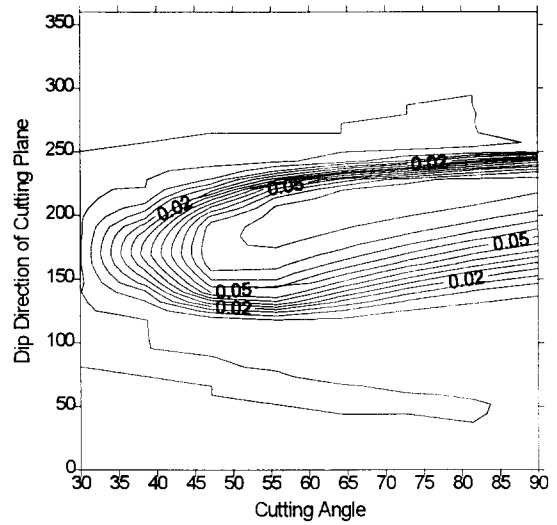
(a) Plane 1 & 2



(b) Plane 1 & 3

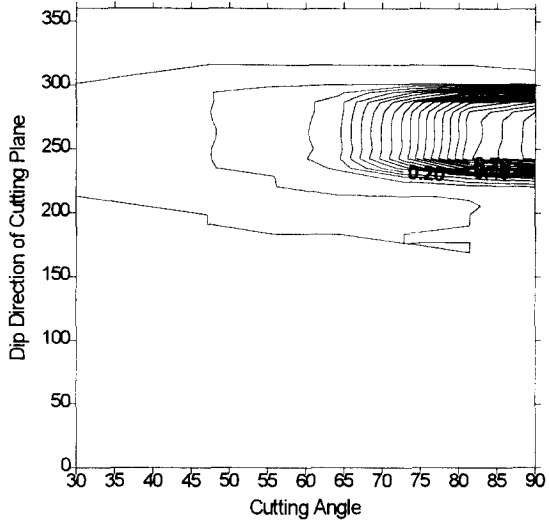


(c) Plane 2 & 3

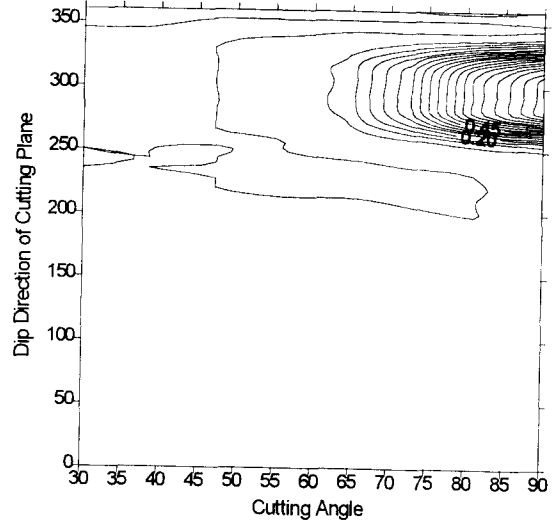


(d) Plane 2 & 4

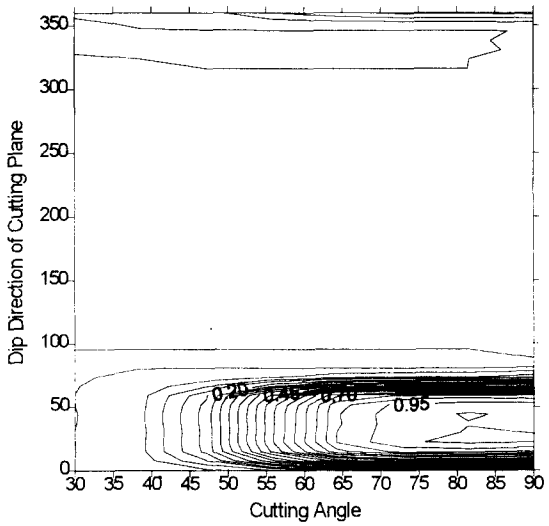
그림 8. 굴착면의 경사방향과 굴착각에 따른 쇄기파괴 확률의 등가곡선



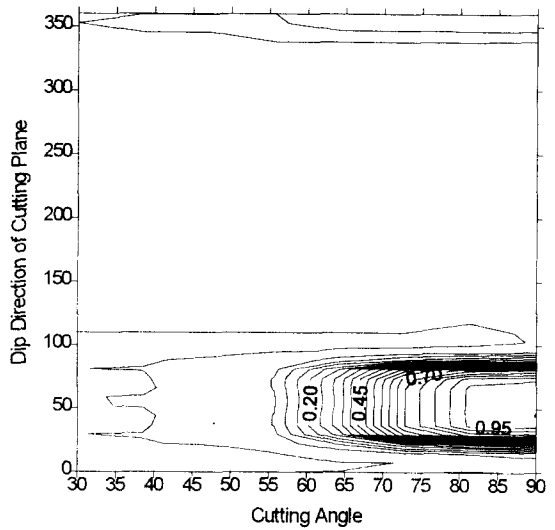
(a) Plane 1



(b) Plane 2

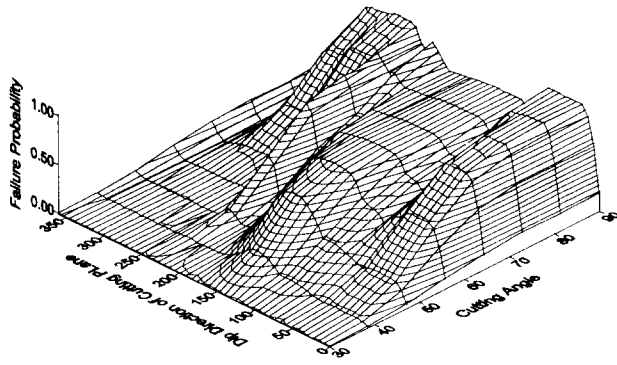


(c) Plane 3

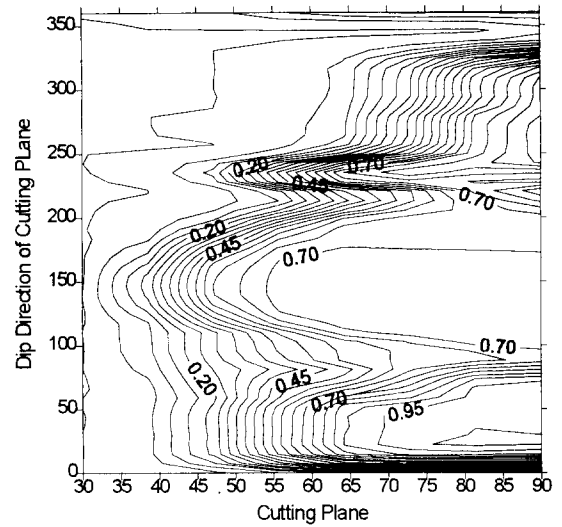


(d) Plane 4

그림 9. 굴착면의 경사방향과 굴착각에 따른 진도파괴 확률의 등가곡선



(a) 3차원 곡선



(b) 2차원 곡선

그림 10. 굴착면의 경사방향과 굴착각에 따른 전체파괴 확률의 등가곡선

5. 결론

암반사면의 신뢰도에 근거한 최적설계를 위하여 각각의 사면안정은 불연속면의 방향 및 강도를 무작위변수로 고려한 Monte-Carlo Simulation으로 분석하였고 암반사면의 최적설계를 위해서 암반사면의 파괴형태 중 평면파괴, 쉼기파괴, 진도파괴 및 전체파괴의 파괴확률 등가곡선을 작성하여 허용파괴 확률조건에 따라 굴착면의 방향 및 굴착각의 최적화 방법을 제안하고 예제해석을 통해 검증하였다. 신뢰도에 근거한 암반사면 최적설계를 위해서는 향후 비선형 최적화기법 적용 및 지보 pattern을 고려한 굴착경비 최적화 방안 등의 추가적인 연구가 요망된다.

참고문헌

- 1) 이인모 & 이명재(1994), "Rock Slope Stability Assessment & Block Theory Application", East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flow, Seoul, Korea
- 2) 조성로(1995), "블록이론에 의한 암반사면의 확률론적 안정해석", 고려대학교 석사학위논문
- 3) Goodman, R. E.(1980), "Introduction to Rock Mechanics", John Wiley & Sons
- 4) Goodman, Richard E. & Shi, Gen-hua(1985), "Block Theory & Its Application to Rock Engineering", Prentice-Hall, New Jersey
- 5) Hoek, E. & Bray, J.W.(1981), "Rock Slope Engineering", 3th editions, Institution of Mining & Metallurgy, London
- 6) Leung, C. F & Quek, S. T(1995), "Probabilistic Stability Analysis of Excavations in Jointed Rock", Can.Geotech. J. 32 pp397-407
- 7) Priest, Stepphan D.(1993), "Discontinuity Analysis for Rock Engineering"