'98 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

다확률변수를 고려한 불확정지하구조계의 불연속면전단거동에 대한 신뢰성 및 민감도해석

Sensitivity and Reliability Analysis on Shear Behavior of a Discontinuity in Uncertain Underground Structure Considering Multi-Random Variables

최규섭, 황신일

한국전력공사 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 P.O. Box 149

요 약

본 논문에서는 지질조사단계에서 이용가능한 각종 자료들의 불확실성을 고려하여 원형암반공동주변에 불연속면이 존재할 경우 불연속면전단거동에 대한 신뢰성해석과 각종 변수들에 대한 파괴민감도분석을 수행하였다. 한계상태방정식의 구성을 위해서 Mohr-Coulomb, Jaeger, Ladanyi & Archambault, and Barton & Bandis들이 제시한 경험식들을 적용하였고, 전체구조계는 직렬시스템으로 가정하였다. 확률변수는 불연속면방향, 초기응력의 수직 및 수평성분, 공극압, 그리고 암반과 불연속면 물성들을 고려하였으며, 이들은 확률공간에서 정규분포, 로그-정규분포, 베타분포, Fisher분포를 갖는 것으로 가정하였다. 신뢰성해석기법과 최적화기법으로는 각각 1차신뢰성해석방법(FORM)과 수정된 HL-RF방법을 적용하였으며, 각각의 요소신뢰성해석으로부터 전체시스템에 대한 1차파괴확률을 산정하기 위해서 PNET방법을 적용하였다. 본 연구에서 개발된 해석코드는 몬테칼로시뮬레이션방법에 의한 결과와 비교하여 타당성을 검증하였으며, 100m깊이의 화강암층지반에 적용하여 공동크기, 공동과 불연속면간의 거리, 확률변수의 분포형태, 확률변수들간의 상관계수크기변화가 불연속면전단파괴의 신뢰도와 파괴확률에 미치는 영향과 불확정변수에 대한 파괴민감도를 검토하였다.

Abstract

In this study, a sensitivity analysis on shear failure of a discontinuity adjacent to a circular opening has been performed based on a series system reliability analysis. To realize the failure surface of the system, Mohr-Coulomb yield criteria and other empirical models suggested by Jaeger, Ladanyi & Archambault, and Barton & Bandis have been adopted. Discontinuity direction, initial stress, pore water pressure and various physical properties obtainable from site investigation and Lab. test in discontinuous rock mass before the design stage are selected as multi-random variables, all of which could be simulated in terms of normal distribution, log-normal distribution, or beta distribution. In order to obtain generalized reliability index and failure probability, FORM(First-order reliability method) and PNET method have been adopted with modified HL-RF method as for an optimization scheme. A computer program has been developed and verified by comparing the analysis results by Monte Carlo simulation. The effect on probability of failure of cavern size, distance between a cavern and a discontinuity, and correlation coefficients have been reviewed through reliability analysis. The most sensitive parameter on system failure has been obtained through sensitivity study.

1. 서 론

지하암반구조물은 처분시설로부터 생태계까지의 지하수유동경로가 길고, 천연방벽으로서의 기능뿐만 아니

라 위험핵종에 대한 적절한 환경을 제공할 수 있기 때문에 방사성폐기물처분장의 건설을 위해서 널리 활용되고 있다[1]. 처분시설의 건설을 위해서 지하암반공동을 굴착할 경우, 건설기간은 물론 건설후 운영기간에도 공동주변의 공학적인 안정성은 필수적으로 확보되어야 한다. 이를 위해서는 계획단계에서 충분한 지질조사가 선행되어야 하며, 조사자료들을 바탕으로 구조물의 기능과 목적에 적합한 단면 및 배치계획, 그리고 안정성을 고려한 지보계획이 수립되어야 할 것이다. 일반적으로 지질조사단계에서 파악할 수 있는 자료로는 불연속면의 방향성, 암반과 불연속면의 물성, 초기응력성분 등을 들 수 있다. 그러나 지하암반구조물의 설계는 굴착이전의 단계에서 수행되기 때문에 설계에 반영되는 지질자료는 부정확하며, 부족한 형편이다. 이러한 자료들을 이용하여 설계자는 공동의 단면 및 배치계획을 수립하여야 하고, 설계수명기간동안 구조물이 제 기능을 확보할 수 있도록 안정성을 검토하여야 한다. 그러나 현재까지 적용된 지하구조물의 해석은 대부분 확정론적 방법에 근거한 것으로서 자료의 불확실성을 반영하기에는 많은 문제점이 있다. 따라서 지하구조물의 보다 합리적인 설계를 위해서는 지질자료들의 불확실성을 반영한 해석기법을 적용하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 원형암반공동주변에 불연속면이 존재하는 경우 불연속면전단거동에 대한 신뢰성해석과 불확정변수들에 대한 민감도분석을 수행하였다. 해석에 적용한 확률변수로는 지질조사단계에서 도출가능한 자료로서 불연속면의 방향, 초기응력의 수직 및 수평성분, 불연속면의 점착력, 내부마찰각 및 체적팽창각, 불연속면인접암석의 일축압축강도, JRC, 그리고 간극압을 고려하였으며, 이들은 확률공간에서 정규분포, 로그정규분포, 베타분포, 또는 Fisher분포로 가정하였다. 한계상태방정식은 Mohr-Coulomb항복조건식과 Jaegar[2], Ladanyi & Archambault[3], 그리고 Barton & Bandis[4]가 제시한 경험식을 적용하였으며, 전체 시스템은 각각의 파괴조건중 어느 하나라도 파괴가 발생하면 파괴되는 것으로 간주하는 직렬시스템(series system)으로 가정하였다. 요소신뢰성해석기법으로는 파괴면을 표준정규확률분포공간에서 직면(hyper-plane)으로 가정하는 1차신뢰성해석방법(FORM)[5]을 적용하였으며, 직렬시스템의 1차근사 신뢰도와 파괴확률을 추정하는 방법으로는 PNET방법[6]을 적용하였다. 또한 최적화기법으로는 수정된 HL-RF(Hasofer Linda & Rackwitz Fissler)방법[7]을 적용하였다. 본 연구결과로부터 개발된 신뢰성해석프로그램은 몬테칼로시뮬레이션방법에 의한 결과와 비교하여 타당성을 검증하였으며, 100m깊이의 화강암층에 적용하여 다음과 같은 사항들을 분석하였다.
1) 공동크기와 공동과 불연속면간의 이격거리가 불연속면전단파괴에 미치는 영향
2) 확률변수의 분포형태와 상관계수, 분포함수를 정의하는 Parameter가 불연속면전단파괴에 미치는 영향
3) 각종 변수들이 불연속면의 전단파괴확률에 미치는 민감도분석

2. 불연속면전단거동에 대한 한계상태방정식

이축방향의 초기응력($\sigma_{yy}, \sigma_{xx}=K\cdot\sigma_{yy}$)이 작용하고 있는 암반체에 원형공동을 굴착하였을 경우, 암반체를 균질등방성의 탄성체로 가정한다면 공동주변의 응력성분은 Kirsh방정식[(8)]으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \frac{\sigma_{yy}}{2}\left[(1+K)\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)-(1-K)\left(1-\frac{4a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta\right] \\
\sigma_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_{yy}}{2}\left[(1+K)\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)+(1-K)\left(1+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta\right] \qquad (1) \\
\sigma_{r\theta} &= \frac{\sigma_{yy}}{2}\left[(1-K)\left(1+\frac{2a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)\sin 2\theta\right]
\end{aligned}$$

여기서, σ_{yy}는 초기응력의 수직성분, K는 초기응력의 수평측압계수, a는 원형공동반경, r은 극좌표계로 표시된 공동중심으로부터 응력발생점까지의 거리, θ는 $\sigma_{xx}=K\cdot\sigma_{yy}$축으로부터 응력발생점까지의 반시계방향회전각도로서, r, θ는 각각 원형공동중심좌표에 대한 법선성분과 접선성분을 나타낸다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 원형공동주변에 불연속면이 존재할 경우, 불연속면에 발생하는 전단응력과 수직응력성분은 식 (1)에 나타낸 임의점에서의 응력성분을 불연속면의 방향성분으로 좌표변환함으로써 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\sigma_{nn} &= \sigma_{rr}\sin^2\gamma+\sigma_{\theta\theta}\cos^2\gamma+2\sigma_{r\theta}\sin\gamma\cos\gamma \\
\sigma_{mn} &= \sigma_{rr}\sin\gamma\cos\gamma-\sigma_{\theta\theta}\sin\gamma\cos\gamma+\sigma_{r\theta}(\cos^2\gamma-\sin^2\gamma)
\end{aligned} \qquad (2)$$

여기서, $\gamma=\tan^{-1}(\frac{b}{d})$, b는 공동원점과 불연속면까지의 최단거리, d는 공동으로부터 가장 가까운 불연속면(A점)으로부터 응력이 검토된 점까지의 불연속면상의 거리를 나타낸다. 이때 불연속면의 방향 ψ는 $\theta-\gamma$로부터 정의될 수 있다.

식 (2)에서 구한 불연속면의 전단 및 수직응력을 Mohr-Coulomb항복조건식에 적용하면 불연속면전단강도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\tau_p = c + (\sigma_{nn} - u)\tan\Phi \tag{3}$$

여기서, c, u, Φ는 각각 불연속면의 점착력, 불연속면내부의 공극압, 불연속면의 내부마찰각을 의미한다.

Jaegar[2]는 현장암반에 대한 시험으로부터 불연속면의 전단강도에 대하여 광범위한 지반조건에 적용할 수 있는 다음 경험식을 제시하였다.

$$\tau_p = c(1 + \exp^{-d(\sigma_{nn} - u)}) + (\sigma_{nn} - u)\tan\Phi \tag{4}$$

여기서, d는 곡선형태를 결정하는 경험적인 상수이다.

Ladanyi & Archambault[3]는 많은 모델시험을 통하여 불연속면의 최대전단강도는 마찰항이외에 불연속면을 구성하는 암석의 강도특성과 불연속면의 체적팽창(dilation)에도 관계되는 것을 밝힌 바 있으며, 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\tau_p = \frac{(\sigma_{nn} - u)(1 - a_s)(v + \tan\Phi_b) + a_s s_R}{1 - (1 - a_s)v\tan\Phi_b} \tag{5}$$

여기서, a_s는 불연속면틈을 통해서 전단된 면적비, v는 최대전단응력에서의 체적팽창비(dilation rate), s_R은 불연속면틈을 구성하는 암석의 전단강도로서, 각 항목에 대한 경험식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_R &= q_u \frac{\sqrt{1+n} - 1}{n}\left(1 + n\frac{\sigma}{q_u}\right)^{1/2} \\ a_s &= 1 - \left(1 - \frac{\sigma}{q_u}\right)^{1.5} \\ v &= \left(1 - \frac{\sigma}{q_u}\right)^{4.0}\tan i_o \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, n은 불연속면을 구성하는 암석의 인장강도에 대한 압축강도의 비, q_u는 불연속면을 구성하는 암석의 일축압축강도, i_o는 불연속면의 체적팽창각을 나타낸다.

Barton & Bandis[4]는 지질조사자료를 바탕으로 비교적 용이하게 파악할 수 있는 경험적인 상수들을 마찰각의 항에 추가시켜 불연속면의 전단강도에 대한 다음 경험식을 제안하였다.

$$\tau_p = (\sigma_{nn} - u)\tan\left(\Phi_b + JRC\log_{10}\frac{q_u}{\sigma_{nn} - u}\right) \tag{7}$$

여기서, q_u는 불연속면을 구성하는 암석면의 일축압축강도, JRC는 불연속면의 조도계수를 나타내는 경험적인 상수로서 조도면의 거칠기에 따라 0부터 20까지의 범위에서 변화하며, 매끄러운 경우에는 0, 매우 거친경우에는 20이 사용된다.

이상에서의 불연속면전단강도경험식으로부터 한계상태방정식은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$G_k(x) = (\tau_p)_k - \sigma_{mn},\ k = 1, 2, 3, 4 \tag{8}$$

여기서, σ_{mn}은 식 (4)로부터 구한 불연속면의 전단방향응력성분이고, k는 한계상태방정식의 수로서 불연속면전단파괴에 대한 시스템은 식 (3), (4), (5), (7)을 적용함으로서 구현할 수 있다.

3. 신뢰성 및 민감도해석이론

본 연구에서는 불연속면의 방향(ρ), 초기응력의 수직성분 및 수평측압계수, 불연속면의 점착력(c_j), 내부마찰각(Φ), 체적팽창각(i_o), 조도계수(JRC), 공극압(u), 불연속면을 구성하는 암석의 일축압축강도(q_u)를 확률변수로 고려하였다. 여러 연구결과들[9,10]의 일반적인 경향을 고려할 때 불연속면의 점착력과 내부마찰각은 지반조건에 따라 다소 다른 경향을 보여주고 있으나 대체적으로 정규분포, 로그정규분포 또는 베타분포로 고려되고 있으며, 초기응력은 정규분포로, 불연속면방향은 정규분포 또는 Fisher분포로, JRC는 정규분포로 가정하고 있다. 이러한 확률변수들이 확률공간에서 결합확률밀도함수 $f(x)$에 의하여 정의될 경우 구조물의 안전성여부는 식 (8)에 정의된 한계상태방정식을 이용하여 다음 식으로부터 파악될 수 있다.

$$p_f = P(G \le 0) = \int \cdots \int_{\bigcup_{k=1}^{4} G_k(x) \le 0} f_X(x)\,dx \tag{9}$$

여기서, $f_X(x)$는 확률변수 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$의 결합확률밀도함수(joint PDF)이며, $\bigcup_{k=1}^{4} G_k(x)$는 각각의 한계상

태방정식으로 구성된 요소들이 직렬시스템으로 연계된 파괴면의 합집합을 의미한다. 이때 신뢰성지수는 $\Phi^{-1}(1-p_f)$는 표준정규누적분포함수의 Inverse를 이용하여 $\beta_g=\Phi^{-1}(1-p_f)$로부터 구해진다. 식 (9)는 결합확률밀도함수가 정의된 확률공간(original space)에서 파괴면의 외부영역을 구하는 과정을 포함한다. 이러한 적분과정은 매우 어려운 계산과정을 포함하고 있기 때문에, 최초공간에서 정의된 한계상태방정식과 결합확률밀도함수를 표준정규분포공간(standard normal space)으로 변환시켜 작업을 수행하면 표준정규분포의 분포특성에 대한 여러 단순성을 활용할 수 있기 때문에 보다 편리한 계산을 수행할 수 있다. 이들 변환은 일반적으로 공간변환의 1:1 mapping에 의해서 수행될 수 있는데 결합확률밀도함수의 분포형태에 따라 각각 다른 방법이 적용될 수 있다. 결합확률밀도함수가 정규분포(jointly normal random variables)일 경우에는 표준정규분포공간과 선형적인 관계를 나타내기 때문에 확률변수를 Mean vector와 Covariance matrix ($\sum=[\rho_{ij}\sigma_i\sigma_j]$)로 분리하여 촐레스키분해(Choleski decomposition)하면 변환을 용이하게 구할 수 있다. 이 경우 변환 Jacobian은 상관계수행렬 R=[$\rho_{i,j}$]= LL^T을 촐레스키분해시킨 하부삼각행렬 L과 표준편차를 나타내는 대각성분행렬 $D=diag[\sigma_i]$을 도입하여 $J_{u,x}=L^{-1}D^{-1}$의 관계로부터 구할 수 있다. 본 연구에서는 상호연계된 비정규분포함수의 경우에 대해서 결합확률밀도함수를 Nataf분포[11]로 가정하였다. Nataf분포란 $y_i=\Phi^{-1}[F(x_i)], i=1,2,\cdots n$인 변환관계로부터 구한 확률변수 $y_i=(y_1,y_2,\cdots,y_n)$가 결합된 정규분포의 형태를 보여줄 때의 확률변수 $x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$를 말하며, 이때 변수 x의 상관성은 z의 상관성행렬로 나타낼 수 있다. $R=[\rho_{ij}]$, $R_o=[\rho_{o,ij}]$을 각각 x,z의 상관계수행렬이라 하면, 표준정규분포공간변환은 R_o의 촐레스키분해된 하부삼각행렬 L_o를 도입하여 $u=L_o^{-1}\{\Phi^{-1}[F(x_1)],\cdots,\Phi^{-1}[F(x_1)]\}^T$로 정의할 수 있다. 이때 변환 Jacobian은 $J_{u,x}=L_o^{-1}diag[\frac{f(x_i)}{\varphi(u_i)}]$의 관계로부터 구할 수 있다.

표준정규분포공간에서 정의된 한계상태방정식 $G(u)$가 연속적으로 미분가능한 함수일 경우 파괴확률 p_f에 대한 1차근사(first-order approximation)는 적분경계를 선형화함으로서 다음 식으로 구할 수 있다.

$$G(u)\fallingdotseq G(u^*)+\nabla G_u^T(u-u^*) \tag{10}$$

여기서 $\nabla G_u^T=[\partial G/\partial u_1,\cdots\partial G/\partial u_n]$은 gradient vector이고, u^*는 설계점(design point)으로서, 한계상태방정식으로 표현되는 파괴면상의 점($G(u)=0$)중에서 원점과 가장 가까운점을 찾아내는 최적화기법의 문제 ($Min\{\|u\| \mid G(u)=0\}$))로 취급할 수 있다. 한계상태방정식의 미분항 $\nabla G_u^T=[\partial G/\partial u_1,\cdots\partial G/\partial u_n]$을 미분연쇄법칙(chain rule of differentiation)에 적용하면 한계상태방정식에 대한 표준정규분포변환은 $\nabla G_u=\nabla G_x J_{x,u}$의 관계로부터 구할 수 있다. 여기서, ∇G_x는 최초공간에서 정의한 식 (8)의 한계상태방정식이며, $J_{x,u}=J_{u,x}^{-1}$는 결합확률밀도함수의 분포함수에 따라 정의되는 변환 Jacobian이다. 이 식을 적용하여 표준정규분포공간의 좌표값을 반복계산으로부터 구하면 원점과 거리가 가장 가까운 점에서 수렴되기 때문에 설계점(u^*)을 구할 수 있다. 설계점이 구해지면 신뢰성지수는 $\beta=\alpha^T u^*$의 관계식으로부터 구할 수 있고, α는 $-\nabla G_u/\|G_u\|$의 관계로부터 구할 수 있다. 직렬시스템의 문제는 앞에서 서술한 방법을 이용하여 각각의 한계상태방정식에 대한 설계점(u_k^*)을 표준정규분포공간에서 구하고, 각점에서 파괴면을 선형화시키면 원점으로부터 각각의 파괴면들까지의 거리가 최소가 되는 면을 찾아내는 최적화문제($Min\{\|u\| \mid G_k(u)=0, u\in \boldsymbol{D}$)로 취급할 수 있다. 여기서, $\boldsymbol{D}$는 표준정규분포공간에서 정의된 모든 파괴면의 영역($\bigcup_{k=1}^{4}G_k(x)\le 0$)으로 정의된다. 이 문제의 해결을 위해서 본 연구에서는 PNET방법과 1차 근사경계(first-order uni-modal bounds)조건을 적용하였다. 이 방법에서는 파괴면간의 기준상관계수(demarcating correlation)를 정하고, 파괴면간의 상관성이 기준상관계수보다 클 경우에는 파괴면간의 상관성을 파괴확률범위의 상한치(upper bound; perfectly correlated)값으로 가정하고, 파괴면간의 상관성이 기준상관계수보다 작을 경우에는 파괴확률범위의 하한치(lower bound; statistically independent)값으로 가정하고 있다. 본 연구에서는 Ang & Tang이 제시한 결과를 참조하여 기준상관계수값으로 0.6을 사용하였다.

확률변수의 분포함수와 한계상태방정식을 정의하는 변수(Parameter)들이 파괴확률과 신뢰성지수에 미치는 영향은 변수들에 대한 민감도를 계산함으로서 파악할 수 있다. 이들변수값의 변화로 인하여 각 변수들의 분포가 미소량 ε만큼 이동하였을 경우, β가 정의된 공간은 그대로 표준정규분포공간이기 때문에 이와 상응하는 β값의 변화는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\Delta\beta=[\frac{\partial\beta}{\partial u_1}+\frac{\partial\beta}{\partial u_2}+\cdots+\frac{\partial\beta}{\partial u_1}](-\varepsilon)=\nabla_{u^*}\beta^T\epsilon \tag{11}$$

여기서, $e=[-\varepsilon, -\varepsilon, \cdots, -\varepsilon]^T$, $\bigtriangledown_{u^*}\beta$는 설계점에서 좌표축에 대한 β의 Gradient vector이다. β의 부호에 변화가 없다고 가정하면, Gradient는 다음 식으로 표현이 가능하다.

$$\bigtriangledown_{u^*}\beta = sgn(\beta)\frac{u^*}{\| u^* \|} = \alpha \tag{12}$$

여기서, α는 파괴면방향으로 이동한 설계점의 단위백타로서 확률변수 u_i의 각각에 대한 중요도를 나타낸다. 양의 방향의 α_i는 u_i의 분포가 더 큰 값으로 이동하였을 경우 신뢰도가 감소함을 의미하며, 음의 방향의 α_i는 u_i의 분포가 더 큰 값으로 이동하였을 경우 신뢰도가 증가함을 의미한다.

확률변수들이 연계될 경우, 표준정규분포공간으로의 변환은 1:1관계를 유지하지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 표준정규분포공간에서의 변수중요도는 실제 확률변수들의 중요도를 의미하지 않게 된다. 따라서 이러한 경우에는 표준정규분포공간에서 파악된 변수중요도α를 미분연쇄법칙에 따라 확률변수들이 정의된 최초공간으로 재변환시킴으로서 구할 수 있다.

결합확률밀도함수와 한계상태방정식은 기본확률변수 x항과 파라미터 Θ_f항으로 구분하여 표시하면 각각 $f(x, \Theta_f)$, $g(x, \Theta_g)$의 함수로 표현할 수 있다. 여기서 $\Theta = (\Theta_f, \Theta_g)$는 문제를 정의하는 모든 파라미터의 집합으로서 신뢰성해석의 문제는 이들 파라미터값에 좌우된다. 설계점을 $u^*(\Theta) = \beta(\Theta)\alpha(\Theta)$로 표시하면 각 파라메타($\theta$)에 대한 미분은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{du^*}{d\theta} = \frac{d\beta}{d\theta}\alpha + \beta\frac{d\alpha}{d\theta} \tag{13}$$

이 식을 사용하여 설계점의 변화를 구하면 각각의 파라미터값의 변화로 인하여 발생하는 신뢰성지수의 변화와 파괴확률의 변화를 예측할 수 있다. 가령, θ=2.0을 사용하여 구한 임의점의 $dP_f/d\theta$가 3.0이고, P_f가 4.0의 값을 갖는다면, θ=2.0에서 θ=2.1이 되었을 경우 P_f값의 변화는 4.0+0.1*3.0=4.3으로 변화함으로 의미한다.

4. 해석예제

본 예제는 그림 1에 나타낸 바와 같이 원형공동주변에 불연속면이 존재할 경우, 공동크기와 공동과 불연속면간의 이격거리, 확률변수의 분포형태, 변수들간의 상관계수가 불연속면전단거동의 파괴확률에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수행되었다. 해석에 고려된 초기응력은 100m깊이에서의 하중성분으로서 국내의 지하원유비축시설에 대하여 조사된 자료를 사용하였으며, 불연속면물성은 모암이 화강암인 경우에 대하여 조사발표된 자료[12,13]들을 사용하였다. 문헌에 제시하고 있는 암반물성치는 암종별로 일정범위내에서 제시되고 있기 때문에 이 구간내에서 각종 파라미터를 변화시킴에 따라 불연속면의 전단강도변화를 우선적으로 검토하였다. 이때 공동반경은 5m, 공동으로부터 불연속면간의 최소이격거리는 10m, 불연속면의 방향은 20^o, 공극압은 1Mpa로 가정하였으며, 불연속면의 전단파괴가 비교적 클것으로 예상되는 A점으로부터 2m상부에 위치한 불연속면에서의 전단강도를 검토하였다. 각각의 전단강도식을 정의하고 있는 파라미터값들을 변화시킴에 따라 구한 불연속면의 전단강도는 그림 2에 나타낸 바와 같다. 그림의 (a),(b),(c),(d)는 각각 Mohr-Coulomb, Jaegar, Ladanyi & Archambault, Barton & Bandis의 전단강도를 나타낸 것으로서, 전단강도의 크기는 각종 파라미타값의 변화에 따라 큰 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. Mohr-Coulomb모델의 경우 불연속면의 내부마찰각은 점착력의 경우보다 전단강도에 비교적 민감함을 보여주고 있으며, Jaegar모델의 경우에는 d값의 변화가 0.1과 0사이에서 비교적 전단강도에 민감함을 보여주고 있다. 또한, Ladanyi & Archambault모델의 경우에는 각각의 물성치에 따라 전단강도는 서로 다른 양상을 보여주고 있지만 불연속면의 내부마찰각의 변화가 전단강도에 가장 큰 영향을 주고 있다. Barton & Bandis모델의 경우에는 인접암석의 일축압축강도와 JRC값이 클수록 전단강도는 커지는 경향을 보여준다. 이 점에서 발생한 전단응력은 대략 15.8MPa이며, 불연속면의 전단강도가 이 값보다 작을 경우에는 전단파괴가 발생하게 된다. 전단응력은 식 (1)과 (2)에 나타낸 바와 같이 초기응력의 크기, 불연속면방향, 간극수압, 공동으로부터의 이격거리 등에 따라 달라지게 되기 때문에, 확정론적인 방법에 의하여 이들 파라미터값들의 모든 불확실성을 고려하여 파괴여부를 예측하는 것은 매우 복잡한 작업이라 할 수 있다.

다음은 본 연구에서 제시하고 있는 FORM 방법에 대한 신뢰도를 검토하기 위해서 공동과 불연속면의 이격거리를 증가시킴에 따라 구한 A점에서의 파괴확률을 검토하였다. 해석에 고려한 확률변수들의 평균치와 표준편차는 표 1에 제시된 값을 적용하였으며, 모든 확률변수들은 상관성이 없는 통계적으로 독립인 조건을 이용하였다. 이격거리증가에 따라 A점에서 구한 전단파괴확률은 그림 3에 나타낸 바와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 불연속면의 전단파괴확률은 공동으로부터의 이격거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을

보여주고 있으며, 이러한 경향은 공동과의 이격거리가 가까울수록 급격해지고, 이격거리가 멀어질수록 완만해짐을 알 수 있다. 그림에서 Monte Carlo 모사기법을 사용한 해석결과는 분포의 평균치를 나타낸것으로서, 신뢰성해석기법에 의한 결과와의 차이는 이격거리에 따라 미소한 차이를 보여주고 있다. 몬테칼로모사기법에 의한 결과는 FORM에 의한 해석결과와 대략 10%내외의 차이를 보여주었으며, SORM과는 대략 1-4%의 근소한 차이를 보여주었다. 이러한 차이는 표준정규분포공간에서 근사시킨 파괴면에 의하여 발생되는 것으로 추정된다. FORM에서는 파괴면을 설계점을 통과하는 직면으로 가정하고 있기 때문에 파괴확률을 구하는 과정에서 실제면과의 차이만큼의 체적이 제외되며, SORM에서는 파괴면을 곡면으로 가정하기 때문에 직면과 곡면사이의 체적이 보상된다. 이러한 경향을 감안할 때 그림 1의 결과는 비교적 합리적인 결과로 판단된다.

확률론적인 해석의 처음 단계로서 표 1에 제시한 확률변수들이 통계적으로 독립인 정규분포함수라고 가정하였을 경우에 대하여 공동크기변화와 공동과 불연속면의 이격거리변화에 따른 신뢰성해석을 수행하였다. 불연속면의 전단파괴확률은 공동크기, 불연속면과의 이격거리, 불연속면위치에 따라서 각각 다른 값을 보여주지만 대체적으로 불연속면주변에 위치한 공동의 크기가 클수록, 공동반경에 대한 불연속면과의 거리(d/r)가 가까울수록 큰 값을 보여주었다. 공동굴착후 공동주변의 이완영역은 공동크기에 따라 달라지기 때문에 최대전단파괴확률이 발생하는 위치는 공동크기에 따라 달라짐을 알 수 있다. 공동반경이 1m일 경우에 최대전단파괴확률은 A점으로부터 1m상부에 위치한 불연속면에서 발생하고 있으며, 공동반경이 3m일 경우에는 A점으로부터 2m상부에 위치한 불연속면에서, 공동크기가 5m, 7m일 경우에는 A점으로부터 각각 3m, 4m상부에 위치한 불연속면에서 발생하였다. 또한 전단파괴확률은 d/r값이 3.0이하의 구간에서 급격한 변화를 보여주었으며, d/r값이 3.0보다 클경우에는 d/r값의 증가에 따라 파괴확률은 점차 감소하여 안정함을 보여주었다. 공동반경이 5m일 경우의 해석결과는 대표적으로 그림 4에 나타낸 바와 같다. 그림에서 A점의 전단파괴확률은 공동크기와 무관하게 d/r값에 따라 일정한 값을 보여주며, d/r이 10.0일 경우에 구한 전단파괴확률에 비하여 d/r이 1.5일 경우에는 대략 5.7배, d/r이 2.0일 경우에는 대략 3.9배, d/r이 3.0일 경우에는 대략 2.2배, d/r이 5.0일 경우에 대략 1.3배의 파괴확률을 보여주었다.

불연속면의 전단파괴확률에 영향을 주는 확률변수들의 평균치와 표준편차의 민감도를 검토한 결과, 민감도는 인접공동의 크기와 공동과의 이격거리, 그리고 불연속면의 위치에 따라서 각각 다른 값을 보여주었으나, 대체적으로 불연속면의 내부마찰각과 초기응력의 수평측압계수, 불연속면의 방향이 비교적 불연속면이 전단파괴확률에 큰 영향을 주고 있으며, 초기응력의 수직성분크기와 불연속면의 체적팽창각은 비교적 작은 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 공동반경이 5m이고, 공동과의 이격거리가 공동반경의 1.5배일 경우와 10배일 경우, 불연속면의 전단파괴확률에 영향을 주는 확률변수들의 평균치와 표준편차의 민감도는 대표적으로 표 2에 나타낸 바와 같다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 확률변수들의 평균값과 표준편차에 대한 전단파괴확률 민감도는 인접공동위치에 따라 다른 경향을 보여주고 있으나, 대체적으로 불연속면의 내부마찰각과 초기응력의 수평측압계수가 비교적 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 공동과 불연속면간의 이격거리증가에 따라 구한 확률변수(불연속면의 내부마찰각, 수평측압계수, 불연속면의 방향)의 평균값과 표준편차에 대한 민감도 변화는 그림 5에 나타낸 바와 같다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 불연속면의 전단파괴확률에 미치는 단위민감도는 공동과 불연속면간의 이격거리와 확률변수에 따라서 각각 서로 다른 경향을 보여주고 있으며, 같은 확률변수에 대해서도 평균값의 전단파괴확률민감도는 표준편차의 경우와 다른 경향을 보여준다. 또한 이러한 민감도는 공동과 불연속면의 이격거리가 비교적 가까운 부분에서는 변화가 심하고, 이격거리가 커질수록 비교적 안정되는 경향을 보여준다. 초기응력의 수평측압계수와 불연속면의 방향의 경우, 평균치에 대한 단위파괴확률민감도는 공동과의 이격거리가 증가함에 감소하는 경향을 보여주었고, 표준편차에 대한 단위파괴확률 민감도는 D/R이 3이하에서는 증가하다가 D/R이 3이상에서는 미소하게 감소함을 보여주었다. 불연속면내부마찰각의 경우, 표준편차에 대한 단위전단파괴확률민감도는 이격거리가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주었으나, 평균치에 대한 단위전단파괴민감도는 이격거리가 가까운 부분에서는 완만한 증가를 보여주다가 D/R이 2.0이상의 부분에서는 이격거리가 증가함에 따라 감소함을 보여주었다. 또한 그림의 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 공동크기에 대한 단위전단파괴확률은 D/R이 3.0일 경우 가장 큰 값을 보여주며, 이보다 이격거리가 클 경우에는 이격거리의 증가에 따라 변수민감도가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 그림 6의 결과에서도 알 수 있다. 그림 6은 공동의 크기와 이격거리의 변화에 따라 전단파괴확률에 영향을 주는 공동크기의 단위민감도를 나타낸 것으로서, 이 값은 D/R이 3.0일 경우가 가장 크며, D/R이 2.0과 3.0범위의 구간에서 가장 급격한 변화를 보여주고 있다.

다음은 확률변수들의 분포함수와 상관계수의 변화가 불연속면의 전단파괴에 미치는 영향을 검토하였다. 확률변수는 크게 세가지 경우 즉, 모든 확률변수를 정규분포로 가정할 경우, 모든 확률변수를 로그-정규분포로 가정할 경우, 그리고 불연속면의 점착력과 내부마찰각은 베타분포로, 불연속면방향은 Fisher분포로, 불연

속면인접암석의 일축압축강도는 로그-정규분포로, 그리고 나머지 확률변수는 모두 정규분포로 가정하였을 경우로 나누어 각 경우에 대한 해석을 수행하였다. 조합형분포의 경우 Fisher분포함수를 정의하는 변수값(K)은 5.0을 사용하였다. A점의 전단파괴확률은 공동과 불연속면간의 이격거리(d/r), 가정된 분포함수의 형태, 확률변수들간의 상관계수에 따라서 크기가 달라지지만, 가정된 분포함수의 형태와 상관계수값의 변화에 상관없이 대체적으로 이격거리가 증가함에 따라 파괴확률은 감소하는 경향을 보여주었다. 또한 공동과의 이격거리가 작을 경우에는 상관계수값의 변화에 그다지 큰 차이를 보여주지 않지만 공동과의 이격거리가 클수록 상관계수의 영향은 크게 발생하였다. 공동과 불연속면의 이격거리가 작을 경우(d/r=1.5), 상관계수 0.0과 0.5의 두 결과를 비교하면, 정규분포함수로 가정하였을 경우가 대략 1.7%, 로그정규분포로 가정하였을 경우가 대략 1.3%, 조합형분포함수로 가정하였을 경우가 대략 1.4%의 미소한 차이를 보여주었다. 그러나 공동과 불연속면의 이격거리가 클 경우(d/r=20.0)에는 상관계수가 0.0의 해석결과는 상관계수 0.5의 해석결과에 비하여 정규분포함수로 가정하였을 경우가 대략 2.7배, 로그정규분포로 가정하였을 경우가 대략 2.2배, 조합형분포함수로 가정하였을 경우가 대략 2.6배의 차이를 보여주었다. 분포형태에 따른 A점에서의 파괴확률은 공동과 이격거리가 작은 경우(d/r=1.5)에는 정규분포로 가정하였을 경우가 가장 큰 값을 보여주었고, 로그-정규분포로 가정하였을 경우가 가장 작은 값을 보여주었다. 그러나 이격거리가 클 경우(d/r=3.0이상)에는 조합형분포함수로 가정하였을 경우가 가장 큰 파괴확률을 보여주었고, 로그-정규분포로 가정하였을 경우가 가장 작은 파괴확률을 보여주었다. 분포형태별 A점에서의 파괴확률을 검토하면 공동과 불연속면의 이격거리가 작을 경우(d/r=1.5), 상관계수의 변화에 따라 대략 5.0%내외의 차이를 보여주고 있지만, 이격거리가 클 경우(d/r=20.0)에는 상관계수의 변화에 따라 대략 9.0%~14.0%의 차이를 보여주었다.

5. 결론

본 연구에 대한 주요수행결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. Mohr-Coulomb모델의 경우 불연속면내부마찰각은 점착력의 경우보다 전단강도에 비교적 민감함을 보여주고 있으며, Jaegar모델의 경우에는 d값의 변화가 0.1과 0사이에서 전단강도에 민감함을 보여주고 있다. 또한, Ladanyi & Archambault모델의 경우, 불연속면내부마찰각의 변화가 전단강도에 큰 영향을 주며, Barton & Bandis모델의 경우에는 암석의 일축압축강도와 JRC값이 클수록 전단강도는 커지는 경향을 보여준다.
2. 몬테칼로모사기법에 의한 결과는 FORM에 의한 해석결과와 대략 10%내외의 차이를 보여주었으며, SORM과는 대략 1-4%의 근소한 차이를 보여주었다.
3. 불연속면의 전단파괴확률은 인접공동의 크기, 공동과 불연속면간의 이격거리, 불연속면위치, 가정된 분포함수의 형태, 상관계수값의 변화에 따라서 각각 다른 값을 보여주고 있지만, 대체적으로 불연속면주변에 위치한 공동의 크기가 클수록, 공동반경에 대한 불연속면과의 거리(d/r)가 가까울수록 큰 값을 보여주었다.
4. 불연속면의 전단파괴확률에 영향을 주는 확률변수들의 평균치와 표준편차의 민감도는 인접공동의 크기, 공동과의 이격거리, 그리고 불연속면위치에 따라서 각각 다른 경향을 보여주었으나, 대체적으로 불연속면내부마찰각, 초기응력의 수평측압계수, 불연속면의 방향이 비교적 전단파괴확률에 민감한 영향을 주고 있으며, 초기응력의 수직성분크기와 불연속면의 체적팽창각은 비교적 작은 영향을 주고 있다.
5. 공동과 불연속면의 이격거리가 작을 경우(d/r=1.5) 불연속면의 전단파괴확률은 분포형태와 상관계수크기에 따라 대략 1.5%내외의 차이를 보여주었고, 공동과 불연속면의 이격거리가 클 경우(d/r=20.0)에는 상관계수크기와 분포형태에 따라 전단파괴확률은 대략 2.2~2.7배의 차이를 보여주었다.

참고문헌

1. Pusch, R., Waste Disposal in Rock, Developments in Geotechnical Engineering, 76, 1994, p. 490..
2. Jaeger, J.C., "Friction of Rocks and the Stability of Rock Slopes," Rankine Lecture, 1971, pp. 97-134.
3. Ladanyi, B. and Archambault, G., "Simulation of Shear Behaviorof a Jointed Rock Mass," Proc. of the 11th Symposium on Rock Mechanics, AIME, New York, 1970, pp. 105-130.
4. Barton, N. and Bandis, S.C., "Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice," Proc. of the I. Symposium on Rock Joints, Norway, Balkema, Rotterdam, 1990, pp. 603-613.
5. Der Kiureghian, A. and Liu, P.L., "Structural Reliability Under Incomplete Probability Information," J. Eng. Mech., ASCE, 112(1), 1986, pp. 85-104.
6. Ang, A.H.S. and Tang, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II -

Decision, Risk, and Reliability, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1984.
7. Zhang, Y. and Der kiureghian, A., "Two improved Algorithms for Reliability Analysis. In Reliability and Optimization of Structural Systems," Proc. of the 6th IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems, 1995, pp. 297-304.
8. Salencon, J., "Contraction Quasi-Statique d'une Cavite a Symmetrie Spherique ou Cylindrique dans un Milieu Elasoplatique," Annales des Ponts et Chaussees, 4, 1969, pp. 213-216.
9. Mostyn, G.R. and Li, K.S., "Probabilistic Slope Analysis-State-of-play," Proc. Conf. on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, Canberra, Australia, pp.89-109, 1993.
10. Glynn E.F., Veneziano, D. and Einstein, H.H., "The Probabilistic Model for Shearing Resistance of Jointed Rock," Proc. of the 19th US Symposium on Rock Mechanics, 1978, pp. 66-76.
11. Liu, P.L. and Der Kiureghian, A. "Multivariate Distribution Models with Prescribed Marginals and Covariances," Pro. Eng. Mech., 1986, pp. 105-112.
12. 삼림컨설턴트(주), "○○비축기지 조사설계용역 기본설계보고서," 제 1,2권, 1991.
13. Priest, S.D., Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, 1993, p. 473.

표 1 해석에 고려된 확률변수들의 평균값과 표준편차 및 확정론적인 물성값

	초기응력		불연속면 방향(ϕ)	불연속면물성				간극수압 (u)	모암의 일축압축강도 (q_u)	확정론적 변수	
	수직성분 (σ_{yy})	수평측압 계수(K)		점착력 (C_J)	내부마찰각 (Φ_b)	JCS	체적팽창각 (i)			d	n
Mean	27Mpa	1.5	30^o	2MPa	20^o	10	5^o	1MPa	80MPa	0.0015	10.0
St, D.	5.4Mpa	0.3	6^o	0.4MPa	4^o	2.0	1^o	0.2MPa	16MPa		

표 2 표1의 정규분포함수를 갖는 확률변수들의 평균 및 표준편차에 대한 전단파괴확률민감도

파괴확률민감도 \ 확률변수		불연속면 점착력	불연속면 내부마찰각	불연속면 체적팽창각	불연속면 조도(JRC)	불연속면 방향	초기응력 수직성분	초기응력 측압계수	간극수압	인접암석의 일축압축강도
이격거리 D=1.5R	$dP_f/d(mean)$	-2.68E-03	-2.03E+00	1.04E-07	3.70E-05	8.56E-01	-1.36E-03	1.17E+00	3.71E-02	-3.26E-06
	민감도순위	5	1	9	7	3	6	2	4	8
	$dP_f/d(St.D.)$	7.47E-05	-1.54E-01	6.95E-09	4.22E-05	-4.12E-02	8.22E-06	-2.23E-01	-1.49E-04	2.62E-06
	민감도순위	5	2	9	6	3	7	1	4	8
이격거리 D=10R	$dP_f/d(mean)$	1.09E-02	-1.60E+00	8.77E-03	2.32E-03	2.20E-01	1.47E-03	4.622E-01	2.97E-02	1.14E-02
	민감도순위	6	1	7	8	3	9	2	4	5
	$dP_f/d(St.D.)$	4.79E-03	1.17E+00	-9.81E-02	-6.17E-02	-5.23E-03	-5.61E-06	4.51E-01	5.18E-03	-3.26E-04
	민감도순위	7	1	3	4	5	9	2	6	8

그림 1 원형공동주변에 존재하는 불연속면

그림 2 확정론적해석으로부터 구한 불연속면전단강도

그림 2 확정론적해석으로부터 구한 불연속면전단강도

그림 3 이격거리변화에 따른 A점의 전단파괴확률변화

그림 4 공동으로부터의 이격거리변화에 따라 불연속면에 발생하는 전단파괴확률변화

그림 5 A점의 전단파괴확률에 대한 확률변수의 평균값과 표준편차에 대한 단위민감도

그림 6 A점의 전단파괴확률에 대한 공동크기의 단위전단파괴확률민감도변화