

불연속면의 영향을 고려한 암반동굴의 확률유한요소해석

Stochastic Finite Element Analysis for Rock Caverns Considering the Effect of Discontinuities

최 규섭* 황 신일** 이 경진**
Choi, Kyu-Sup Hwang, Shin-Il Lee, Kyung-Jin

Abstract

In this study, a stochastic finite element model is proposed with a view to consider the uncertainty of physical properties of discontinuous rock mass in the analysis of structural behavior on underground caverns. In so doing, the LHS(Latin Hypercube sampling) technique has been applied to make up weak points of the Crude Monte Carlo technique. Concerning the effect of discontinuities, a joint finite element model is used that is known to be superior in explaining faults, cleavage, things of that nature. To reflect the uncertainty of material properties, the variables such as the the elastic modulus, the poisson's ratio, the joint shear stiffness, and the joint normal stiffness have been used, all of which can be applicable through normal distribution, log-normal distribution, and rectangular uniform distribution. The validity of the newly developed computer program has been confirmed in terms of verification examples. And, the applicability of the program has been tested in terms of the analysis of the circular cavern in discontinuous rock mass.

1. 서 론

불연속면은 암반내에 미세한 절리, 균열, 거대한 단층, 부정합면 등의 형태로 반드시 존재하며, 동굴의 구조적 안정성에 많은 영향을 주기 때문에 암반공학자들의 큰 관심이 되고 있다. 현재까지 개발된 불연속암반체의 해석모델은 불연속면의 분포특성에 따라 크게 4가지의 해석모델 즉, 연속체해석모델, 절리유한요소모델, 개별요소모델, 경계요소모델이 적용가능하다¹⁾. 이러한 수치해석모델들을 적용하여 지하암반구조물을 해석할 경우 해석결과의 신뢰도는 입력으로 정의되는 제반 물성치에 따라 크게 좌우된다. 그러나 암반은 생성과정과 변형이력, 구성암종, 불연속면의 분포 및 특성 등과 같은 복잡한 요인들에 따라서 역학적 특성이 달라지기 때문에 해석영역내의 모든 위치에 대하여 정확한 물성치를 파악하는 것은 매우 어려운 작업이라 할 수 있다. 일반적으로 암반물성치는 조사단계에서 수행되는 각종 실내시험 또는 현장시험들로부터 파악되지만 대체적으로 부족한 형편이고, 시편채취위치에 따라 서로 다른 값을 보여주고 있다. 또한 암반물성치는 시

* 한국원자력연구소 선임연구원, 공학박사, 구조기술사
** 한국원자력연구소 책임연구원, 토건설계실장
*** 한국원자력연구소, 선임연구원

편채취의 기술적인 어려움과 측정오차 등으로 인하여 대체적으로 많은 불확실성을 포함하고 있다. 현재까지 지하구조물의 현장에서 적용하고 있는 대부분의 수치해석과정에서는 이러한 암반물성의 불확실성을 반영하지 않고, 해석영역내에서 모든 재료특성값이 일정하다는 가정하에 설계작업과 구조안정성평가작업을 수행하고 있다. 이러한 해석결과들은 암반물성의 분포와 편차를 무시하고 수행된 결과이기 때문에 대부분 실제 현상과 다른 경향을 보여주게 되며, 때로는 과도한 지보설계를 유도하거나, 시공중의 큰 폭의 설계변경을 요구하여 경제적 손실을 초래하기도 한다. 따라서 암반구조물의 보다 합리적인 해석을 위해서는 암반물성의 불확실성을 합리적으로 고려할 수 있는 확률론적 수치해석모델을 이용하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 지하암반구조물의 해석시 암반물성과 불연속면물성에 대한 불확실성을 확률론적으로 고려할 수 있는 절리유한요소해석모델을 제시하였다. 확률론적인 접근과정에는 몬테카를로모사기법의 단점을 보완한 LHS(Latin Hypercube Sampling)기법²⁾을 적용하였으며, 해석에 고려한 불확정변수로는 암반물성의 경우에는 탄성계수와 포아송비를, 불연속면물성의 경우에는 전단강성과 수직강성값을 사용하였다. 이들 물성치는 확률공간에서 정규분포, Log-normal분포, 사각형 균일분포에 대하여 고려가 가능하도록 작성하였다. 유한요소해석의 정식화 과정에는 암반거동의 모형을 위해서 평면변형조건의 3각형 일정변형도요소와 4절점 등매개변수요소를 사용하였고, 록볼트(rockbolt) 등과 같은 지보재의 모형화에는 2절점 트러스요소를 사용하였다. 또한 불연속면거동의 모형화에는 단층, 부정합면, 또는 뚜렷한 절리군이 형성되어 있는 지역에 적용성이 높은 절리유한요소로서, Goodman이 제시한 4절점 일정변형도 절리유한요소³⁾를 사용하였다. 본 연구결과로부터 개발된 수치해석프로그램은 몇가지 검증예제를 통하여 타당성을 확인하였으며, 가상의 불연속면군이 존재하는 원형암반동굴에 대한 확률론적해석을 통해서 현장적용성을 확인하였다.

2. 확률유한요소해석

2.1 불확정변수의 임의장생성

불확정변수에 대한 분포함수는 생성하고자 하는 분포의 형태에 따라서 여러방법들이 적용가능하다. 본 연구에서는 0과 1사이의 가상임의수(Pseudo Random Number)생성을 위해서 승수나머지법(Power Residue Method)⁴⁾을 적용하였으며, 생성된 가상임의수로부터 분포함수의 생성을 위해서는 역계산법(Inverse Method)⁵⁾을 적용하였다. 승수나머지법을 사용하여 0과 1사이의 표준균일분포를 갖는 임의수의 집합군을 생성하고, 이들에 대한 누적분포와 구하고자 하는 분포함수에 대한 누적분포의 1:1대응관계로부터 분포를 정의하는 임의수의 집합군은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$x_i = F_X^{-1}(u_i) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

여기서, u_i 는 0과 1사이의 표준균일분포를 갖는 가상임의수의 집합군이며, x_i 는 임의 분포형태의 누적분포함수(CDF)가 $F_X(x)$ 이고, 확률변수 X 의 누적확률이 $F_X(x) = z$ 의 형태로 주어진 경우, 분포형태를 정의하는 임의수의 집합군을 의미한다. 또한 식 (1)에서 n 은 분포형태를 정의하는 표본크기로서, 0과 1사이에서 생성된 가상임의수의 갯수와 동일하다. 가상임의수는 표본수를 충분히 크게 사용하지 않을 경우 0과 1사이에서 부분적으로 편중되어 표준균일분포형태를 표현하지 못하는 가능성이 있다. 따라서 생성하고자 하는 확률변수의 분포함수를 균등한 확률을 갖는 k 개의 구간으로 분할하여 각 구간에서 1개만의 가상임의수를 취하면, 보다 더 균일한 분포형태를 갖는 분포함수를 정의할 수 있다. 가령 A, B 구간에서 존재하는 정규분포형태의 경우 평균치와 표준편차는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\mu = (A + B)/2, \quad \sigma = (B - \mu) / (\Phi(z) = P(Z \leq z)) \quad (2)$$

정규분포함수의 평균과 표준편차를 결정하면 분할된 분포의 각 간격좌표는 쉽게 계산할 수 있다. 이때 확률변수의 누적확률밀도함수의 발생확률은 1.0이므로 k 개 구간으로 분할하였을 경우

각 구간에서의 분할면적은 $1/k$ 의 확률을 갖게되며, 임의적으로 추출한 가상임의수는 다음 식으로부터 변환되어 각 구간에 할당하게 된다.

$$P_j = u_j(1.0/k) + (j-1)(1.0/k) \quad j=1, 2, 3, \dots, k \quad (3)$$

식 (3)에서 구한 P_j 값은 정규분포의 누적분포함수에 대입하여 x 축좌표값이 산정가능하며, 이 값을 이용하면 식 (1)로부터 분포형태를 나타내는 구간별 균등분할된 임의수를 정의할 수 있다.

확률변수가 두 개이상일 경우에는 한조의 임의수로서 두개 이상의 분포를 형성하기 때문에 생성된 임의수간의 통계적인 상관성이 존재한다. 본 연구에서는 생성된 임의수간의 통계적 독립성을 검토하기 하기 위하여 다음과 같은 상관계수를 사용하였다²⁾.

$$\rho_{12} = \frac{\sum_{i=1}^k (S_{x_i} - \frac{n+1}{2})(S_{x_2} - \frac{n+1}{2})}{\left\{ \sum_{i=1}^k (S_{x_i} - \frac{n+1}{2})^2 \sum_{i=1}^k (S_{x_2} - \frac{n+1}{2})^2 \right\}^{1/2}} \quad (4)$$

여기서, S_{x_1} 은 분포함수 X_1 의 i 구간에서의 임의수를 나타내며, S_{x_2} 는 분포 X_2 의 i 구간에서의 임의수를 나타낸다. 이 값이 크면, 상관성은 높기 때문에 상관성이 보다 적은 임의수의 선정이 필요하며, 이 값이 1이하정도의 크기를 갖게 되면 임의수생성(Random number sampling)은 비교적 합리적인 것으로 알려져 있다²⁾.

2.2 재료특성의 확률장

확률공간내에서 임의요소의 확률변수에 대한 공간적분포의 임의성은 평균과 분산항을 고려하여 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$E_i(x_j) = E_{i_0,j}(1 + g_i(x_j)) \quad i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, 3 \dots n \quad (5)$$

여기서, 첨자 i, j 는 각각 구조물의 해석에 사용되는 요소번호와 해석에 사용된 확률변수를 나타내며, m, n 은 각각 해석에 사용된 요소수와 확률변수를 의미한다. 또한, E_{i_0} 는 임의요소에서의 확률변수의 기대값이고, $g_i(x_j)$ 는 j 번째 확률변수에 대한 분포형태를 나타내는 임의장함수이다.

확률변수의 자기상관함수(Auto-correlation)는 확률변수의 상대공간좌표에 따른 상호관계를 나타내는 척도로서 확률변수의 위치벡터와 상대거리벡터를 고려하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$R_j(\xi) = E_i(g(x)_j \cdot g(x + \xi)_j) \quad (6)$$

여기서, x 와 ξ 는 각각 j 확률변수에 대한 i 요소의 위치벡터 $\{x, y\}^T$ 와 요소중심점에서의 상대거리벡터를 나타낸다.

확률변수의 임의성이 확률공간에서 등방성이라면, 식 (6)의 자기상관함수는 요소중심간의 거리 ξ 만의 함수로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 확률공간에서의 임의장함수를 등방성으로 가정하였으며, 이때 다음 식과 같은 자기상관함수를 사용하였다.

$$R_j(\xi) = \sigma_j^2 \text{EXP}\left[-\left(\frac{\xi}{d}\right)^2\right] \quad (7)$$

여기서, σ_j 는 확률변수에 대한 분포함수의 표준편차를 나타내고, d 는 상관관계거리로서 인접요소중심간의 거리에 따른 상관관계의 감소정도를 나타내며, 이 값이 클수록 상관성은 적어진다⁶⁾.

압반의 물성들을 확률변수로 사용하여 유한요소의 크기를 m 개로 분할하였을 경우, 모든 요소에서의 재료특성이 확률론적인 등방성을 갖는다면, 분포특성을 나타내는 식 (5)의 $g_i(x)$ 는 평균값 으로부터 분산된 m 개의 값으로 구성되며, m 개의 값은 서로 상관성을 갖는다. 이들의 상관성은 모든 요소에 대하여 식 (7)로부터 계산하여 공분산행렬(Covariance Matrix) Cov_j 을 구성함으로써 다음 식과 같은 형태로 구성할 수 있다.

$$(C_{x, y})_i = Cov_j[g_x, g_y]_i = E_j[g_x, g_y]_i = R_j(\xi_{x, y})_i \quad (8)$$

여기서, 첨자 i, j 는 각각 분할된 유한요소와 확률변수를 나타내며, x, y 는 각각 요소중양점에서의 x 축거리, y 축 거리를 의미한다.

따라서, 확률변수의 공간적상관성을 고려하여 구한 최종적인 분포함수는 다음 식으로 표현된다.

$$G_i(x, Cov)_i = Cov_j[g_X, g_Y]_i \cdot [x_u]_j \quad (9)$$

여기서, $Cov_j[g_X, g_Y]_i$ 는 식 (8)로부터 계산된 공분산행렬이며, $[x_u]_j$ 는 식 (3)을 고려하여 식 (1)로부터 계산된 임의수의 집합군이다.

2.3 확률론적 유한요소해석

불연속면의 전단강성과 수직강성을 확률변수로 고려할 경우 절리요소의 요소강성도행렬은 다음 식과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$[K_j]_i = [K_j]_0(1 + g_i(k_{s,n})) \quad (10)$$

여기서, $[K_j]_0$ 는 다음 식으로 정의되는 절리요소의 요소강성도행렬에 확률변수로 사용한 불연속면강성의 평균값을 적용한 행렬이며, $g_i[k_{s,n}]$ 은 불연속면의 전단강성과 수직강성의 분포형태를 나타내는 함수로써, 식 (9)로부터 구한 $G_i(x, Cov)_i$ 를 반영함으로써 구현할 수 있다.

$$[K_j]_{s,n} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_n \\ k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2k_n & 0 & 2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_n \end{bmatrix} \quad (10a)$$

3. 프로그램의 검증

본 연구에서 작성한 프로그램의 검증작업을 위해서 그림 1에 나타난 해석모델에 대하여 불연속면의 전단강성변이를 고려한 확률론적 해석을 수행하였다. 암반의 단성계수만을 확률변수로 고려할 경우에 대한 검증해석⁷⁾에서는 Yamazaki 등이 제시한 해석결과⁶⁾와 일치함을 보여주었기 때문에 본 연구에서는 대표적으로 불연속면의 전단강성을 확률변수로 고려하였을 경우에 대해서만 서술하였다. 그림 1의 해석모델은 Van Dillen과 Ewing이 제시한 확정론적인 해석모델⁸⁾을 참조한 것으로써, 해석모델의 중앙부분에 불연속면이 존재할 경우, 좌측상단부분에는 20kg/cm^2 의 하중을 작용시키고, 우측상단부분에는 10kg/cm^2 의 하중을 작용하였을 때 불연속면의 전단강성값의 변화에 따라 불연속면에 발생하는 미끄러짐을 파악하기 위한 모델이다. 그림에서 불연속면의 전단강성이 없을 경우에는 불연속면을 중심으로 좌우측부분은 수직하중에 대하여 별개의 거동을 하기 때문에 좌측부분의 수직변위는 우측부분의 수직변위의 두배만큼 발생하게 된다. 또한 불연속면의 전단강성크기가 증가함에 따라 불연속면과 인접한 좌측부분의 수직변위와 우측부분의 수직변위의 차이는 점차적으로 감소하게 되며, 불연속면의 전단강성크기가 암석의 강성크기와 같게 된다면 불연속면의 영향이 없는 연속체의 해석결과와 같은 경향을 보여주게 된다. 본 예제에서는 확정론적인 해석결과와의 이러한 경향들(그림 2참조)을 참조하여 불연속면의 전단강성분포가 평균치가 100kg/cm^2 이고, 표준편차는 30kg/cm^2 인 정규분포일 경우에 대한 확률론적인 해석을 수행하였다. 이때 불연속면의 비선형거동에 대한 반복계산횟수는 30회를 사용하였으며, 이 경우 비선형반복에 따른 증분허용오차는 1.0%이내의 범위에 해당된다.

확률론적 해석의 처음 단계로서 합리적인 표본수크기를 선정하기 위하여 표본수증가에 따라 절

리요소 1에서 표본추출한 전단강성의 분산치를 검토하였다. 그림 3은 표본수증가에 따라 절리요소 1에서 표본추출한 전단강성값의 분산치를 나타낸 것으로써, (a)는 몬테칼로방법에 의하여 구한 결과를 나타낸 것이고, (b)는 LHS방법에 의한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3으로부터 몬테칼로모사기법을 사용하였을 경우 절리요소 1에서 표본추출한 전단강성값은 표본수를 100개이하로 사용하였을 경우에는 표본수의 변화에 따라 불안정한 경향을 보여주지만, 100개 이상의 값을 사용할 경우에는 표본수의 증가에 따라서 전단강성의 분산치가 안정함을 보여주고 있다. 그러나 LHS방법을 사용하였을 경우에 구한 절리요소 1에서의 전단강성분포는 대체적으로 표본수가 30이하일 경우 불안정한 경향을 보여주며, 30이상일 경우 표본수의 증가에 따라 안정됨을 보여주고 있다. 그림 3의 결과를 참조하여 본 예제의 해석에는 LHS기법에서는 표본수의 크기를 50개로 사용하였고, 몬테칼로 모사기법에서는 표본수의 크기를 100개로 사용하였다. 이 경우 LHS방법으로부터 구한 절리요소 1에서의 전단강성에 대한 분포특성은 입력으로 정의한 분포특성과 0.5%이내의 차이를 보여주었으며, 몬테칼로방법의 경우에는 대략 2.0%내외의 차이를 보여주었다.

그림 1의 해석모델에 대하여 확률론적인 해석으로부터 구한 절점 B와 절점 C의 수직변위빈도분포는 그림 4에 나타낸 바와 같다. 그림 4에서 (a)는 몬테칼로방법으로부터 구한 해석결과를 나타낸 것이고, (b)는 LHS방법으로부터 구한 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 절점 B와 절점 C에서의 수직변위에 대한 빈도분포는 발생구간, 빈도수, 분포형태 등이 몬테칼로방법의 경우와 LHS방법의 경우가 대체적으로 유사함을 보여주고 있다. 본 예제의 경우 절점 B에서의 수직변위분포는 $-0.35\text{cm} \sim -0.34\text{cm}$ 구간에서 밀집된 분포를 보여주고, 절점 C에서의 수직변위분포는 $-0.26\text{cm} \sim -0.25\text{cm}$ 구간에서 밀집된 분포를 보여준다. 이러한 결과들은 전단강성의 평균값인 100kg/cm^2 를 확정론적인 값으로 가정하여 구한 그림 2의 확정론적인 해석결과(B절점; -0.347cm , C절점; -0.254cm)의 범위에 해당하며, B점과 C점의 수직변위에 대한 분포의 밀집구간과 비조밀구간 등은 확정론적인 결과로부터 예측된 구간내에 존재한다.

이상에서 표본추출한 확률변수의 빈도분포형태가 입력함수로 정의한 분포함수와 대체적으로 일치하는 경향, 그리고 확률론적 해석결과가 다수의 확정론적 해석결과로부터 예측된 범위내에 존재하는 경향 등의 결과로부터 본 연구에서 작성한 확률론적 해석기법은 합리적임을 알 수 있다.

4. 불연속암반구조물의 확률론적 구조해석에

본 장에서는 프로그램의 적용성을 확인하기 위해서 가상의 불연속면군이 동굴주변에 존재할 경우, 불연속면의 강성변이를 고려한 지하구조물의 확률론적 해석을 수행하였다. 뚜렷한 절리군은 일반적으로 지표면으로부터 심도가 깊은 지역에서 발생하고 있기 때문에⁹⁾, 본 예제에서는 동굴의 심도를 대략 300m로 가정하였고, 불연속면은 수평축에 대해서 반시계방향으로 68.2° 와 158.2° 로 존재하는 것으로 가정하였다. 해석에 고려된 동굴구조 및 불연속면의 분포는 그림 5에 나타낸 바와 같다. 그림 5에서 암반은 무결암의 화강암(단위중량 $=2.6\text{t/m}^3$)으로 가정하여 240개의 사각형 평면형요소로 모형화하였고, 불연속면은 각 조에 대하여 20개의 절리요소(총 40개의 절리요소)를 사용하여 모형화하였다. 이때 하중은 초기응력의 수직과 수평성분($K_0=1.0$)을 작용시켰다.

해석시 불연속면의 틈간격은 1cm로 가정하였고, 전단강성과 수직강성을 확률변수로 고려하였다. 불연속면의 강성값은 일반적으로 암반의 강성값에 비하여 매우 작은 값을 갖기 때문에, 본 예제에서는 불연속면강성의 평균값으로 모암의 탄성계수값의 1/1000에 해당되는 500kg/cm^2 를 사용하였으며, 평균값에 대한 표준편차가 32%인 정규분포형태로 가정하였다. 불연속면의 비선형거동에 대한 반복계산횟수는 동굴주변거동에 대한 수렴성검토작업을 통하여 50회를 사용하였으며, 이때 증분하중으로 인한 동굴주변거동에 대한 허용오차는 대략 2.0%이내의 값을 갖는다. 또한 해석에는 50개의 표본수를 사용하였으며, 이때 표본추출한 불연속면의 강성값은 입력으로 정의한 값에 비하여 평균이 대략 0.5%의 차이를 보여주었고, 분산치는 대략 1.0%내외의 차이를 보여주었다.

그림 5의 해석모델에 대하여 불연속면의 전단강성과 수직강성값이 정규분포일 경우 동굴주변의

4개 대표점에서 구한 변위분포특성은 표 1과 그림 6에 나타낸 바와 같다. 표 1과 그림 6에서 굴착후 동굴주변에서 발생하는 변위는 굴착후 발생하는 초기응력의 이완으로 인하여 동굴내부의 방향으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 이때 4개점에서의 변위분포는 대체적으로 로그-정규분포형태를 보여주었으며, 발생크기와 분산정도는 절점의 위치에 따라서 각각 다른 경향을 보여주고 있다. 본 예제에서 동굴주변의 4개대표점에서 구한 변위빈도분포는 평균치의 경우 동굴저변이 가장 큰 값을 보여주었고, 평균치에 대한 분산은 동굴정점이 가장 큰 값을 보여주었다.

불연속면의 전단강성과 수직강성이 정규분포일 경우 동굴과 불연속면이 만나는 4개의 절리요소에서 발생하는 거동에 대한 분포특성은 표 2에 나타낸 바와 같다. 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 동굴과 불연속면이 만나는 절리요소에서의 거동은 불연속면의 위치에 따라서 서로 다른 분포형태를 보여주고 있다. 본 예제의 경우 불연속면의 미끄러짐은 수직변형과 회전변형에 비하여 비교적 불연속면의 강성에 대한 민감도가 큰 것으로 나타났다. 동굴굴착면과 불연속면이 만나는 4개의 절리요소에서 발생한 미끄러짐은 대체적으로 로그-정규분포형태를 보여주고 있으며, 평균값은 B요소가, 평균에 대한 분산치는 C요소가 가장 큰 값을 보여주었다. 또한 불연속면의 수직변형은 대체적으로 1.0mm~2.0mm내에서 밀집된 정규분포형태 또는 로그-정규분포형태를 보여주고 있으며, 평균치는 A요소가, 평균에 대한 분산치는 B요소가 가장 큰 값을 보여주었다.

본 예제의 해석결과로부터 동굴주변에서 발생한 변위의 크기와 분포형태는 불연속면의 강성값의 분포특성에 따라서 큰 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. 지하구조물에 대한 기존의 설계방법에서는 대부분의 경우 경험적인 판단에 근거하여 설계기준을 작성하고, 동굴주변을 거의 동일한 지보량과 지보재를 사용하여 보강설계를 수행하고 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 연구결과를 이용하면 동굴주변거동의 상한치와 하한치, 분산치 등에 대한 파악이 용이하기 때문에 합리적인 안전율의 선정이 용이하고, 보다 더 경제적인 지보설계를 수행할 수 있으리라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 LHS기법을 사용하여 불연속암반구조물의 물성변이를 확률론적으로 고려할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 아울러 본 연구결과는 검증해석을 통해서 프로그램의 타당성을 검증하였으며, 가상의 불연속면군이 존재하는 원형암반동굴에 대한 확률론적 해석으로부터 현장적용성을 확인하였다. 본 연구에 대한 주요수행결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 그림 1의 모델에 대한 검증해석결과, LHS기법에 의한 해석결과는 MCS기법에 의한 결과와 유사함을 보여주었다. 또한 표본추출한 확률변수의 빈도분포형태는 입력함수로 정의한 분포함수와 대체적으로 일치하였고, 확률론적 해석결과는 다수의 확률론적 해석결과로부터 예측된 범위내에 존재하였다. 따라서 본 연구에서 작성한 확률론적 해석기법은 합리적임을 알 수 있었다.
- 2) 가상의 불연속면군이 존재하는 원형암반동굴에 대하여 불연속면의 강성변이를 고려한 확률론적 해석으로부터 프로그램의 적용성을 확인하였다. 그림 5의 해석모델에 대하여 동굴 및 불연속면주변의 변위빈도분포를 검토한 결과, 분포형태는 대체적으로 로그-정규분포형태를 보여주었고, 평균과 분산치는 검토된 위치에 따라 크기와 방향이 달라짐을 알 수 있었다. 또한 본 예제의 경우 불연속면의 미끄러짐은 수직과 회전변형에 비하여 불연속면강성값에 대한 민감도가 비교적 큰 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구결과를 이용하면 지하구조물의 거동에 대한 분포특성과악이 용이하기 때문에 허용변위와 허용강도에 대한 관계로부터 한계상태방정식을 구성하여 신뢰성지수(Reliability Index)를 계산할 수 있고, 이를 이용하여 신뢰성해석 및 최적지보설계가 가능하리라 판단된다. 그러나 암반구조물은 지질구조 및 특성에 따라서 불확실한 요인 등이 상당히 많고, 구조물의 기능에 따라서 안전성에 대한 요구조건 등이 크게 달라지기 때문에 국내에서 제시되고 있는 터널공사표준시방서에서도 아직까지는 허용변위와 허용응력에 대한 정량적인 기준이 설정되어 있지 않은 실정이다. 따라서 이와 관련하여 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Pande, G.N. Beer, G. and Williams, J.R., Numerical Methods in Rock Mechanics, John Wiley & Sons Ltd., p.327, 1990.
2. Iman, R.L. and Shortencarier, M.J., "A Fortran 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use with Computer Models," NUREG/CR-3624 SAND83-2365, 1984.
3. Goodman, R.E., Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West Pub. Co., St. Paul., p.449, 1976.
4. Kuo, S., Computer Applications of Numerical Methods, Tower Press, 1978, pp.327~345.
5. Abramowitz, M. and Stegun I.A., Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, Dover Pub., 1972.
6. Yamazaki, F., Shinozuka, M. and Dasgupta, G., "Neumann Expansion for Stochastic Finite Element Analysis," J. of Engineering Mechanics, Vol.114, No.8, ASCE, pp.1335-1353, 1988.
7. 최 규섭, 정 영수, 황 신일, "다확률변수를 고려한 불확정 지하구조계의 확률론적 유한요소해석", 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, pp.173-181, 1996.
8. Van Dillen, D.E. and Ewing, R.D., "BMINES - A Finite Element Code for Rock Mechanics Applications" 1981, pp.373~378.
9. Hoek, E. and Brown, E.T., Underground Excavation in Rock, Stephan Austin and Sons Ltd., London, p.527, 1980.

표 1 The distribution features of displacements at 4 representative points around cavern

	Vertical disp. at cavern crown point	Vertical disp. at cavern bottom	Horizontal disp. at cavern left side	Horizontal disp. at cavern right side
Mean(mm)	-0.966	1.991	1.435	-1.522
St. D.(mm)	± 0.312	± 0.301	± 0.300	± 0.309
Variance	0.322	0.151	0.211	0.203

표 2 The distribution features of behaviors at 4 representative joint elements

	Joint element A	Joint element B	Joint element C	Joint element D
Shear displ.(mm)	0.350 ± 0.207	0.427 ± 0.216	0.167 ± 0.193	0.245 ± 0.202
Normal displ.(mm)	-1.580 ± 0.763	-1.526 ± 0.748	-1.751 ± 0.752	-1.516 ± 0.733
Rotation(radian)	0.135 ± 0.006	-0.125 ± 0.007	0.129 ± 0.006	-0.119 ± 0.006

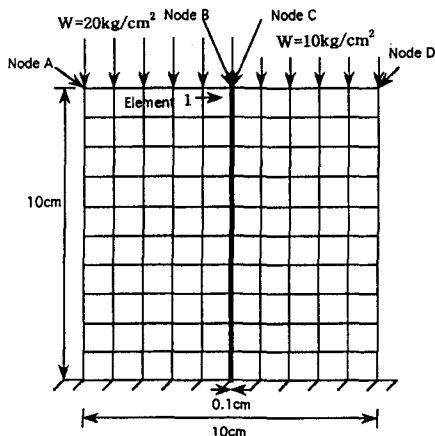


그림 1. 검증용 위한 해석모델

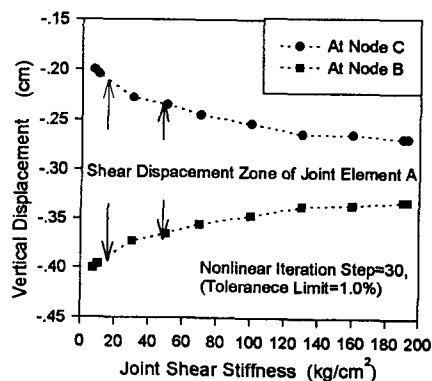
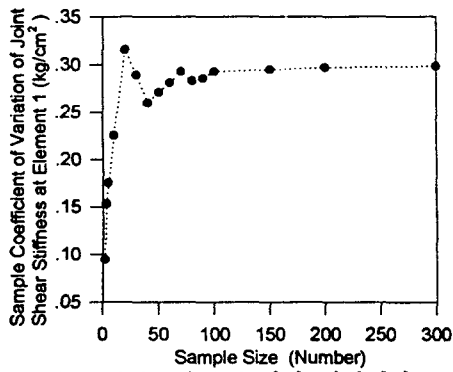
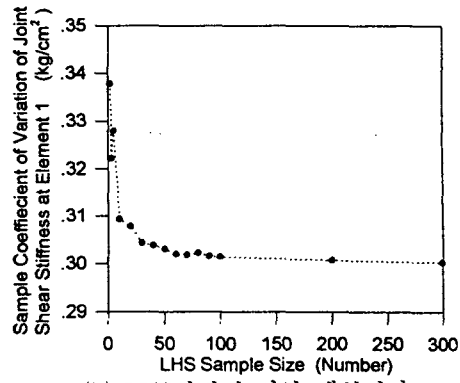


그림 2. 확정론적인 해석결과

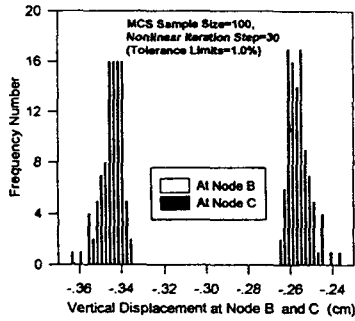


(a) 몬테칼로방법에 의한 해석결과

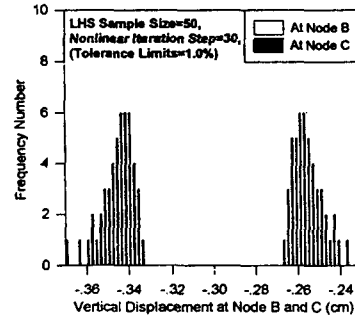


(b) LHS방법에 의한 해석결과

그림 3. 표본수증가에 따라 절리요소 1에서 표본추출한 전단강성에 대한 분산치



(a) 몬테칼로방법에 의한 해석결과



(b) LHS방법에 의한 해석결과

그림 4. 확률론적해석결과로부터 구한 B와 C점의 수직변위빈도분포

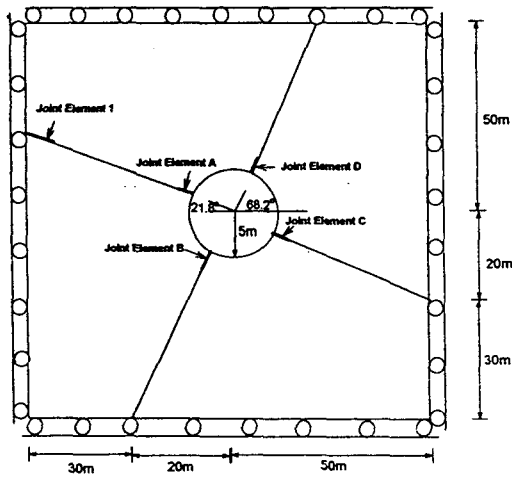
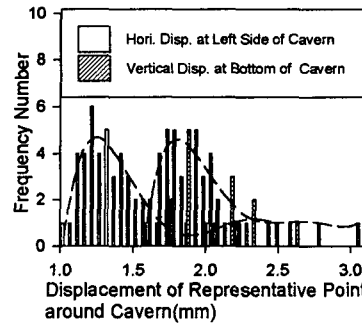
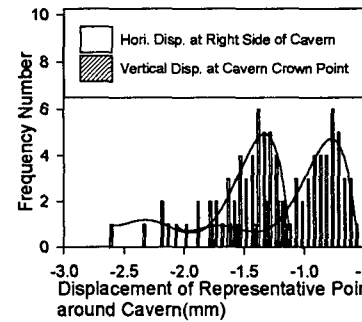


그림 5. 불연속암반체의 해석모델



(a) 동굴하단 및 좌측단에서의 변위빈도분포



(b) 동굴정점 및 우측단에서의 변위빈도분포

그림 6. 동굴주변의 4개 대표점에서의 변위빈도분포