

다확률변수를 고려한 불확정 지하구조계의 확률론적 유한요소해석

Stochastic Finite Element Analysis of Underground Structure Considering
the Multi-Random Variables in the Physical Properties of Rock mass

최 규섭*, 정 영수** 황 신일***
Choi, Kyu-Sup Chung, Yung-Soo Hwang, Shin-il

In this study, a stochastic finite element model is proposed with a view to consider the uncertainty of physical properties of rock mass in the analysis of structural behavior on underground caverns. Here, the Latin Hypercube Sampling technique, in which can make up weak points of the Monte Carlo Simulation, is applied for the analysis of underground cavern. The validity of the newly developed computer program has been confirmed in terms of verification examples. And, the applicability of the program to the field has been tested in terms of the analysis of the underground oil storage cavern in Korea.

1. 서 론

지하구조물의 안정성평가지 발생가능한 여러 불확실한 요인들중에서 수치해석결과의 신뢰성에 가장 큰 영향을 주는 요소는 수치해석에 필요한 입력자료의 부정확성과 부족한 암반물성자료라 할 수 있다. 그러나 현재까지 지하구조물의 현장에서 적용하고 있는 대부분의 수치해석과정에서는 이러한 암반물성의 불확실성을 반영하고 있지 않은 실정이다. 따라서 이러한 해석결과들은 암반물성의 분포와 편차를 무시하고 수행된 결과이기 때문에 대부분 실제 현상과 다른 경향을 보여 주게 되며, 때로는 과도한 지보설계를 유도하거나 때로는 시공중의 큰 폭의 설계변경을 요구하여 경제적인 손실을 초래하기도 한다. 따라서 지하암반구조물의 보다 합리적인 해석을 위해서는 암반물성의 불확실성을 합리적으로 고려할 수 있는 확률론적 수치해석모델을 이용하는 것이 바람직하다. 그러나 불행히도 불확정구조계의 확률론적 수치해석기법과 관련한 연구는 일부 지상구조물의 경우에만 적용되어 연구가 일부 진행되고 있는 실정이다. 더욱이 현재까지 확률론적 유한요소해석분야에 적용된 바 있는 섭동법이론이나 몬테칼로모사기법에서는 보다 정확한 결과를 산출하기 위해서 해석과정에 방대한 계산량을 요구하거나, 수식의 고차화로 인하여 수치모형화작업에 많은 어려움을 유발시키고 있다. 특히 몬테칼로모사기법을 사용할 경우에는 표본수를 증가시키면 비교적 정확한 해를 구할 수 있는 반면에 계산량이 방대해지는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 몬테칼로모사기법이 갖는 단점을 보완하여 비교적 적은 표본수를 사용하더라도 정확한 분포함수가 생성이 가능한 LHS기법을 적용하여 암반물성의 불확실성을 표현할 수 있는 지하구조물의 확률론적해석기법을 개발하였다. 해석에 고려된 확률변수는 암반의 탄성계수와 포아송비를 고려

* 한국 원자력 연구소 환경관리센터, 선임연구원 ** 중앙대학교 토목공학과, 부교수
*** 한국 원자력 연구소 환경관리센터, 토건설계실장

하였으며, 이들은 확률공간에서 정규분포, Log-Normal, 그리고 사각형균일분포일 경우로 가정하였다. 본 연구에서 작성된 해석프로그램은 단일확률변수를 갖는 몇가지 검증예제로부터 프로그램의 타당성을 확인하였으며, 이미 국내에서 굴착경험이 있는 지하원유비축시설에 대한 확률론적해석을 수행함으로써 본 해석기법의 현장적용성을 확인하였다.

2. 확률론적 유한요소해석의 이론적 고찰

2.1 불확정변수의 임의장생성

본 연구에서는 불확정변수의 분포함수를 생성하기 위해서 가상임의수(Pseudo random number)의 누적확률밀도함수로부터 분포형태의 Random Deviates를 산출하는 방법으로서 통계해석분야에 비교적 널리 사용하고 있는 것으로 알려진 승수나머지법(Power Residue Method)[1]과 역계산법(Inverse Method)[2]을 사용하였다. 이 방법에서는 0과 1사이 존재하는 가상임의수를 다음 식으로부터 생성한다.

$$U_{i+1} = (a \cdot u_i + c) \cdot (\text{mod } m) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

여기서, a 는 승수(multiplier), c 는 증분(increment), m 은 나머지 정수(modulus)로서 a, c, m 의 값은 양의 정수이다. L_i 이 $(a \cdot U_i + c)/m$ 의 정수부분이라면, 0과 1사이의 나머지부분은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$U_{i+1} = (a \cdot u_{i+1} + c - m \cdot L_i)/m \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

식 (2)는 0과 1사이에서 표준균일분포를 갖는 임의수의 집합으로서, m 을 충분히 큰 값을 사용하면, 생성에 대한 순환주기가 충분히 임의적인 가상임의수의 집합군을 얻을 수 있다.

임의 확률변수에 대한 분포함수의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function; CDF)가 $F_X(x)$ 이고, 확률변수 X 의 누적확률이 $F_X(x) = z$ 의 형태로 주어진 경우, 구하고자 하는 Random Deviates x 의 집합군은 역계산법을 사용하면 다음 식과 같이 표현된다.

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

식 (2)로부터 구한 가상임의수는 0과 1사이에서 균일분포형태이므로, 가상임의수의 누적분포함수와 확률변수의 누적분포함수를 1:1대응시키면 $z_i = u_i$ 가 되며, 다음 관계식이 성립된다.

$$F_U(u_i) = u_i \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

식 (4)에서 n 은 확률변수에 대한 표본수로써 0과 1사이에서 생성된 가상임의수의 크기와 동일하다. 가상임의수는 표본수를 충분히 크게 사용하지 않을 경우 0과 1사이에서 부분적으로 편중되어 표준균일분포형태를 표현하지 못하는 가능성이 있다. 따라서 생성하고자 하는 확률변수의 분포함수를 A 개의 구간으로 분할하여 각 구간에서 1개만의 가상임의수를 취하면 보다 합리적인 형태를 표현하는 분포함수를 생성할 수 있다. 이 경우 확률변수의 누적확률밀도함수의 발생확률은 1.0이므로 A 개 구간으로 분할하였을 경우 k 번째 구간의 Random deviates 발생확률은 다음 식과 같다.

$$P_k = U_k(1.0/A) + (k-1)(1.0/A) \quad k=1, 2, 3, \dots, A \quad (5)$$

확률변수가 두 개이상일 경우에는 한조의 임의수로서 두개 이상의 분포를 형성하기 때문에 생성된 Random deviates간의 통계적인 상관성이 존재한다. 본 연구에서는 생성된 Random deviates간의 독립성을 검토하기 하기 위해서 LHS기법에서 널리 사용하고 있는 다음과 같은 상관계수를

사용하였다[3].

$$\rho_{12} = \frac{\sum_{i=1}^k (S_{x_i} - \frac{n+1}{2})(S_{x_2} - \frac{n+1}{2})}{\left\{ \sum_{i=1}^k (S_{x_i} - \frac{n+1}{2})^2 \sum_{i=1}^k (S_{x_2} - \frac{n+1}{2})^2 \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

여기서, S_{x_i} 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 1이하 정도의 크기를 갖게 되면 임의수생성(Random number sampling)은 비교적 합리적인 것으로 알려져 있다[3].

2.2 재료특성의 확률장

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

$$E_i(x_j) = E_{i_0,j}(1 + g_i(x_j)) \quad i=1,2,3,\dots,m, j=1,2,3,\dots,n \quad (7)$$

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 임의요소내에서의 확률변수의 기대값(평균)이고, $g_i(x_j)$ 는 j 번째 확률변수에 대한 분포형태를 나타내는 임의장함수이다.

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

$$R_j(\xi) = E_i(g(x)_j \cdot g(x + \xi)_j) \quad (8)$$

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

확률변수의 임의성이 확률공간에서 등방성이라면, 식 (8)의 자기상관함수는 요소중심간의 거리 ξ 만의 함수로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 확률공간에서의 임의장함수를 등방성으로 가정하였으며, 이때 다음 식과 같은 자기상관함수를 사용하였다.

$$R_j(\xi) = \sigma_j^2 \text{EXP}\left[-\left(\frac{|\xi|}{d}\right)^2\right] \quad (9)$$

여기서, σ_j 는 확률변수에 대한 분포함수의 표준편차를 나타내고, d 는 상관관계거리로서 인접요소중심간의 거리에 따른 상관관계의 감소정도를 나타내며, 이 값이 클수록 상관성은 적어진다[4].

암반의 물성들을 확률변수로 사용하여 유한요소의 크기를 m 개로 분할하였을 경우, 모든 요소에서의 재료특성이 확률론적인 등방성을 갖는다면, 분포특성을 나타내는 식 (7)의 $g_i(x)$ 는 평균값으로부터 분산된 m 개의 값으로 구성되며, m 개의 값은 서로 상관성을 갖는다. 이들의 상관성은 모든 요소에 대하여 식 (9)로부터 계산하여 공분산행렬(Covariance Matrix) Cov_j 을 구성함으로써 다음 식과 같은 형태로 구성할 수 있다.

$$(c_{x,y})_i = Cov_j[g_X, g_Y]_i = E_j[g_X, g_Y]_i = R_j(\xi_{x,y})_i \quad (10)$$

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.

$$G_j(x, Cov)_i = Cov_j[g_X, g_Y]_i \cdot [x_u]_j \quad (11)$$

여기서, $Cov_j[g_X, g_Y]_i$ 는 식 (10)으로부터 계산된 공분산행렬이며, $[x_u]_j$ 는 식 (4)로부터 계산된 Random deviates의 집합이다.

2.3 확률론적 유한요소해석

본 연구에서는 확률론적유한요소해석과정에서 일정변형도삼각형요소와 등매개변수사각형요소를 사용하였다. 암반의 탄성계수와 포아송비를 확률변수로 고려할 경우에 i 번째 요소의 요소강성도행렬 $[K]$ 와 응력-변형도관계를 나타내는 재료특성행렬 $[C]$ 는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} [C]_i &= [C]_{i0}(1 + g_i(E, \nu)) \\ [K]_i &= [K]_{i0}(1 + g_i(E, \nu)) \end{aligned} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (12)$$

여기서, $[C]_{i0}, [K]_{i0}$ 는 다음 식으로부터 정의되는 재료특성행렬과 요소강성도행렬에서 확률변수의 평균값을 사용한 행렬을 의미한다.

$$[C] = 1/m \begin{bmatrix} E - E\nu^2 & E\nu^2(1 + \nu) & 0 \\ E\nu^2(1 + \nu) & E(1 - \nu^2) & 0 \\ 0 & 0 & Gm \end{bmatrix} \quad (12a)$$

$$m = (1 + \nu)[1 - \nu - 2 \cdot \nu^2] \quad (12b)$$

$$[K]_{Tn} = \int_A [B]^T [T_\epsilon]^T [C] [T_\epsilon] [B] dA \quad (12c)$$

$$[K]_{Quad} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [C] [B] J d\xi d\eta \quad (12d)$$

여기서, $[K]_{Tn}, [K]_{Quad}$ 는 각각 일정변형도 삼각형요소와 등매개변수사각형요소의 강성도행렬을 의미하며, $[B]$ 는 각 요소의 변위-변형도관계를 나타내는 행렬이다.

3. 확률론적 유한요소해석프로그램의 검증

본 연구에서 개발한 지하구조물의 확률론적 해석프로그램의 검증작업을 위해서 Fig. 1에 나타난 구조물에 대하여 탄성계수의 변이를 고려한 확률론적인 구조해석을 수행하였다. Fig. 1은 Yamazaki 등[4]이 제시한 평면응력조건의 구조물로서, 포아송비가 0일 경우에는 본 연구에서 고려하고 있는 평면변형조건은 평면응력조건과 동일하게 되기 때문에 본 예제에 대한 해석결과는 Yamazaki 등의 결과와 비교가 가능하다. Yamazaki 등은 Fig. 1의 구조물에 대하여 몬테칼로모사기법을 사용하여 탄성계수의 분포가 정규분포형태일 경우에 이를 재래적인 100개의 사각형요소로 모형화하여 확률론적 거동을 평가한 바 있다. 본 예제에서는 이와 동일한 조건을 갖는 구조물에 대하여 본 연구로부터 제시한 프로그램을 사용하여 동일한 해석을 수행하고, 두 결과를 비교하였다. 해석에 고려된 탄성계수는 평균값이 100kg/cm^2 이고, 표준편차는 평균값의 30%인 정규분포함수를 사용하였다. 본 프로그램에서는 삼각형요소와 4각형요소를 모두 사용하고 있기 때문에 사각형요소는 Yamazaki 등이 제시한 모델과 같은 크기의 요소수로 모형화하였으며, 삼각형요소의 경우에는 Fig. 2와 같은 형태의 200개요소로써 분할하였다. Fig. 1의 해석모델에 대하여 다양한 표본수를 사용하여 추출한 요소 96(요소 A)에서의 탄성계수의 분포는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3

에서 알 수 있는 바와 같이 요소 96에서 추출한 탄성계수의 분포형태는 입력으로 정의한 정규분포의 형태를 대체적으로 잘 표현하고 있으나, LHS기법을 사용하였을 경우가 몬테칼로모사기법을 사용할 경우에 비하여 분포의 매끄러움을 보여준다. 본 예제에서 사각형요소를 사용하였을 경우 40개의 LHS표본으로부터 구한 요소 A에서의 탄성계수는 평균값이 대략 98.9kg/cm^2 이고, 표준편차는 대략 30.3kg/cm^2 로써 입력으로 정의한 정규분포와 대략 1.0%이내의 차이를 보여주었다. 그러나 같은 요소에 대하여 150개의 MCS표본수를 사용하였을 경우에는 평균값이 대략 93.1kg/cm^2 이고, 표준편차는 대략 27.8kg/cm^2 로써, 입력으로 정의된 분포함수와 대략 10.0%정도의 차이를 보여주었으며, 40개의 MCS표본수를 사용하였을 경우에는 입력으로 정의한 분포함수와 대략 20.0%정도의 차이를 보여주었다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 제시한 확률론적인 해석기법은 재래적인 몬테칼로모사기법을 사용할 경우보다 더 적은 표본수를 사용하더라도 분포함수의 형태를 정확히 표현하고 있음을 알 수 있다. 다음은 암반의 탄성계수변이를 고려한 해석으로부터 구한 절점 121에서의 수직변위분포변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4로부터 절점 121에서 발생한 수직변위의 분포형태는 유사함을 보여주고 있으나, 몬테칼로방법에 의한 해석결과는 LHS방법으로부터 구한 해석결과에 비하여 분포형태가 대체적으로 불규칙함을 보여주고 있다. 본 예제에서, 사각형요소를 사용하여 몬테칼로방법으로부터 구한 절점 121에서의 수직변위분포는 150개의 표본수를 사용하였을 경우 평균이 대략 -0.108cm 이고, 표준편차는 0.014cm 이며, 40개의 표본수를 사용하였을 경우에는 평균이 대략 -0.104cm , 표준편차는 대략 0.011cm 정도로 발생하였다. 그러나 LHS방법으로부터 구한 절점 121에서의 수직변위분포는 150개의 표본수를 사용하였을 경우가 평균값이 대략 -0.116cm 이고 표준편차는 대략 0.07cm 이며, 40개의 표본수를 사용하였을 경우가 평균값이 대략 -0.115cm 이고, 표준편차는 0.06cm 정도로 발생하였다. 동일한 모델에 대하여 입력으로 정의한 정규분포된 탄성계수의 99.9%의 구간에서 균등분할된 20개의 탄성계수를 사용하여 20번의 확률론적인 해석결과로부터 구한 절점 121의 수직변위를 확률론적인 해석결과와 비교한 결과 LHS방법에 의하여 구한 변위값이 보다 더 실제적인 값을 알 수 있었다.

4. 지하원유비축시설의 해석에

본 연구에서 제시한 해석기법을 사용하여 국내 건설경험이 있는 지하원유비축시설에 대하여 암반물성변이를 고려한 확률론적인 구조해석을 수행하였다. 해석에 고려된 암반동굴구조는 동굴에 대한 폭이 18m이고, 높이가 30m인 대형 구조물로써, 해석모델은 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 해석에 고려된 암반물성은 현장시험과 실내시험으로부터 제시된 자료를 이용하였다. 현장에서 시추한 대략 70개시편에 대한 실내시험결과로부터 구한 암반의 탄성계수는 평균값이 대략 $6.9 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 표준편차가 1.7×10^5 인 정규분포형태를 보여주었으며, 포아송비는 평균값이 대략 0.26, 표준편차가 0.054인 정규분포형태를 보여주었다. 그러나 같은 부지내의 대략 50개의 위치에서 현장시험으로부터 제시된 탄성계수의 분포는 평균값이 대략 $5.77 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 표준편차가 대략 $2.11 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 로써 분포형태는 매우 불규칙함을 보여주었다. 따라서 본 예제에서는 암반의 탄성계수와 포아송비가 정규분포일 경우에 동굴주변에서 발생하는 거동변화를 검토하였다. 이때 포아송비의 평균과 분산치는 실내시험결과로부터 제시된 값을 사용하였고, 탄성계수의 평균값은 현장시험으로부터 측정된 물성값 $5.77 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 을 사용하였으며, 표준편차는 평균값의 30%로 가정하였다. 또한 해석시 Fig. 5와 같이 240개의 4절점요소를 사용하였으며, 현지로부터 측정된 수평토압계수로부터 초기응력의 수평성분을 계산하고, 암반의 자중만을 고려하여 하중을 입력하였다.

Fig. 5의 해석모델에 대하여 암반의 탄성계수와 포아송비가 정규분포일 경우에 50개의 LHS표

본으로부터 추출한 요소 1에서의 탄성계수와 포아송비의 분포는 Fig. 6에 나타난 바와 같다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 요소 1에서 표본추출한 탄성계수와 포아송비의 분포는 대체적으로 정규분포형태를 합리적으로 표현하고 있음을 알 수 있다. 본 예제의 경우 요소 1에서 표본추출한 탄성계수와 포아송비의 분포는 평균값과 평균에 대한 분산치가 입력으로 정의한 탄성계수와 포아송비의 경우와 대략 1.0%이내의 차이를 보여주었다.

Fig. 5의 해석모델에 대하여 암반물성변이를 고려한 해석으로부터 구한 동굴정점과 동굴저변의 중앙점에서의 수직변위분포와 동굴상부면과 측벽이 만나는 A,B점에서의 수평변위분포는 Fig. 7에 나타내었다. 그림의 결과로부터 동굴주변대표점에서의 변위빈도분포는 대체적으로 정규분포 또는 로그정규분포형태를 보여주고 있다. 본 해석에서 동굴정점에서의 수직변위분포는 평균값이 대략 2.1mm이고, 표준편차는 0.94mm이며, 대체적으로 1.0~3.5mm주변에서 밀집된 경향을 보여주고, 동굴저변중앙점에서의 수직변위분포는 평균값이 1.54mm이고, 표준편차는 0.71mm이며, 대략 0.5~2.5mm주변에서 밀집된 경향을 보여주었다. A점과 B점에서의 수평변위분포는 해석모델, 하중조건, 구속조건에 대한 기하학적인 대칭성으로 인하여 좌우가 방향이 반대인 같은 크기로 발생하였으며, 평균값은 대략 1.16mm, 표준편차는 대략 0.96mm의 크기로 발생하였다. 본 예제에 대한 확률론적인 해석으로부터 구한 동굴주변의 대표적인 4개점에서의 변위빈도분포를 검토한 결과 평균값에 대한 분산치는 동굴정점과 A,B점이 대략 44.7%이며, 저변중앙점은 46.2%정도이다.

본 연구에서 고려한 지하원유비측시설은 4단계의 굴착으로 수행되었다. 계측작업은 원유저장동굴의 상부에 위치한 수벽공의 굴착이 완료된 시점으로부터 단계별굴착시 부분적으로 측정된 자료들이 제시되고 있으나[5,6], 대부분의 경우 계측기의 설치는 굴착이 이미 완료된 상태에서 수행되기 때문에 굴착즉시 발생하는 초기변형은 반영되지 않은 결과이다. 그러나 본 연구에서 고려한 지하원유저장동굴에 대하여 현장에서 수행하거나 수행중인 계측자료를 이용하면 동굴정점에서의 연직변위는 Gallery굴착후 하향으로 0.47~0.92mm, Bench1굴착후 대략 0.2mm, Bench2굴착후 대략 0.1mm정도의 크기로 발생함을 알 수 있었다. 또한 Bench 3의 굴착후 측정된 AB점간의 내공변위는 동굴내부방향으로 대략 5.5mm정도로 발생하였다. 본 연구에서 수행한 결과와 계측결과를 정확히 비교하기 위해서는 굴착의 전 과정에서 측정된 계측결과가 활용되어야 하며, 수벽공을 포함한 대형 3차원 해석과정이 필요하지만, 계측치로부터 구한 변위의 방향과 정량적인 크기를 고려할 때 본 연구의 결과는 비교적 합리적임을 알 수 있다. 본 예제에 대한 해석결과로부터 구한 동굴정점에서의 수직변위는 방향과 크기가 계측결과와 유사함을 보여주었으나, 동굴상부면과 측벽이 만나는 점에서의 수평변위경우에는 계측결과가 해석결과보다 더 큰 값으로 발생함을 알 수 있다. 그러나 이러한 계측결과는 Bench2굴착으로 인하여 초기응력의 이완이 이미 발생한 상태에서 Bench3의 굴착과정에서 측정된 내공변위이기 때문에 본 연구에서 제시하고 있는 프로그램에 굴착/제거 기능을 추가시켜 해석에 반영한다면 보다 현실적인 결과를 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

지하암반동굴에 대한 대부분의 지보설계는 건설단계이전에 RMR이나 Q방법[7] 등과 같은 경험적인 방법으로 설계되며, 건설이전 단계에서는 암반물성을 포함한 여러 불확실한 요인들로 인하여 정확한 거동을 예측하기가 어려운 실정이다. 그러나 본 연구에서 제시한 방법을 설계단계에서 적용할 경우에는 굴착후 동굴주변에서 발생하는 거동의 최대값과 최소값, 평균값 및 분산치 등을 합리적으로 계산할 수 있기 때문에 보다 정량적인 개념의 지보설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한 현장암반에서의 강도분포특성이 파악된다면, 이들 결과로부터 제시되는 거동응답에 대한 표준편차로부터 신뢰성지수를 쉽게 계산할 수 있으며, 이 값을 신뢰성해석에 반영함으로써, 보다 합리적인 안전율을 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 LHS기법을 사용하여 불확정지하구조에서의 다확률변수를 고려할 수 있는 확률론적유한요소해석기법을 제시하였다. 본 연구결과를 몬테칼로모사기법에 의한 해석결과와 다수의 확정론적인 해석결과들과 비교함으로써 프로그램의 타당성을 검증하였으며, 국내의 현장에서 건설경험이 있는 지하원유비축시설에 적용함으로써 현장 적용성을 확인하였다. 본 연구에서 제시하고 있는 LHS기법은 확률론적 유한요소해석분야에서는 첫 번째의 적용이며, 아울러 기존에 이 분야에서 널리 사용되고 있는 몬테칼로모사기법에 비하여 계산량과 계산시간측면에서 많은 장점을 갖고 있기 때문에 많은 분야에 활용이 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 제시된 해석기법을 실제 현장에 보다 더 현실적으로 적용하기 위해서는 단계별 굴착으로 인한 응력의 이완현상, Shotcrete 등의 모형화를 위한 보요소 등에 대한 기능이 추가되어야 할 것으로 판단된다. 아울러 지하압반구조체의 거동에 많은 영향을 줄 수 있는 불연속면물성과 지하수특성을 확률변수로 고려할 경우에 대한 추가보완작업이 계속 수행되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] S. Kuo, Computer Applications of Numerical Methods, pp.327~345, 1978.
- [2] M. Abramowitz and I.A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, Dover Pub., 1972.
- [3] R.L. Iman, M.J. Shortencarier, "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.
- [4] F. Yamazaki, M. Shinozuka and G. Dasgupta, "Neumann Expansion for Stochastic Finite Element Analysis," Journal of Engineering Mechanics, Vol.114, No.8, ASCE, 1988.
- [5] 삼립컨설턴트(주), "○○비축기지 조사설계용역 기본설계보고서," 제 1,2권, 1991.
- [6] 현대건설(주) 기술연구소, "○○비축기지 제측 및 굴착거동(3)-수정제측-," 92GE 003, pp.34~43, 1994.
- [7] E. Hoek and E.T. Brown, Underground Excavation in Rock, Stephan Austin and Sons Ltd, London, 1980.

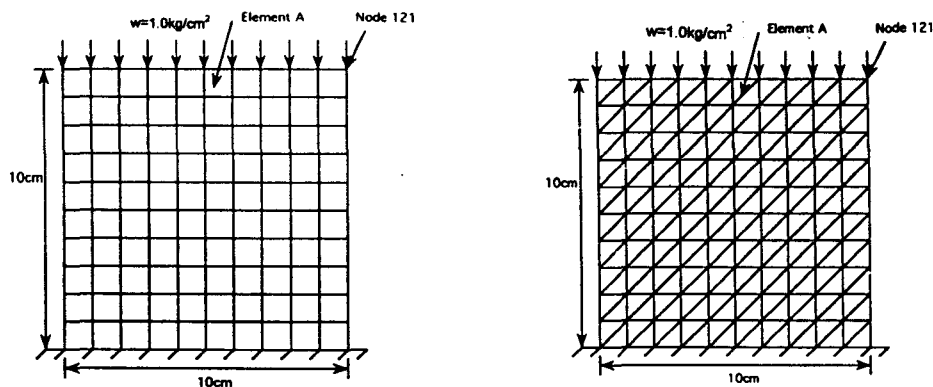


Fig. 1 A Model suggested by Yamazaki et al. Fig.2 Verification Model with 3-node elements

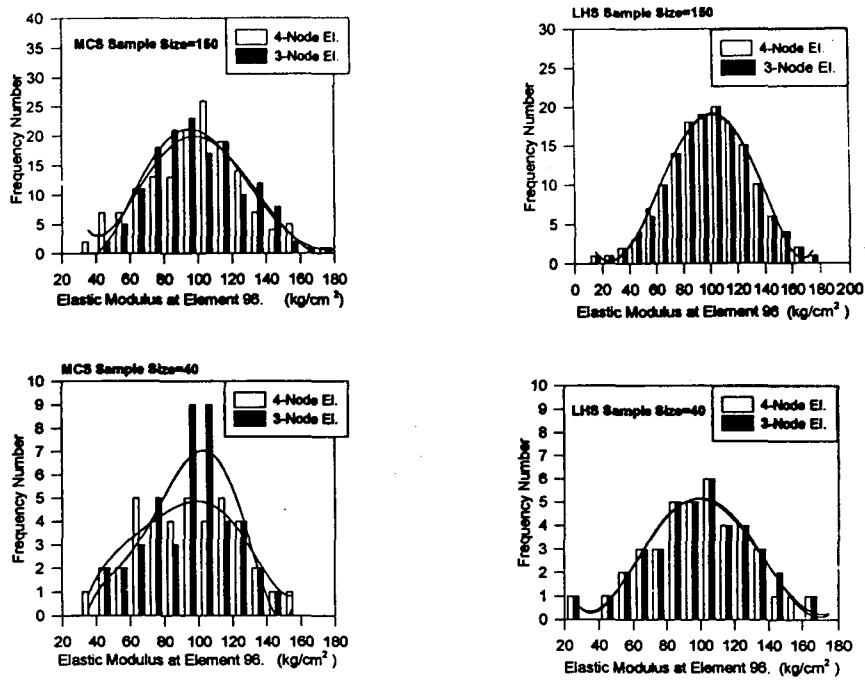


Fig. 3 Comparison of LHS results with MCS results about E of sampled at element 96

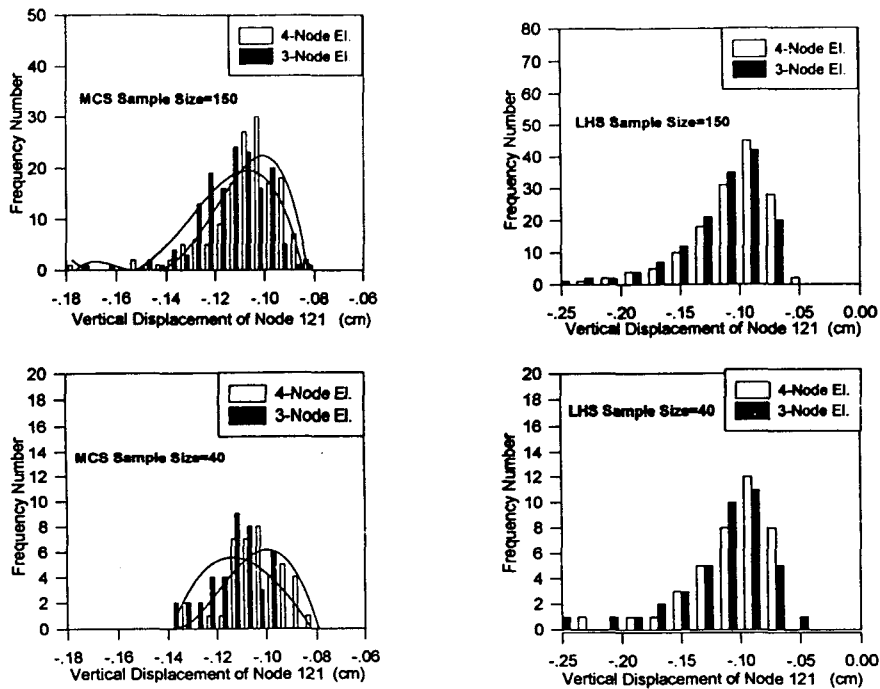
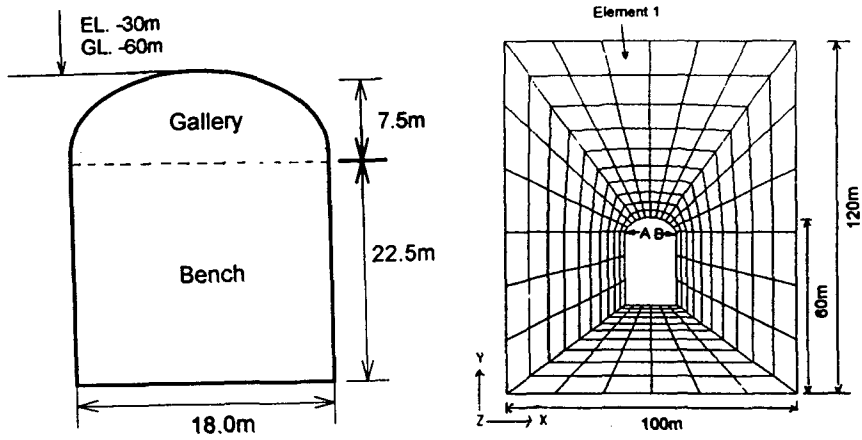
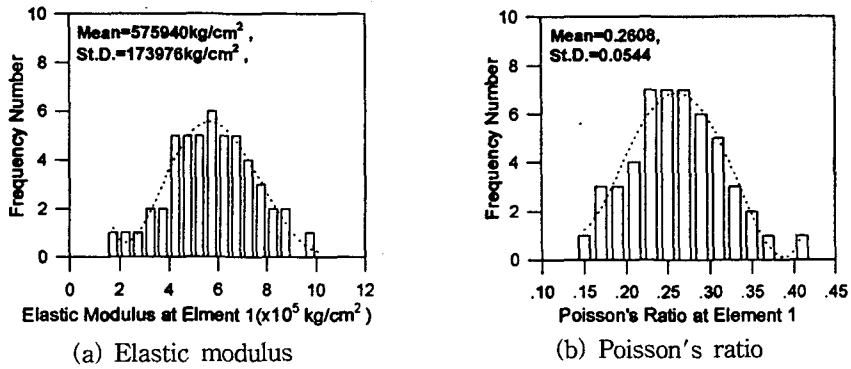


Fig. 4 Comparison of LHS results with MCS results about vertical displacement at node 121



(a) Cavern structure (b) Analysis model of oil storage cavern

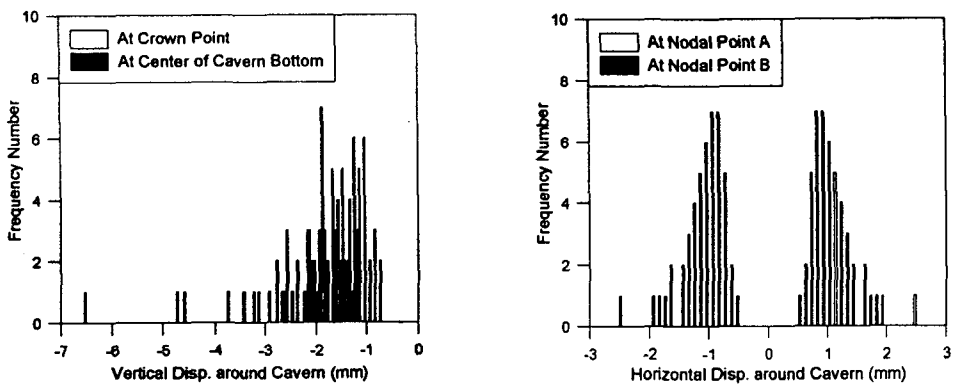
Fig. 5 A analysis model for the underground oil storage cavern



(a) Elastic modulus

(b) Poisson's ratio

Fig. 6 The distribution features of elastic modulus and poisson's ratio sampled at elment 1



(a) In case of vertical displacement

(b) In case of horizontal displacement

Fig. 7 The Displacement distribution of representative points around cavern