

## 수치해석과 연계한 지하구조물의 확률론적 신뢰성 평가를 위한 점추정법의 적용성에 관한 비교 연구

박도현<sup>1)</sup>, 김형목<sup>1)\*</sup>, 류동우<sup>1)</sup>, 최병희<sup>2)</sup>, 한공창<sup>2)</sup>

### Comparative Study on the Applicability of Point Estimate Methods in Combination with Numerical Analysis for the Probabilistic Reliability Assessment of Underground Structures

Dohyun Park, Hyung-Mok Kim, Dong-Woo Ryu, Byung-Hee Choi, Kong-Chang Han

**Abstract** Point estimate method has a less accuracy than Monte Carlo simulation that is usually considered as an exact probabilistic method, but this method still remains popular in probability-based reliability assessment in geotechnical and rock engineering, because it significantly reduce the number of sampling points and produces the statistical moments of a performance function in a reasonable accuracy. In the present study, we investigated the accuracy and applicability of point estimate methods proposed by Rosenblueth and Zhou & Nowak by comparing the results of these two methods with those of Monte Carlo simulations. The comparison was carried out for the problem of a lined circular tunnel in an elastic medium where an closed-form analytical solution is given. The comparison results showed that despite the non-linearity of the analytical solution, the statistical moments calculated by the point estimate methods and the Monte Carlo simulations agreed well with an average error of roughly 1-2%. This average error demonstrates the applicability of the two point estimate methods for the probabilistic reliability assessment of underground structures in combination with numerical analysis.

**Key words** Point estimate method, Probabilistic method, Reliability assessment, Probability of failure, Underground structure

**초 록** 점추정법은 exact probabilistic method로 간주되는 Monte Carlo simulation에 비해 계산의 정확도는 다소 떨어지지만, 성능함수의 통계 모멘트를 분석하기 위한 샘플링 수를 크게 줄일 수 있는 해석 과정에서의 간편함과 비교적 정확한 통계 모멘트의 계산으로 인해 지반 및 암반공학에서의 확률론적 신뢰성 평가에 자주 사용되고 있다. 본 연구에서는 Rosenblueth와 Zhou & Nowak의 점추정법과 Monte Carlo simulation의 계산 결과를 비교 분석하여 점추정법의 정확도와 적용성을 조사하였다. 비교 분석은 해석적 해가 주어진 탄성 지반내 원형터널의 라이닝 지보 문제를 대상으로 하였다. 분석 결과, 해석적 해가 비선형 함수임에도 불구하고, 점추정법과 Monte Carlo simulation에 의해 계산된 통계 모멘트가 평균 약 1-2%의 오차를 보여 수치해석과 연계한 지하구조물의 확률론적 신뢰성 평가를 위한 점추정법의 적용성을 확인하였다.

**핵심어** 점추정법, 확률론적 기법, 신뢰성 평가, 파괴 확률, 지하구조물

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

\* Corresponding Author: kimh@kigam.re.kr

Tel: +82-42-868-3265

Address: KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon,  
305-350 Korea

Received: March 12, 2012

Revised: March 30, 2012

Accepted: March 30, 2012

## 1. 서론

구조물의 신뢰성을 평가하기 위한 확률론적 해석 기법에는 수식으로 표현된 시스템의 성능함수를 이용하는 분석적 근사 기법(analytical approximation method)과 입력 확률변수의 샘플링을 통해 성능함수의 통계 모멘트를 구하는 샘플링 기법(sampling-based method)으로

분류된다. 샘플링 기법에는 입력 확률변수의 전 범위에 걸쳐 난수를 발생시켜 시스템의 안정성을 평가하는 시뮬레이션 기법(Monte Carlo simulation(MCS), Latin hypercube sampling, important sampling 등)과 특정 샘플링 점들에 대한 해석결과와 가중치를 이용하는 점추정법(point estimate method, PEM)이 있다.

박도현 외(2010)에 따르면, 일반적으로 수치해석으로부터 수식화된 성능함수를 예측하는 것은 어렵기 때문에 분석적 근사 기법은 수치해석과 연계한 지하구조물의 신뢰성 평가에 적절하지 않고, 또한 시뮬레이션 기법은 입력 확률변수에 대해 많은 양의 샘플링 수를 요구하므로 수치해석과 연계한 지하구조물의 신뢰성 평가에 효율적이지 못하다. 반면 점추정법은 수식화된 성능함수를 요구하지 않고, 입력 확률변수의 특정 샘플링 점을 이용하여 성능함수의 통계 모멘트를 구하므로 시뮬레이션 기법과 같이 방대한 계산횟수를 요구하지 않는다. 한편 Bucher 외(2000)에 따르면, 시뮬레이션 기법은 계산의 정확도는 가장 높으나 수치계산의 효율은 가장 낮고, 분석적 근사 기법인 일계이차모멘트법(first order second moment method)은 수치계산 효율은 가장 높으나 계산 정확도는 가장 낮으며, 점추정법의 계산 정확도와 수치계산 효율은 시뮬레이션 기법과 일계이차모멘트법의 중간 정도이다. 따라서 점추정법은 수치해석과 연계하여 지하구조물의 신뢰성을 평가하기 위한 실용적인 기법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 계산 효율 측면에서 유리한 Rosenblueth(1975)의  $2n+1$  점추정법과 Zhou & Nowak(1988)의  $2n$  점추정법의 적용성(applicability)을 Monte Carlo simulation의 계산 결과와 비교 분석하여 조사하였다. 비교 분석은 해석적 해(analytical solution)가 주어진 원형터널의 라이닝 지보 문제를 대상으로 수행되었다. 참고로 Park 외(2012)는 Rosenblueth(1975)의  $2n+1$  점추정법과 FLAC2D(Itasca)를 연계한 확률론적 터널 지보 시스템 신뢰성 평가를 위해 TunnelIRA라는 프로그램을 개발하였고, 개발 프로그램을 이용하여 본 연구의 원형터널 라이닝 지보 문제를 분석한 바 있다.

## 2. 적용 점추정법

### 2.1 점추정법 개요 및 특징

점추정법은 Rosenblueth(1975)가 개발한 확률해석 기법으로 한 개의 랜덤변수에 대해 2개의 샘플링 점을 이용한  $2^n$  법과  $2n+1$  법이 제안되었다( $n$ 는 랜덤변수의 개수).  $2^n$  법은 확률변수간의 상관성(correlation)을 고려할 수 있는 기법으로  $2^n$ 번의 샘플링 작업이 필요하고,

$2n+1$  법은 입력 확률변수들이 통계적으로 독립적인 경우  $2^n$  법의 대안으로 적용할 수 있는 기법으로  $2n+1$  번의 샘플링 작업이 필요하다. Rosenblueth  $2^n$  법은 랜덤변수들간의 상관성을 고려할 수 있으나,  $2n$ 번의 샘플링 작업이 필요하므로 랜덤변수의 개수,  $n$ 이 증가함에 따라 샘플링 수가 급격히 증가하는 단점이 있다.

Lind(1983), Zhou & Nowak(1988), Harr(1989), Hong(1988) 등은 위와 같은 Rosenblueth  $2^n$  법의 문제점을 개선한  $2n$  법( $2n$  번의 샘플링 필요)을 제안하였다. 그러나 이들이 제안한 점추정법은 입력 랜덤변수의 개수가 증가함에 따라 각 랜덤변수의 평균으로부터 멀리 떨어진 위치에서 샘플링이 되는 문제점이 있다. 이는 샘플링 점을 계산하는 수식이  $\sqrt{n}$ 에 비례하기 때문이며, 랜덤변수의 개수,  $n$ 이 커짐에 따라 각 랜덤변수의 평균으로부터 멀리 떨어져 랜덤변수의 통계분포를 대표할 수 없는 영역에서 샘플링되거나, 물리적으로 의미없는 값(예, 음(-)의 물성값)들이 샘플링 될 수 있다. 이러한 특징으로 인해 성능함수의 통계 모멘트가 과대 또는 과소 평가될 수 있는 문제점이 있다.

위에서 언급한대로 Rosenblueth  $2^n$  법은 랜덤변수의 개수가 증가함에 따라 샘플링 수가 급격히 증가하므로 수치해석과 연계한 지하구조물의 확률론적 신뢰성 평가에 실용적이지 못하다. 또한 지반 매개변수(변형계수, 점착력, 내부마찰각 등)나 지보 매개변수(숏크리트 및 콘크리트 라이닝 변형계수, 록볼트의 그라우트 물성 등)들이 통계적으로 서로 상관성이 있더라도, 그 상관성을 정량적으로 평가하기 어렵기 때문에 매개변수들이 통계적으로 서로 독립적이라고 가정하거나, 상관 변수(correlated variable)들을 Rosenblatt(1952)가 제안한 기법 등을 이용하여 독립적인 변수들로 변환하여 적용하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 랜덤변수들이 통계적으로 독립적인 경우에 적용할 수 있는 Rosenblueth  $2n+1$  법과 Zhou & Nowak  $2n$  법을 대상으로 그 적용성을 조사하였다.

### 2.2 Rosenblueth $2n+1$ 법

Rosenblueth  $2n+1$  법은 입력 랜덤변수들간의 상관성을 고려하지 않는 점추정법으로서 성능함수,  $G=G(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$ 의 통계 모멘트는 곱셈공식(product formula) 형태인 식 (1)과 (2)에 의해 계산된다. 식 (1)과 (2)에서  $i$ 번째 랜덤변수,  $X_i$ 에 대한 두 개의 샘플링 점들은  $(\mu_{X_i} - \sigma_{X_i})$ 와  $(\mu_{X_i} + \sigma_{X_i})$ 으로서 2.1절에서 언급한대로 랜덤변수의 개수와 무관한 것을 알 수 있다( $\mu$ 와  $\sigma$ 는 평균과 표준편차 임).

$$\frac{\bar{G}}{g} \approx \frac{\bar{G}_1}{g} \frac{\bar{G}_2}{g} \dots \frac{\bar{G}_i}{g} \dots \frac{\bar{G}_n}{g} \quad (1)$$

$$1 + V_G^2 \approx (1 + V_{G1}^2)(1 + V_{G2}^2) \dots (1 + V_{Gi}^2) \dots (1 + V_{Gn}^2) \quad (2)$$

여기서  $\bar{G}$ 는 성능함수  $G$ 의 평균값,  $g$ 는 모든 랜덤변수의 평균값을 적용했을 때 성능함수 값,  $\bar{G}_i$ 는  $i$ 번째 랜덤변수( $X_i$ )만 샘플링 값을 적용하여 구한 성능함수의 평균값(나머지 랜덤변수는 평균값 적용),  $V_G$ 는 성능함수  $G$ 의 변동계수, COV(coefficient of variation) 값( $= \sigma_G / \mu_G$ ),  $V_{Gi}$ 는  $i$ 번째 랜덤변수만 샘플링 값을 적용하여 구한 성능함수의 COV 값,  $\mu$ 와  $\sigma$ 는 평균과 표준편차를 나타낸다.

### 2.3 Zhou & Nowak 2n 법

Zhou & Nowak 2n 법 또한 입력 랜덤변수들간의 상관성을 고려하지 않는 점추정법이고, 곱셈공식 형태인 Rosenblueth 2n+1 법과는 달리 성능함수의 통계 모멘트가 곱셈공식 형태가 아닌 식 (5)-(6)에 의해 계산된다. 성능함수의 랜덤변수들은 식 (3)과 같이 표준 정규화된 변수(standard-normalized variable)로 표현되고 샘플링 점들은 식 (4)에 의해 계산된다. 성능함수의 평균 및 분산은 식 (5)와 (6)을 통해 계산된다.  $i = j$  일 때, 표준 정규화된 샘플링 점들은  $(0, \dots, \sqrt{n}, \dots, 0)$ 와  $(0, \dots, -\sqrt{n}, \dots, 0)$ 으로서 2.1절에서 언급한대로 샘플링 점들의 값들이  $\sqrt{n}$  ( $n$  = 입력 랜덤변수의 개수)에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$G = G(z_1, \dots, z_i, \dots, z_n) = G\left(\frac{X_1 - \mu_{X1}}{\sigma_{X1}}, \dots, \frac{X_i - \mu_{Xi}}{\sigma_{Xi}}, \dots, \frac{X_n - \mu_{Xn}}{\sigma_{Xn}}\right) \quad (3)$$

$$Z_j = -Z_{n+j} = (Z_{1j}, \dots, Z_{ij}, \dots, Z_{nj}) \quad (4)$$

$$\bar{G} = E[G] \approx \sum_{j=1}^{2n} w_j G(z_{1j}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{nj}) \quad (5)$$

$$\sigma_G^2 \approx \sum_{j=1}^{2n} w_j G^2(z_{1j}, \dots, z_{ij}, \dots, z_{nj}) - (\bar{G})^2 \quad (6)$$

여기서  $G$ 는 성능함수,  $k$ 는 지수,  $w_j$ 는  $j$ 번째 랜덤변수에 대한 가중치,  $z_{ij}$ 는  $j$ 번째 랜덤변수를 샘플링할 때  $i$ 번째 랜덤변수의 값( $= \sqrt{n}$  for  $i = j$ ,  $0$  for  $i \neq j$ ),  $\bar{G}$ 는 성능함수  $G$ 의 평균값,  $\sigma$ 는 표준편차,  $n$ 은 입력 랜덤변수의 개수를 나타낸다.

### 3. 지하구조물의 확률론적 신뢰성 평가를 위한 점추정법의 적용성 분석

본 연구에서는 Einstein & Schwart(1979)가 제안한 탄성 지반내 원형터널의 라이닝 지보에 대한 해석적 해를 토대로 Rosenblueth 2n+1 법과 Zhou & Nowak 2n 법의 적용성을 조사하였다. 확률 랜덤변수로서 지반과 라이닝의 탄성계수를 고려하였고, 해석적 해에 대한 Monte Carlo simulation의 계산 결과와 두 가지 점추정법의 계산 결과를 비교 분석하였다.

#### 3.1 탄성 지반내 원형터널의 라이닝 지보에 대한 해석적 해

Einstein & Schwart(1979)는 Fig. 1과 같은 탄성 지반내 원형터널의 라이닝 지보에 대한 해석적 해를 제안하였다. 식 (7)과 (8)은 원형터널에 설치된 라이닝의 축력과 모멘트를 구하는 식들이고, 이로부터 라이닝에 작용하는 휨 응력(bending stress)은 식 (9)에 의해 계산된다. 식 (7)과 (8)에 상수들은 식 (10)-(15)에 의해 계산된다.

$$\frac{N}{P_o r} = \frac{1}{2}(1+k)(1-a_0) + \frac{1}{2}(1-K)(1+2a_1)\cos 2\theta \quad (7)$$

$$\frac{M}{P_o r^2} = \frac{1}{4}(1-k)(1-2a_1+2b_0)\cos 2\theta \quad (8)$$

$$\sigma_{bs} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} y \quad (9)$$

여기서  $N$ 은 라이닝 요소에 작용하는 축력(MN),  $P_o$ 는 수직응력(MPa),  $r$ 은 원형터널의 반경(m),  $K$ 는 축압계수,  $\theta$ 는 터널 중심을 기준으로 측정된 수평면으로부터

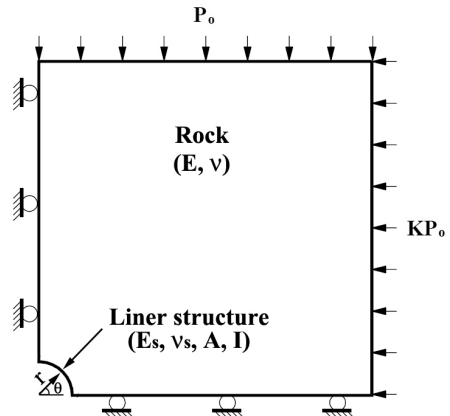


Fig. 1. Schematic of the lined circular tunnel problem.

라이닝 요소의 각도( $^\circ$ ),  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_0$ 은 각각 식 (10), (13), (15)로부터 계산되는 상수,  $\sigma_{bs}$ 는 라이닝 요소에 작용하는 최대/최소 힘응력(MPa),  $I$ 는 라이닝 요소의 단면 2차 모멘트( $m^4$ ),  $A$ 는 라이닝 요소의 단면적( $m^2$ ),  $y$ 는 라이닝 요소의 중립축으로부터의 수직거리(m) 이다(=  $A/2$ ).

$$a_0 = \frac{CF(1-\nu)}{C+F+CF(1-\nu)} \quad (10)$$

$$C = \frac{Er}{E_s(1-\nu^2)} \quad (11)$$

$$F = \frac{Er^3}{E_s I(1-\nu^2)} \quad (12)$$

$$a_1 = \beta b_0 \quad (13)$$

$$\beta = \frac{C(6+F)(1-\nu)+2F\nu}{3C+3F+2CF(1-\nu)} \quad (14)$$

$$b_0 = \frac{C(1-\nu)}{2[C(1-\nu)+4\nu-6\beta-3\beta C(1-\nu)]} \quad (15)$$

여기서  $E$ 와  $E_s$ 는 각각 암석과 라이닝의 탄성계수 (MPa),  $\nu$ 와  $\nu_s$ 는 각각 암석과 라이닝의 포아송비이다.

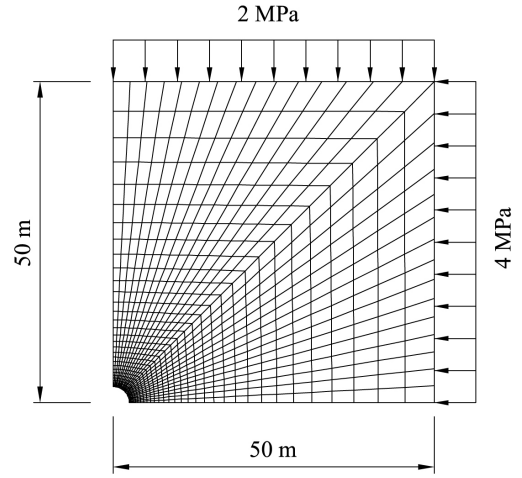
### 3.2 매개변수 설정

Table 1은 점추정법의 적용성을 분석하기 위해 사용한 매개변수와 값을 나타낸다. 원형터널의 반경은 2.5 m 이었고, 지반의 탄성계수 6 GPa, 포아송비 0.2, 지반의 수직응력 2 MPa, 측압계수 2.0을 적용하였으며, 두께 5 cm의 스틸라이닝을 고려하였다. Fig. 2(a)는 FLAC2D(Itasca) 해석을 위한 수치모델을 나타내고, Fig. 2(b)는 원형터널의 상세를 나타낸다.

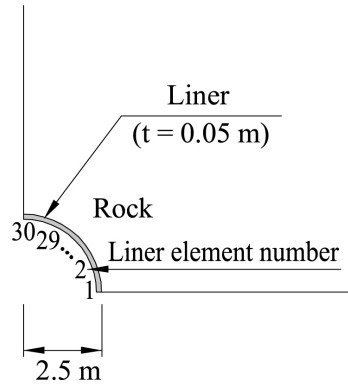
Fig. 3은 3.1절의 해석적 해(식 (7)-(9))로부터 계산된 라이닝 요소별 힘 압축응력과 FLAC2D 해석을 통해 계

**Table 1.** Parameters and values used in the present study.

Parameter	Value	Parameter	Value
Tunnel radius	2.5 m	Vertical stress	2 MPa
Density of rock	1,800 kg/m <sup>3</sup>	Horizontal stress	4 MPa
Young's modulus of rock	6 GPa	Young's modulus of liner	20 GPa
Poisson's ratio	0.2	Liner thickness	0.05 m

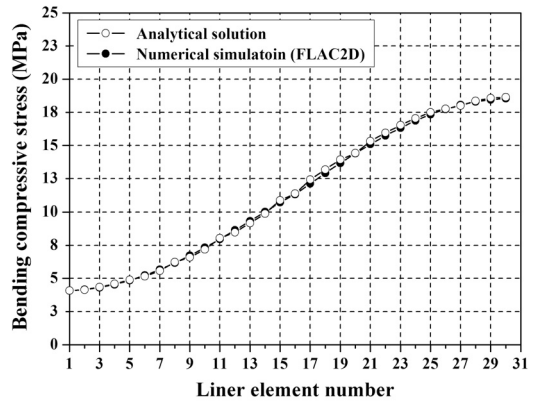


(a) Model grid



(b) Details on the lined circular tunnel

**Fig. 2.** FLAC2D numerical model for the lined circular tunnel problem.



**Fig. 3.** Comparison of bending compressive stress between the analytical solution and FLAC2D simulation.

산된 휨 압축응력을 나타낸다. 분석 결과, 해석적 해와 수치해석의 결과는 평균 1.13%의 오차를 보였으며, 최소 오차 0.11%, 최대 오차 2.42%이었다. 이는 수치해석시 근사화된 수치모델 및 계산과정을 토대로 문제를 풀기 때문에 발생하는 오차라고 할 수 있다.

**3.3 점추정법 및 Monte Carlo simulation에 의한 통계 모멘트의 비교 분석**

라이닝 지보에 대한 확률해석을 위해 랜덤변수로서 지반과 라이닝의 탄성계수를 고려하였고, 지반과 라이닝 탄성계수의 평균값은 Table 1의 값을 적용하였다. 변동계수, 즉 COV 값은 각 탄성계수에 대해 0.1과 0.2를 적용하였다. 본 연구에서 고려한 점추정법들의 계산 결과와 비교 분석하기 위해 exact probabilistic method로 간주되는 Monte Carlo simulation을 수행하였으며, 그 결과를 exact solution으로 가정하였다. Monte Carlo simulation은 위에서 정한 랜덤변수들의 평균값과 COV 값을 토대로 지반 및 라이닝의 탄성계수에 대해 각각 5,000개의 난수를 발생시켜 수행되었다.

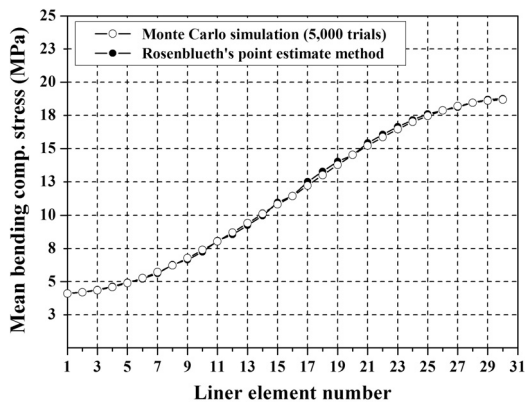
Table 2는 Monte Carlo simulation에 의해 계산된 휨 압축응력의 통계 모멘트와 점추정법(Rosenblueth  $2n+1$  법, Zhou & Nowak  $2n$  법)에 의해 계산된 통계 모멘트의 차이를 나타낸다. 두 가지 점추정법에 의해 계산된 휨 압축응력의 평균값은 Monte Carlo simulation의 계산 결과와 평균 약 1%의 오차를 보였다. 이는 3.2절에서 언급한대로 수치해석 과정에서의 근사 오차에 기인하며(Fig. 3 참조), 두 가지 점추정법의 일차 통계 모멘트(평균)는 exact solution과 거의 동일한 것으로 판단할 수 있다.

표준편차에 있어 계산 오차를 분석한 결과, 성능함수가 비선형 함수(식 (7)-(9))임에도 불구하고, Rosenblueth  $2n+1$  법의 경우 약 0.8-1.6%의 오차, Zhou & Nowak  $2n$  법의 경우 약 0.9-1.3%의 오차를 보여 두 가지 점추정법의 계산 정확도가 서로 큰 차이없이 모두 우수한 것을 알 수 있었다. 그러나 COV 값에 비례하여 표준편차의 오차가 증가하는 경향을 보여 입력 확률변수의 COV 값이 큰 경우에는 이들 점추정법에 의한 통계 모멘트의 추정에 주의가 필요함을 알 수 있다. Fig. 4는 지반

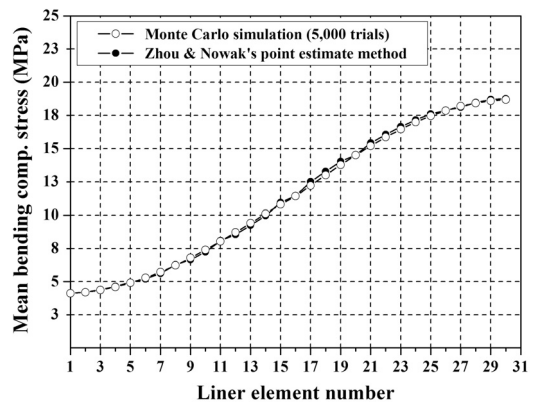
**Table 2.** Summary of comparison results for the two random variables.

[COV <sub>rock</sub> , COV <sub>liner</sub> ]	Average error in mean value		Average error in SD value	
	Rosenblueth's method	Zhou & Nowak's method	Rosenblueth's method	Zhou & Nowak's method
[0.1,0.1]	1.08%	1.09%	0.87%	0.89%
[0.1,0.2]	1.07%	1.07%	0.83%	0.87%
[0.2,0.1]	1.01%	1.01%	1.25%	1.22%
[0.2,0.2]	1.00%	1.00%	1.62%	1.25%

COV<sub>rock</sub> and COV<sub>liner</sub> = coefficients of variation in the Young's modulus of rock and liner, respectively; SD = standard deviation



**Fig. 4.** Comparison of Rosenblueth's PEM with MCS with respect to the mean value of bending compressive stress (COV<sub>rock</sub> = 0.1, COV<sub>liner</sub> = 0.1).



**Fig. 5.** Comparison of Zhou & Nowak's PEM with MCS with respect to the mean value of bending compressive stress (COV<sub>rock</sub> = 0.1, COV<sub>liner</sub> = 0.1).

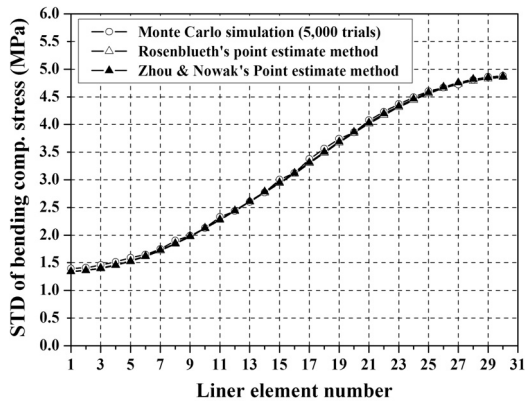


Fig. 6. Comparison of Rosenblueth's and Zhou & Nowak's PEMs with MCS with respect to the standard deviation value of bending compressive stress ( $COV_{rock} = 0.2$ ,  $COV_{liner} = 0.2$ ).

과 라이닝의 COV 값이 모두 0.1인 경우, 평균 휨 압축응력에 대한 Monte Carlo simulation 결과와 Rosenblueth  $2n+1$  법의 계산 결과를 나타내고, Fig. 5는 지반 및 라이닝의 COV 값이 모두 0.1인 경우 평균 휨 압축응력에 대한 Zhou & Nowak  $2n$  법의 계산 결과를 나타낸다. Fig. 6은 지반과 라이닝의 COV 값이 모두 0.2인 경우, Monte Carlo simulation, Rosenblueth  $2n+1$  법, Zhou & Nowak  $2n$  법의 표준편차를 비교한 그림이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수치해석과 연계한 지하구조물의 확률론적 신뢰성 평가를 위한 점추정법의 적용성을 조사하였다. 고려한 점추정법은 Rosenblueth  $2n+1$  법과 Zhou & Nowak  $2n$  법이었고, 두 가지 점추정법과 Monte Carlo simulation의 계산 결과를 비교 분석하여 계산의 정확도와 적용성을 비교 분석하였다. 분석 결과, 성능함수가 비선형 함수임에도 불구하고, 점추정법과 Monte Carlo simulation에 의해 계산된 통계 모멘트가 약 1-2%의 평균 오차를 보여 본 연구에서 고려한 두 가지 점추정법 모두 계산의 정확도가 비교적 우수한 것을 알 수 있었고, 이로부터 지하구조물의 확률론적 신뢰성 평가를 위한 점추정법의 적용성을 확인할 수 있었다.

한편 본 연구에서는 두 개의 랜덤변수만 고려하였고 Rosenblueth  $2n+1$  법과 Zhou & Nowak  $2n$  법 모두 유사한 계산 정확도를 보였으나, 앞서 언급한대로 Zhou

& Nowak  $2n$  법의 경우, 랜덤변수의 개수가 증가함에 따라 각 랜덤변수의 평균으로부터 멀리 떨어진 위치에서 샘플링 되어 성능함수의 통계 모멘트가 과대 또는 과소 평가될 수 있다. 따라서 랜덤변수의 개수가 많은 경우에는 Rosenblueth  $2n+1$  법에 의한 계산이 보다 효율적일 것이다.

#### 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 '지하암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발(과제코드 GP2012-001)'의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Dohyun Park, Eui-Seob Park, Won-Kyong Song, Dong-Woo Ryu, 2010, Reliability Assessment of Tunnel Support Systems Using a Probability-Based Method. Korean Society for Rock Mech., Tunnel and Underground Space, 20.1, 39-48.
2. Bucher C., D. Hintze and D. Roos, 2000, Advanced analysis of structural reliability using commercial FE-codes, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona, CD-ROM.
3. Einstein, H.H. and C.W., Schwartz, 1979. Simplified analysis for tunnel supports, Journal of the Geotechnical Engineering Division 105.GT4, 499-518.
4. Harr, M. E., 1989, Probabilistic estimates for multivariate analyses. Applied Mathematical Modelling 13.5, 313-318.
5. Hong, H. P., 1998, An efficient point estimate method for probabilistic analysis. Reliability Engineering and System Safety 59.3, 261-267.
6. Lind, N. C., 1983, Modelling of uncertainty in discrete dynamical systems, Applied Mathematical Modelling 7.3, 146-152.
7. Park, D., H.M. Kim, D.W. Ryu, B.H. Choi and K.C. Han, 2012, TunnelRA: A software program for the probability-based reliability assessment of tunnel supports, Computers and Geosciences (under review).
8. Rosenblatt, M., 1952, Remarks on a multivariate transformation, The Annals of Mathematical Statistics 23.3, 470-472.
9. Rosenblueth, E., 1975, Point estimates for probability moments, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 72.10, 3812-3814.
10. Zhou, J. and A.S., Nowak, 1988, Integration formulas to evaluate functions of random variables, Structural Safety 5.4, 267-284.



**박도현**

1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2009년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사  
Tel: 042-868-3913  
E-mail: parkdo@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원



**류동우**

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사  
Tel: 042-868-3099  
E-mail: dwryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원



**한공창**

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1989년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학석사  
1993년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학박사  
Tel: 042-868-3241  
E-mail: hankc@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원



**김형목**

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사  
Tel: 042-868-3265  
E-mail: kimh@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원



**최병희**

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사  
Tel: 042-868-3237  
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원