

## 이중절단정규분포의 적용을 통한 케이슨 방파제 기대활동량 평가의 향상 Improved Estimation for Expected Sliding Distance of Caisson Breakwaters by Employment of a Doubly-Truncated Normal Distribution

김태민\* · 황규남\* · 타카야마 토모츠키\*\*

Tae-Min Kim\*, Kyu-Nam Hwang\* and Tomotsuka Takayama\*\*

**요 지 :** 본 연구는 기대활동량을 이용하는 케이슨 방파제의 신뢰성 설계법(레벨 III)에 대한 연구로서, 기대활동량의 향상된 평가를 위해 지금까지 이용되어온 정규(가우스)분포 대신 이중절단정규분포의 사용을 제안하고자 하며, 이에 대한 타당성을 제시하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 확률적 개념에 근거한 기대활동량의 계산과정에서 Monte-Carlo모의 기법을 통한 불확정요소들의 영향을 반영하는 방법에 대한 설명과 함께 이중절단정규분포가 적용되어야만 하는 명확한 근거가 제시되며, 또한 기대활동량 평가시의 이중절단정규분포의 적용방법에 대한 자세한 설명이 주어진다. 본 논문에서는 케이슨 방파제만을 대상으로 이중절단정규분포를 적용하고 있으나, 이중절단정규분포의 적용은 다양한 해안구조물 및 타 공학 분야에도 적극 활용될 수 있으므로 향후 적극적인 활용이 기대된다.

**핵심용어 :** 기대활동량, 케이슨 방파제, 신뢰성 설계법, Monte-Carlo모의 기법, 이중절단정규분포

**Abstract :** The present study is deeply concerned with the reliability design method(Level III) for caisson breakwaters using expected sliding distance, and the objectives of this study are to propose the employment of a doubly-truncated normal distribution and to present the validity for it. In this study, therefore, the explanations are made for consideration of effects of uncertain factors, and a clear basis that the doubly-truncated normal distribution should be employed in the computation process of expected sliding distance by Monte-Carlo simulation is presented with introduction of the employment method. Even though only caisson breakwaters are treated in this paper, the employment of doubly-truncated normal distribution can be applied to various coastal structures as well as other engineering fields, and therefore it is expected that the present study will be extended in various fields.

**Keywords :** expected sliding distance, caisson breakwaters, reliability design method, Monte-Carlo simulation, doubly-truncated normal distribution

### 1. 서 론

사석마운드 방파제와 함께 대표적 방파제 형식인 케이슨 방파제는 기본적인 3개의 파괴모드(활동, 전도 그리고 잠석마운드를 포함한 지반의 기초파괴)에 대한 안정성 확보를 위하여 전통적으로 안전계수의 개념(예를 들면, 활동에 대한 안전계수 1.2) 하에서 설계되어져 왔다. 그러나 이러한 종래의 결정론적 설계법으로는 설계파 이상의 거대

파랑으로 인한 방파제 피해정도가 예측될 수 없으며, 설계과정에서 설계변수들의 불확실성이 고려되지 않는 등 여러 문제점들이 존재하므로, 이에 대한 대안으로 확률론적 개념에 근거한 신뢰성 설계법을 케이슨 방파제에 적용하려는 다양한 연구들(e.g. Takayama and Fuji, 1991; Takayama and Ikeda, 1993; Oumeraci, 1994; Shimosako and Takahashi, 1998; Goda, 2001, Hanzawa et al., 2003)이 최근 활발히 수행되어지고 있다.

\*전북대학교 토목환경공학과 · 공업기술연구센터(Corresponding author : Tae-Min Kim, Reseach Center of Industrial Technology · Dept. of Civil Eng., Chonbuk National University, 664-14 Iga, Duckjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea. tmkim68jp@yahoo.co.jp)

\*\*경도대학 방재연구소(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan)

신뢰성 설계법은 적용되는 확률적 개념의 레벨(level)에 따라 레벨 I, II 및 III의 3종류로 분류되어지는데(Nagao et al., 1995), 본 연구는 레벨 III의 신뢰성 설계법에 해당하는 연구로서, 하중 및 저항과 관련된 모든 설계변수들이 각각의 독립적 발생확률분포를 가지고 해석된다. 케이스 방파제에 대한 레벨 III 신뢰성 설계법으로서는 Shimosako and Takahashi(1998)가 제안한 기대활동량(expected sliding distance)을 이용하는 변형을 고려한(또는 근거로 한) 신뢰성 설계법이 해당된다. 이 방법은 케이스 방파제의 제공수명기간(service life time)동안에 발생되어질 다양한 불확정 요소들(uncertain factors)의 영향을 확률론적 개념 하에서 Monte-Carlo모의 기법을 통하여 설계과정에 반영하고, 이를 근거로 케이스 방파제의 주요 파괴형태(failure mode)인 케이스 활동(sliding)의 발생확률(occurrence probability)을 기대활동량(expected sliding distance)이라고 불리는 추측 통계값으로 평가한 다음, 기대활동량이 허용값 이내가 되도록 케이스 방파제의 단면을 최적화시키는 방법이다.

신뢰성 설계법(Level III)에 의한 케이스 방파제의 기대활동량 평가시에 가장 중요한 사항은 설계과정에서의 불확정요소들(e.g. 심해파의 추정오차, 파랑변형, 주기 및 파력의 계산오차, 케이스저면과 잠석마운드사이의 마찰계수에 대한 불확실성 등)의 영향을 타당성 있게 반영하는 것이라 할 수 있는데, Takayama and Ikeda(1993)의 제안 이래로 불확정요소들에 대한 각각의 발생확률분포는 정규분포(normal distribution)로서 가정되어 왔다. 평균과 표준편차의 단지 2개 매개변수로 표현되는 정규분포는 공학적 응용측면에서 매우 편리한 장점을 갖고 있지만, 이론적으로 그 분포범위는 음의 무한대(-∞)에서부터 양의 무한대(+∞)까지 정의되기 때문에 임의의 설계변수에 대해서 정규분포로 가정된 발생확률분포가 상·하의 경계값(upper and lower limit values)을 가지는 경우 Monte-Carlo모의 기법을 이용하여 기대활동량을 평가하는 본 신뢰성 설계법에서는 계산상 타당하지 않은 부분이 발생되어진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 계산상의 불합리한 부분을 구체적으로 명확히 설명하고자 하며, 동시에 대안으로서 이중절단정규분포의 적용을 제안하고, 그 타당성을 제시하고자 한다.

본 논문에서는 케이스 방파제에 대한 신뢰성 설계법(level III) 수행시에 불확정요소들의 영향을 고려하는 방법에 대한 설명이 우선적으로 주어지고, 정규분포의 적용에 있어서 상·하의 경계값 존재로 인한 문제점이 제시되

며, 마지막으로 이에 대한 대안으로 이중절단정규분포를 적용하는 방법 및 적용결과들에 대한 설명이 주어진다.

## 2. 불확정요소들의 영향 고려

신뢰성 설계법(level III)을 통한 케이스 방파제의 설계시에 Monte-Carlo모의 기법을 이용한 기대활동량의 평가 방법 및 계산과정은 이미 기존의 연구들(Shimosako and Takahashi, 1998, 1999; Goda and Takagi, 2000; Kim and Takayama, 2002; Kim, 2004)에서 상세히 설명된 바 있다. 따라서 본 논문에서는 이에 대한 설명은 생략되며, 단지 기대활동량의 평가 과정에서 불확정요소들의 영향을 고려하는 방법에 대한 설명만이 주어진다.

케이스 방파제에 신뢰성 설계법을 적용하기 위한 기초 연구로서 확률론적 개념을 도입하여 활동단정성을 평가한 Takayama and Ikeda(1993)는 설계변수들의 불확실성, 즉 불확정 요소들에 대한 영향을 설계과정에 반영하기 위하여 불확정 요소들의 발생확률분포를 정규분포로 가정하여 사용하였는데, 임의의 불확정 설계변수  $x$ 에 대한 정규분포의 확률밀도함수(probability density function)는 다음과 같이 주어진다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\}, -\infty < x \left(= \frac{x_e}{x_c}\right) < \infty \quad (1)$$

여기서  $x_e$ 와  $x_c$ 는 임의의 설계변수에 대한 실험 및 관측값과 계산 및 설계값을 각각 나타내며,  $\bar{x}$ 와  $\sigma$ 는 평균 및 표준편차를 나타낸다. 한편, 임의의 변수  $x$ 가  $x=X$ 의 값을 가질 때에 누적분포함수(cumulative distribution function) 값은  $x=-\infty$ 부터  $x=X$ 까지 식 (1)을 적분함으로써 구할 수 있다. 그리고 누적분포함수의 값은 0부터 1까지의 값을 갖기 때문에 동일한 범위(0~1)의 값을 갖는 난수(random number)  $r$ 를 누적분포함수의 값 대신에 사용함으로써, 역으로 해당하는 임의의 변수  $x$ 의 값을 얻을 수 있다. 그러나 확률밀도함수  $f(x)$ 는 초월함수(transcendental function)이기 때문에 식 (1)을 직접 적분하는 것은 쉽지 않으며, 따라서 Ikesue(1999)가 사용한 방법을 적용함으로써 난수  $r$ 에 해당하는 변수  $x$ 의 값  $x=X$ 를 다음 방정식 (2)에 의하여 쉽게 구할 수 있다.

$$X = \begin{cases} \bar{x} + \sqrt{2}\sigma \sqrt{\frac{\pi}{4} \log\{4(r-r^2)\}} & (x \geq \bar{x}) \\ \bar{x} - \sqrt{2}\sigma \sqrt{\frac{\pi}{4} \log\{4(r-r^2)\}} & (x \leq \bar{x}) \end{cases} \quad (2)$$

따라서 Monte-Carlo모의 기법을 이용한 기대활동량의 계산과정에서 불확정요소들의 영향을 반영하기 위하여 이용되는 값( $x_{real}$ )은 다음의 식 (3)과 같이 주어지게 된다.

$$x_{real} = Xx_c \quad (3)$$

### 3. 정규분포의 이용에 있어서 문제점

앞서 언급된 바와 같이, 케이슨 방파제의 신뢰성설계법에서 불확정 요소들에 대한 발생확률분포는 이론적으로 음의 무한대(-∞)에서부터 양의 무한대(+∞)까지의 범위에서 정의된 정규분포로서 가정되어왔다. 그러나 Takayama and Ikeda(1993)에 의하여 제시된 파력이나 마찰계수 등의 발생확률분포 산정결과(Fig. 1)로부터 알 수 있는 바와 같이 불확정 요소들에 대한 실제의 실험(측정)값들은 무한대 영역(infinite region)이 아닌 유한 영역(finite region)의 임의 경계값안에 모두 존재한다. 그림에서 실험값들이 파력의 경우에는 0.48과 1.42내에 그리고 마찰계수의 경우에는 0.71

과 1.43내에 분포함을 명확히 알 수 있다. 이것은 정규분포로 가정된 불확정 요소들의 값이 상·하의 경계값을 갖는 것을 의미하며, 이러한 경우, Monte-Carlo모의 기법을 이용하여 기대활동량을 평가하는 본 신뢰성 설계법에 서는 계산상 타당하지 않은 부분이 발생되어진다.

무한 영역 조건의 정규분포 사용시에 발생하는 문제점은 아래에 주어지는 계산조건(Table 1~3과 Fig. 3)에서의 Monte-Carlo모의 기법을 이용한 기대활동량의 일반적인 계산과정 예(Fig. 4)를 통하여 구체적으로 설명된다. Table 1은 Takayama and Ikeda(1993)에 의해 제안된 각각의 불확정 요소들에 대한 발생확률분포에서의 변동계수와 평균값으로서 본 연구에서 이용되어지며, Table 2는 기대활동량의 평가를 위한 기본적 계산조건을 나타낸다. Table 3과 Fig. 2는 각각의 수심에 따른 케이슨방파제에 대한 기대활동량의 평가를 위해 현행설계법으로 결정된 방파제 단면의 조건을 나타낸다. 기대활동량의 평가는 Fig. 3에 주어진 계산과정의 흐름도에 따라 수행되어지며, 특히 활동량 제

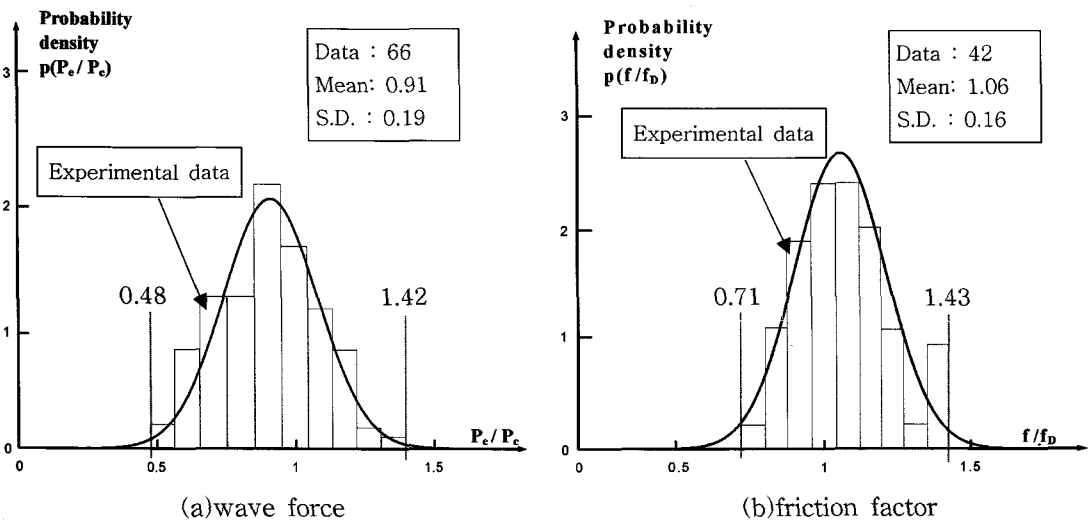


Fig. 1. Estimation error of wave force and friction factor (Takayama and Ikeda, 1993).

Table 1. Mean and coefficient of variation of respective probability distributions for uncertain factors (Takayama and Ikeda, 1993)

Uncertain factors	Mean	Coef. of Variation	Distribution function
Deepwater wave heights	1.00	0.10	Normal
Wave transformation	0.87	0.09	Normal
Wave force	0.91	0.17	Normal
Friction factor	1.06	0.16	Normal
Significant wave period	1.00	0.10	Normal

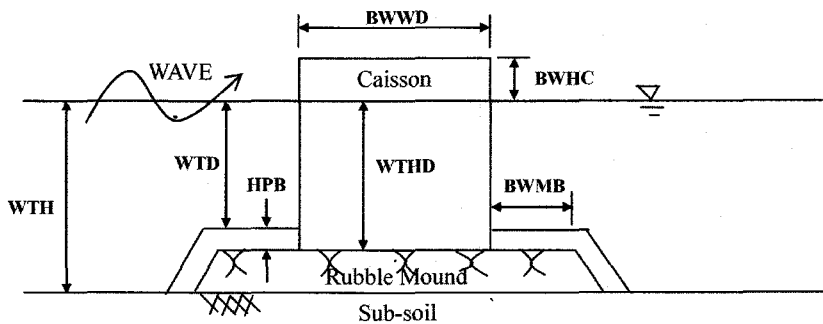
**Table 2.** Calculation conditions

Item	Value	Unit
Unit mass of a caisson	2.10	t/m <sup>3</sup>
Unit mass of sea water	1.03	t/m <sup>3</sup>
Friction factor (mean value)	0.6	-
Service lifetime of breakwater	50	yr
Return period for breakwater design	50	yr
Observation period of wave data (KYR)	30	yr
Wave data number during KYR years	30	no.
Beach slope	1/100	-
Duration of a storm	3.0	hr
Wave steepness	0.035	-
Incident angle of wave to normal line of breakwater	90	°(degree)
Safety factor against sliding of caisson	1.2(setting value)	-
Safety factor against overturning of caisson	1.2(setting value)	-
Tide level(H.S.L, M.S.L and L.S.L)	2.0, 1.0 and 0.0	m
Number of simulation repetition	10,000	no.
Weibull distribution for deepwater waves	shape factor	1.0
	scale factor	1.7
	location factor	2.35

**Table 3.** Computational conditions of breakwater section according to water depth

WTH (m)	WTHD (m)	WTD (m)	BWMB (m)	HPB (m)	S <sub>FS</sub>	S <sub>FM</sub>	BWWD (m)	BWHC (m)
8	6	4.5	6	1.5	1.21	2.04	20.50	3.90
12	10	8.5	6	1.5	1.20	1.39	21.30	5.00
16	13	11.5	8	1.5	1.20	1.25	25.30	5.00
20	14	12.5	8	1.5	1.20	1.24	27.10	5.00
24	14	12.5	8	1.5	1.20	1.23	26.80	5.00

(S<sub>FS</sub> and S<sub>FM</sub> indicate safety factors against sliding and overturning of caisson, respectively)

**Fig. 2.** Definition of symbols in Table 3.

안된 활동량산정모형을 근거로 수정·제한된 최근의 활동량 계산방법을 적용하였다. 계산과정에 대한 보다 상세한 사항은 Kim and Takayama(2003)와 Kim(2004)에 주어진다.

본 연구에서는 위에서 언급된 일반적인 계산조건하에서

Monte-Carlo모의 기법을 이용하여 기대활동량이 평가되어지며, 정규분포의 이용에 있어서 나타나는 문제점을 제시한 예로서의 결과가 Fig. 4에 주어진다. 이 결과는 기대활동량의 계산과정에서 Monte-Carlo모의 기법을 이용하여 난수에 의하여 발생된 파력(a)과 마찰계수(b)의 계산변수  $x$

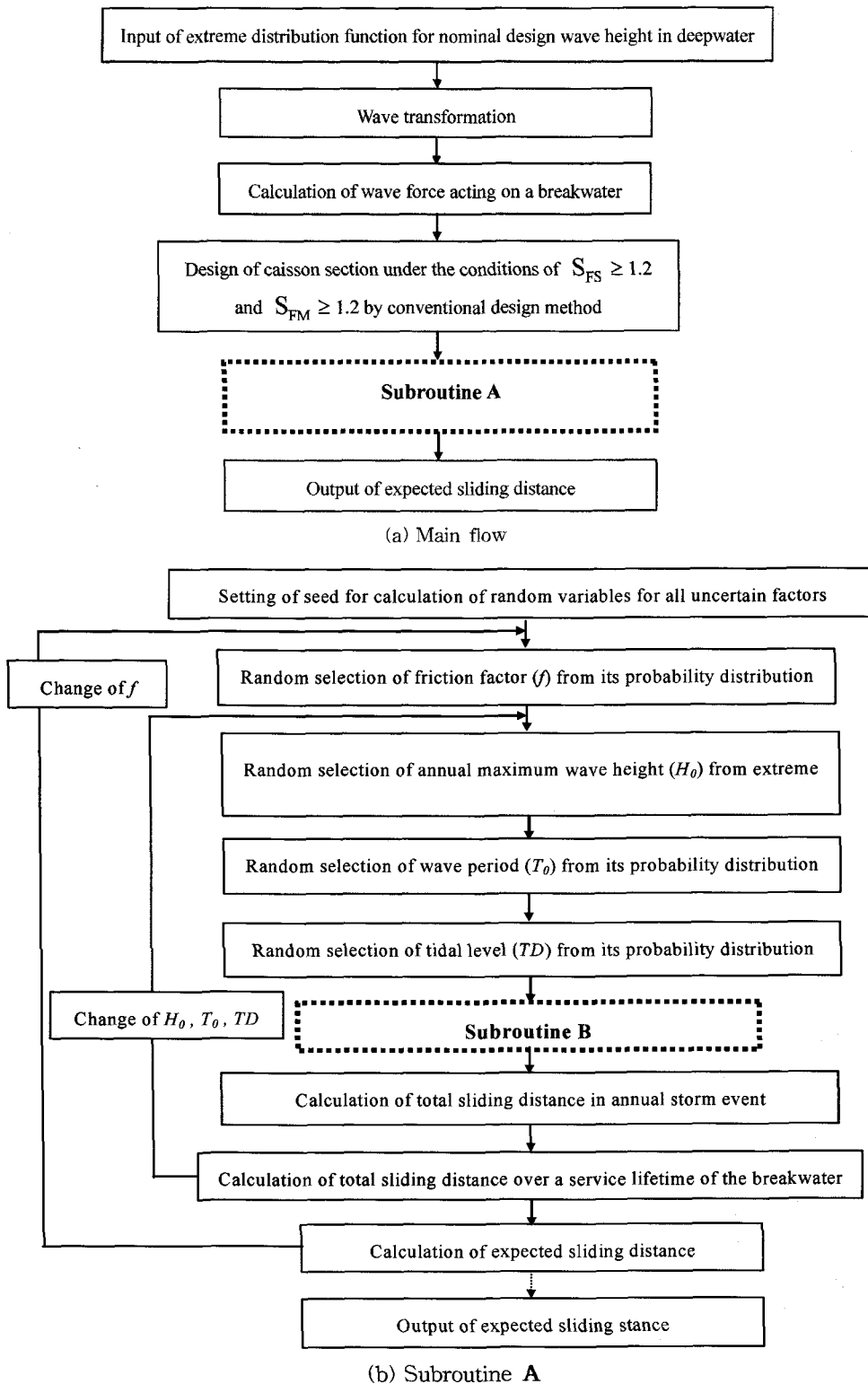
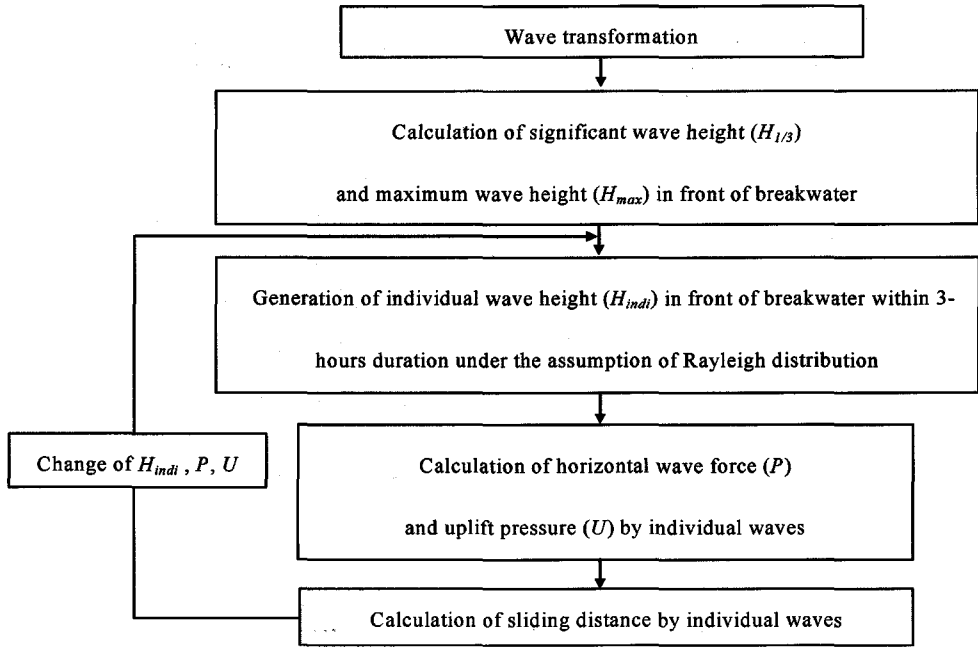


Fig. 3. Flow chart of computation procedure for expected sliding distance.



(c) Subroutine B

Fig. 3. (continued) Flow chart of computation procedure for expected sliding distance.

를 나타내며, 이것은 Fig. 1에서의  $P/P_c$ 와  $ff_D$ 에 해당된다.  $P_e$ 와  $P_c$ 는 파력에 대한 실험 및 관측값과 계산값을 각각 나타내며,  $f_D (=0.6)$ 와  $f$ 는 설계시 이용되는 마찰계수와 실험에서 관측된 마찰계수를 각각 나타낸다. 각각의 발생 확률분포에서의 상·하 경계값(파력: 0.48, 1.42, 마찰계수: 0.71, 1.43)들은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 Takayama and Ikeda(1993)에 의하여 제출된 실험데이터를 근거로 본 연구에서 근사적으로 평가된 값들이다. Takayama and Ikeda(1993)에 따르면 그들이 제출한 실험데이터(Fig. 1)는 Tanimoto et al.(1976, 1984), Morihira et al.(1978, 1979), Investigation and Design Office of the Second Port Construction Bureau (1986)에 의하여 수행된 실험데이터들을 근거로 하고 있으며, 따라서 현재로서는 상·하 경계값의 결정을 위한 가장 신뢰할 수 있는 근거자료라 할 수 있다.

Fig. 4의 결과를 통해서 Monte-Carlo모의 기법하에서 난수에 의하여 발생된 계산변수들( $P/P_c$ 와  $ff_D$ )의 값들은 정규분포를 적용함으로써 상·하 경계값(혹은 절단점, truncation point)밖의 영역까지 분포하는 것을 명확하게 알 수 있다. 이것은 음의 무한대에서부터 양의 무한대까지 정의된 정규분포의 특성 때문에 실험데이터들이 존재하지 않는 즉, 실제로는 존재하지 않는 무한대( $\pm\infty$ ) 부근에서의 변수들이 난

수에 의하여 발생되기 때문이며, 이러한 변수들까지 포함하여 계산할 경우 비현실적으로 매우 큰 활동량이 평가되어지는 등 결과적으로 기대활동량의 계산은 타당하지 않다고 하겠다.

### 4. 이중절단 정규분포의 적용

#### 4.1 이론적 배경

기대활동량의 평가를 위한 계산과정에서 정규분포의 적용에 따른 비합리적인 부분을 없애기 위하여 대안으로서 이중절단정규분포의 적용을 제안하며, 관련된 이론적 배경 및 적용방법 등에 대한 설명이 본 장에서 주어진다.

Fig. 5은 이중절단정규분포의 개념적 설명을 도식화한 것이며,  $x_1$ 과  $x_2$ 는 상·하 경계값을 나타낸다. 이중절단정규분포의 확률밀도함수  $f_{DTN}(x)$ 는 기본적으로 다음의 관계식 (4)을 만족해야만 한다.

$$\int_{x_1}^{x_2} f_{DTN}(x) dx = 1 \tag{4}$$

따라서  $x_1$ 과  $x_2$ 영역에서 정의되는  $f_{DTN}(x)$ 는 다음의 식 (5)과 같이 주어질 수 있다.

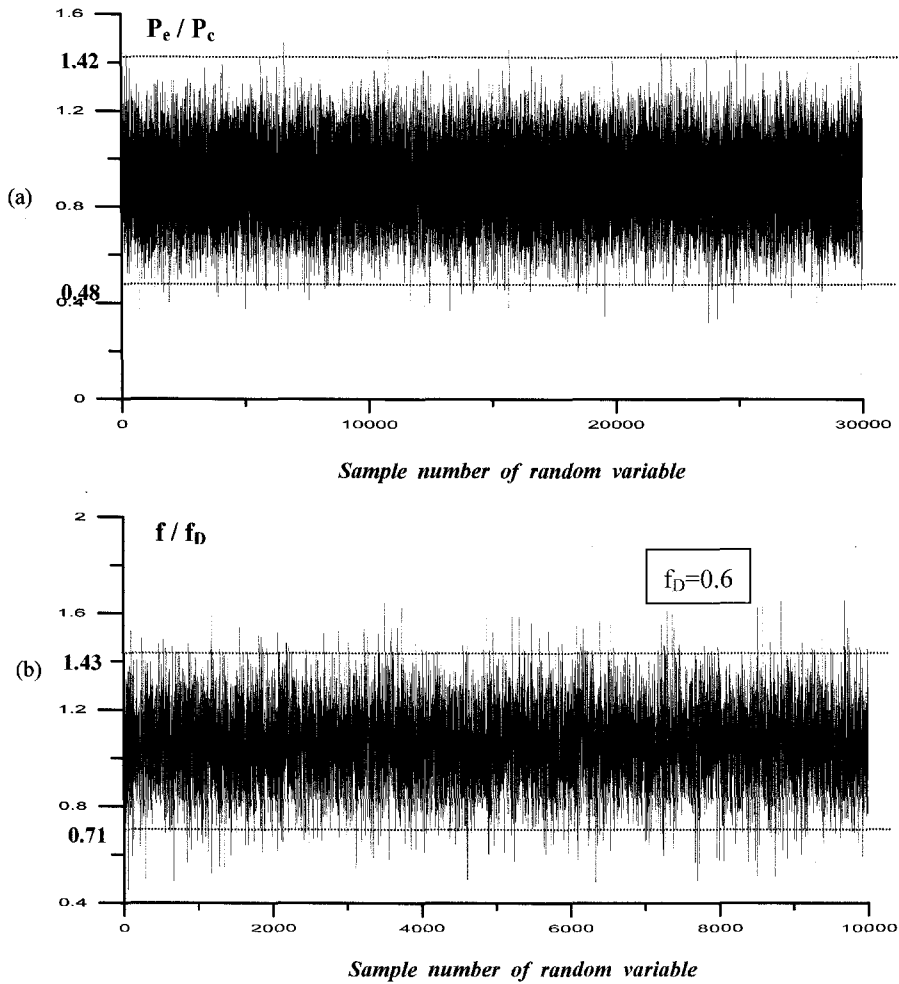


Fig. 4. Calculation examples of random variable using the normal distribution [(a)Wave force, (b) Friction factor].

$$f_{DTN}(x) = \frac{1}{P_{12}}f(x) \quad (x_1 \leq x \leq x_2) \quad (5)$$

$$p_{12} = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (6)$$

한편, 임의 변수  $X$ 에 대한 누적분포함수  $F_{DTN}(X)$ 는 다음의 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{DTN}(X) &= \int_{x_1}^X f_{DTN}(x) dx = \frac{1}{p_{12}} \left[ \int_{-\infty}^X f(x) dx - \int_{-\infty}^{x_1} f(x) dx \right] \\ &= \frac{F(X) - F(x_1)}{p_{12}} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $F_{DTN}(X)$ 와  $F(x_1)$ 은 식 (1)에 의하여 표현된 정규분포에서의  $X$ 와  $x_1$ 에서의 누적분포함수를 각각 나타

낸다. 만일 난수(random number)  $r(0 \leq r \leq 1)$ 이 주어지면, 다음의 식 (8)과 같이 표현되어질 수 있다.

$$r = F_{DTN}(X) = \frac{1}{p_{12}} \int_{x_1}^X f(x) dx = \frac{r' - F(x_1)}{p_{12}} \quad (8)$$

여기서  $r'$ 는

$$r' = \int_{-\infty}^X f(x) dx \quad (9)$$

로서 정의되어지며, 다음과 같은 관계식 (9)이 성립된다.

$$r' = p_{12}r + F(x_1) \quad (10)$$

따라서 정규분포에 대한  $r'$ 의 값을 역으로 이용함으로써 이중절단정규분포에서의 임의 변수  $X$ 는 다음의 식 (11)

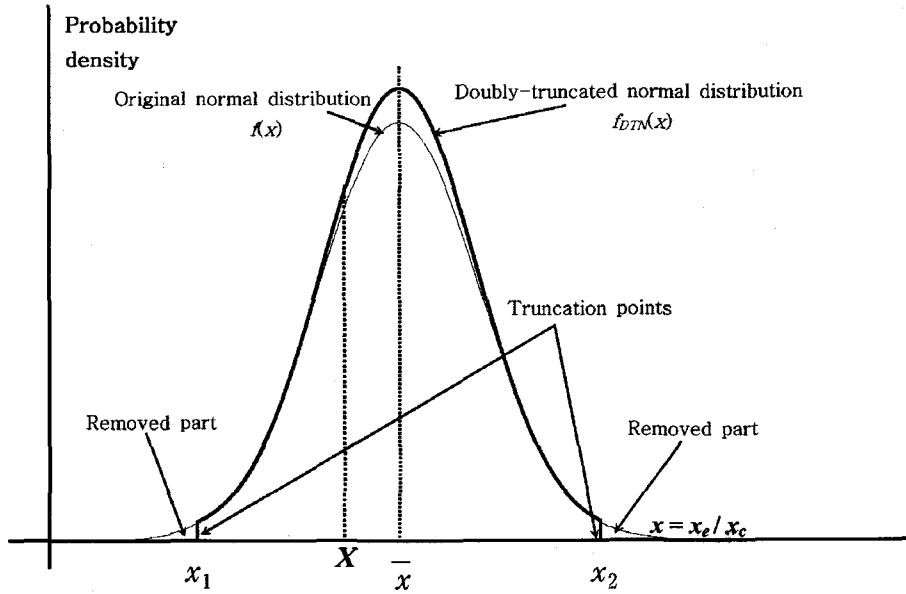


Fig. 5. Conceptual explanation of a doubly-truncated normal distribution.

Table 4. Comparisons between the original normal distribution and doubly-truncated normal one

Classification	Probability density	Defined region	Remarks
Original normal distribution	$f(x)$	$-\infty < x < \infty$	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right\}$
Doubly-truncated normal distribution	$f_{DTN}(x) = \frac{f(x)}{P_{12}}$	$x_1 < x < x_2$	$P_{12} = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$ $x_1, x_2$ : Truncation points

에 의하여 얻어질 수 있다.

$$X = \begin{cases} \bar{x} + \sqrt{2}\sigma \sqrt{-\frac{\pi}{4} \log\{4(r' - r'^2)\}} & (r' \geq 0.5) \\ \bar{x} - \sqrt{2}\sigma \sqrt{-\frac{\pi}{4} \log\{4(r' - r'^2)\}} & (r' < 0.5) \end{cases} \quad (11)$$

그리고 식 (3)을 이용함으로써 이중절단정규분포를 적용한 이 계산되어지며, 결과적으로 Monte-Carlo모의 기법을 통하여 케이스 방과제의 기대활동량이 평가되어진다. Table 4는 정규분포와 이중절단정규분포사이의 비교를 나타낸 것으로 개념적 차이를 명확하게 알 수 있다.

4.2 결과

본 연구에서는 설계과정에서의 불확정요소들(e.g. 심해파의 추정오차, 파랑변형, 주기 및 파력의 계산오차, 케이스저면과 잠석마운드사이의 마찰계수에 대한 불확실성

등)중에서 파력과 마찰계수에 대해서만 이중절단정규분포를 적용하고, 그 이외에는 정규분포를 그대로 이용하였다. 이러한 이유는 파력과 마찰계수를 제외한 불확정요소들에 대한 실험이나 관측을 통한 자료들이 아직 불충분하기 때문에 현시점에서 각각의 발생확률분포에서의 상·하 절단점(truncation points)을 명확하게 결정할 수 없기 때문이다.

Fig. 6은 앞 절에서 설명한 바와 같이 이중절단정규분포를 적용함으로써 발생된 파력과 마찰계수의 계산변수들( $P_e/P_c$ 와  $f/f_D$ )에 대한 simulation결과의 예를 보이고 있다. 그림으로부터 모든 변수들이 상·하 절단점내에 분포하고 있음을 알 수 있으며, Monte-Carlo모의 기법하에서 이러한 변수들만을 이용하여 기대활동량을 평가하는 것은 매우 합리적이고, 또한 기대활동량의 신뢰성 있는 평가를 위해 매우 중요한 사항이라고 하겠다.

Fig. 7은 기존의 방법과 본 연구에서 제안된 현재의 방



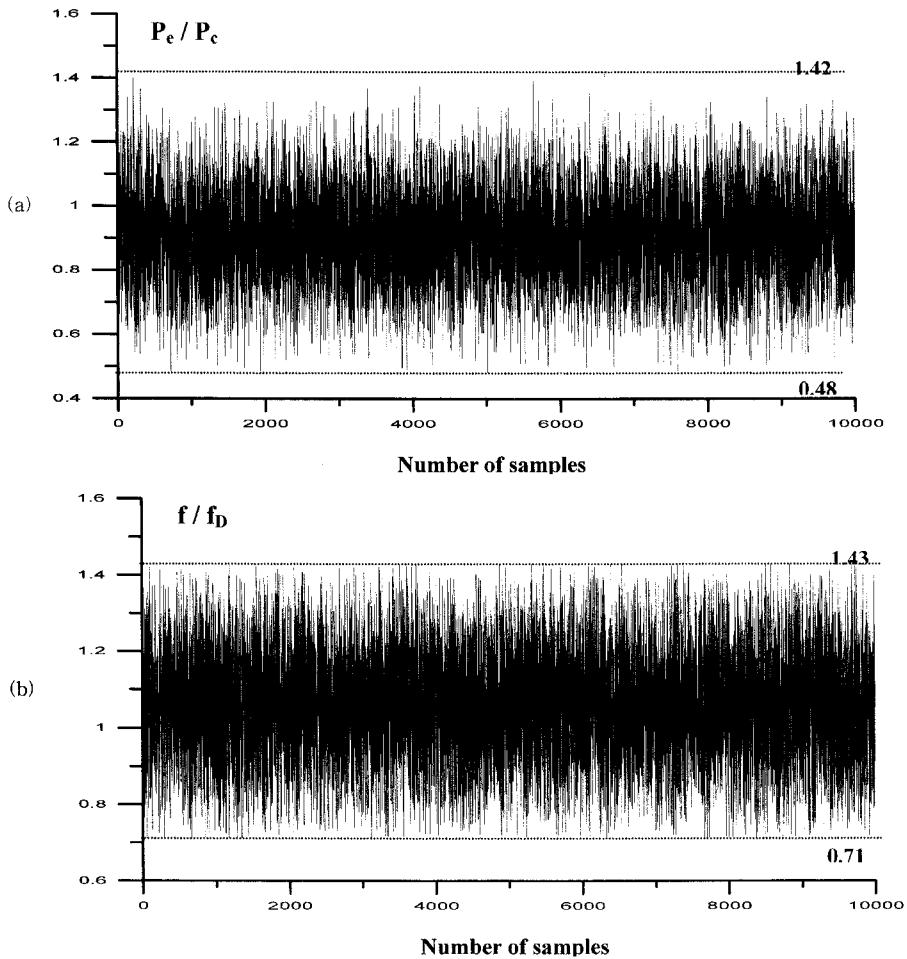


Fig. 6. Calculation examples of random variable using the doubly-truncated normal distribution [(a)Wave force, (b) Friction factor].

범으로 평가되어진 기대활동량의 비교를 나타낸다. 기존의 방법(Takayama and Ikeda, 1993)은 불확정요소들의 영향을 신뢰성설계법의 계산과정에 고려하기 위하여 Table 1의 조건하의 정규분포만을 적용하여 기대활동량을 평가한 것이며, 현재의 방법은 파력과 마찰계수에 대해서는 이중절단정규분포를 적용하고, 그 이외의 불확정요소들에 대해서는 Table 1의 조건하의 정규분포를 그대로 적용하여 평가한 것이다. 현재의 방법을 적용함으로써 기대활동량은 기존의 방법보다 감소함을 알 수 있으며, 그 감소량은 수심이 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 이것은 Monte-Carlo모의 기법하에서 정규분포를 적용함으로써 비합리적으로 계산되어진 활동량들이 이중절단정규분포의 적용에 의하여 제거되어짐을 의미한다. 그리고 허용기대활동량

(allowable expected sliding distance)이 정량적으로 0.30 m (Shimosako and Takahashi, 1998)와 0.10 m (Goda and Takagi, 2000)로 제안되어지고 있는 최근의 연구결과를 고려할 때에, Fig. 7을 통하여 제시된 기대활동량의 감소량 (0.02 m, 0.06 m, 0.07 m 및 0.12 m)은 무시할 수 없는 큰 값을 알 수 있으며, 결과적으로 이중절단정규분포의 적용에 대한 본 연구의 제안은 매우 중요하며, 타당성이 있음을 알 수 있다. 비록 현재의 연구에서는 파력과 마찰계수에 대해서만 이중절단정규분포가 적용되었지만, 그 이외의 불확정요소들에 대해서도 적용되어질 필요성이 있으며, 따라서 각각의 발생확률분포상에서의 절단점을 결정하기 위하여 향후 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 여겨진다.

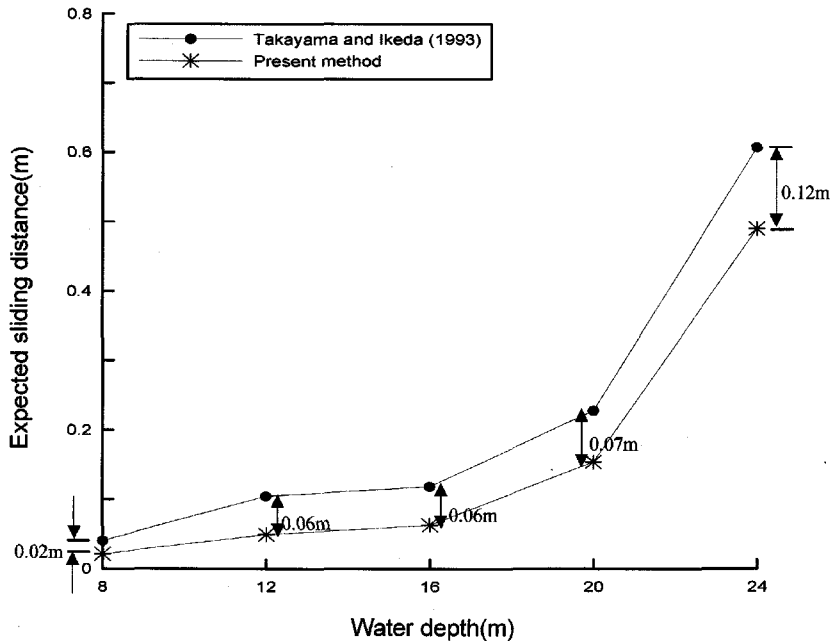


Fig. 7. Comparisons of expected sliding distance according to water depth.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기대활동량을 이용하는 케이슨방파제의 신뢰성 설계법(level III)과 관련하여 Monte-Carlo모의 기법을 이용하여 계산되어지는 기대활동량 평가의 향상을 위해 지금까지 이용되어온 정규분포대신에 이중절단정규분포를 적용할 것을 제안하였다. 기존의 정규분포를 이용함으로써 불확정요소들의 영향을 설계과정에 고려하는 계산 과정에서 비합리적인 부분이 발생됨을 증명하였으며, 대안으로서 상·하 절단점을 가진 이중절단정규분포의 적용에 대한 방법 및 타당성을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 이중절단정규분포를 적용함으로써 기대활동량은 기존의 정규분포만을 적용한 경우보다 감소함을 알 수 있으며, 그 감소량은 수심이 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 이것은 Monte-Carlo모의 기법하에서 정규분포를 적용함으로써 비합리적으로 계산되어진 활동량들이 이중절단정규분포의 적용에 의하여 제거되어짐을 의미하며, 기대활동량의 향상된 평가를 위해 매우 중요한 사항이라고 하겠다.

본 연구에서는 케이슨방파제만을 대상으로 하고 있지만, 이중절단 정규분포의 적용은 다양한 해안구조물 및 타 공학 분야에도 적극 활용될 수 있으며, 따라서 많은 분야에 적극 응용되기를 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 전북대학교 박사후 연수(Post-doc. Program) 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Goda, Y. and Takagi, H. (2000). A reliability design method of caisson breakwaters with optimal wave heights. *Coastal Eng. J.*, 42(4), 357-487.
- Goda, Y. (2001). Extreme wave statistics for reliability-based design of caisson breakwaters. *Proc. of Int. workshop on Advanced Design of Maritime Structures in the 21st century*, PHRI&MLIT, Japan, 1-13.
- Hanzawa, M., Yamagata, N., Nishihara, T., Takahashi, S., Takayama, T. and Tomiyasu, R. (2003). Performance of composite breakwaters from the view point of expected sliding distance of caisson. *Proc. of Coastal Structures 2003*, ASCE, 283-294.
- Investigation and Design Office of the Second Port Construction Bureau, Ministry of Transport. (1986). Unevenness on top surface of rubble mound.
- Ikesue, S. (1999). Study on reliability design method of composite breakwaters using the expected sliding distance.

- Master thesis, Kyoto University (in Japanese).
- Kim, T.M. and Takayama, T. (2002). The development of reliability design system for a caisson type breakwater. Fourth Int. Summer Symposium, JSCE, 183-186.
- Kim, T.M. and Takayama, T. (2003). Computational Improvement for expected sliding distance of a caisson-type breakwater by introduction of a doubly-truncated normal distribution. *Coastal Eng. J.*, 45(3), 387-419.
- Kim, T.M. (2004). New estimation of sliding distance for improvement of breakwater reliability design. Ph. D thesis, Kyoto University.
- Morihira, M., Kihara, C. and Horikawa, H. (1978). Friction factor of composite breakwater on rubble mound. Proc. 25th Japanese Conf. Coastal Eng., JSCE, 337-342 (in Japanese).
- Morihira, M. and Adachi, K. (1979). Friction factor of composite breakwater on rubble mound (Second Rept). Proc. 26th Japanese Conf. Coastal Eng., JSCE, 446-450 (in Japanese).
- Nagao, T., Kadowaki, Y. and Terauchi, K. (1995). Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method (1st report: Study on the safety against sliding). Report of the Port and Harbour Research Institute, 34(1), 39-70 (in Japanese).
- Oumeraci, H. (1994). Review and analysis of vertical breakwater failure - lessons learned. *Coastal Eng.*, 22, 3-29.
- Shimosako, K. and Takahashi, S. (1998). Reliability design method of composite breakwater using expected sliding distance. Report of the Port and Harbour Research Institute, 37(3), 3-30 (in Japanese).
- Shimosako, K. and Takahashi, S. (1998). Application of deformation-based reliability design for coastal structures - expected sliding distance method of composite breakwaters. Proc. of Coastal Structures'99, ed.I.J.Losada, Spain, Balkemare, 363-371.
- Takayama, T. and Fujii, H. (1991). Probabilistic estimation of stability of slide for caisson type breakwater. Report of the Port and Harbour Research Institute, 30(4), 35-64 (in Japanese).
- Takayama, T. and Ikeda, N. (1993). Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design. Report of the Port and Harbour Research Institute, 31(5), 3-32.
- Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Komatsu, K., Todoroki, M. and Osato, M. (1976). An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several type of breakwater and sea walls. Tech. Note of the Port and Harbour Research Institute, 246, 38 (in Japanese).
- Tanimoto, K., Takahashi, S. and Myose, K. (1984). Experimental study of random forces on upright sections of breakwaters. Report of the Port and Harbour Research Institute, 23(5), 47-99.

---

Received June 29, 2005

Accepted October 17, 2005