신뢰성 이론에 의한 하중 및 저항계수 설계

Reliability-Based Load and Resistance Factor Design

손 승 요*
Son, Seung Yo
이 종 헌**
Lee, Jong Heon

Abstract

The Advanced First Order Second Moment(AFOSM) method is commonly used to determine partial safety factors in the development of probability based LRFD code. However, design format using load and resistance factors based on this method may result in different reliability levels from specified ones. Reliability-Conditioned(RC) method recently proposed by Ayyub et al. gives partial safety factors which do not affect the target reliability level as specified. However, this method has some numerical difficulties and the procedure is not consistent.

The proposed RC/AFOSM combined method has not only numerical consistency, but also results in almost constant partial safety factors with respect to various design conditions, and the resulting reliability levels are very close to specified ones.

요 지

LRFD 설계형식의 개별안전계수를 확률이론에 의하여 구할 때 주로 AFOSM 방법이 이용되어 왔다. 그러나 이 방법에 의해 구한 하중 및 저항계수를 사용하면 결과적인 신뢰성지수는 목표 신뢰성지수와 다를 수 있다. 최근 Ayyub 등이 제안한 Reliability-Conditioned(RC) 방법은 목표 신뢰성지수에 부합하지만 계산의 신속성 및 일관적 체계를 유지할 수 없다.

본 연구에서 제안한 RC/AFOSM 조합방법을 이용하면 계산의 체계가 일관적이고, 다양한 설계조건에 대하여 거의 일정한 개별안전계수를 결정할 수 있으며 이로부터 결과되는 신뢰성지수도 목표 신뢰성지수에 매우 근접하다.

1. 서 론

구조물의 설계에는 많은 불확실성이 내재된다. 즉, 설계하중으로부터 실제하중의 가변적 차이, 실제 시공된 재료의 성질에 대한 부정확성, 설계에서 고려한 하중으로 인한 구조물의 거동예측에 단순화된 가정을 사용할 뿐 아니라 시공오차 등으로 인하여 절대적인 안전성의 부여가 곤란하다. 그러나 이러한 불확실성을 정량적으로 취급하여 확률적 해석을 하면 설계에 포함되는

* 정회원 · 아주대학교 공과대학 교수, 기계공학과
** 정회원 · 성균관대학교 대학원, 토목공학과

위험요소를 허용수준, 즉, 파괴확률 P_f 이내로 제한할 수 있다.

설계규준은 가능한 한 간단하고, 설계자에게 익숙한 형태로 표시되어야 할 뿐 아니라 구조부재에 대한 안전성 수준이 일정해야 한다. 허용응력설계법에서는 안전계수를 고려한 허용응력을 사용함으로 안전성을 도모하며, 강도설계법에서는 하중 및 저항계수를 사용하여 안전에 대한 여유를 확보하고 있다. 그러나 현행의 계수들은 경험 및 직관에 의하여 결정된 것으로 일관성있는 신뢰성 수준을 기대할 수 없다. 어떠한 설계방식이든 이들 계수를 확률이론에 근거하여 정한다면, 전적으로 확률적 해석을 하지 않고도 신뢰성 조건을 만족하는 설계를 할 수 있다.

본 연구에서는 LRFD 방식[5]에 있어서, 지정된 파괴확률 P_f 혹은 목표 신뢰성지수 β_0에 대한 하중 및 저항계수를 확률이론에 의하여 구하는 방법을 검토하고, 보다 일정한 신뢰성 수준을 얻을 수 있는 방법을 제시하고자 한다. LRFD 설계형식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\phi\bar{R}\geq\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\bar{L}_i \qquad (1)$$

여기서 ϕ는 강도 R의 감소계수이며, γ_i는 하중증가계수, L_i는 하중효과이고 $\bar{R}$ 및 $\bar{L}$는 각 확률변수에 대한 평균값을 의미한다.

2. 신뢰성 설계방법

1947년 Freudenthal[6]이 안전성에 대한 합리적 해석을 위해 확률이론을 사용할 것을 주장한 이래 이론적으로나 시방서에의 적용면에서 많은 진전을 보아 왔으나, 신뢰성 설계방법이 실용화된 것은 1969년 Cornell이 FOSM 방법[4]을 제안하고 나서부터라 할 수 있다. 그러나 Cornell의 평균 2차모멘트방법은 다음과 같은 단점이 있다.

(1) 한계상태함수가 비선형일 때 기본확률변수의 평균값에 대해 선형화하므로, 선형화의 참고점으로부터 멀어질수록 오차가 커진다.

(2) 같은 문제에 대해 한계상태함수의 형태를 바꾸면 다른 결과가 나오는 경우가 있어 불변성이 결여되어 있다.

(3) 파괴확률에 관한 식은 기본확률변수가 정규분포이거나 한계상태함수가 대수정규분포 변수의 곱으로 표시될 때에만 유효하다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 제안된 것이 AFOSM 방법이다[7].

2.1 AFOSM 방법

설계를 지배하는 한계상태함수는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$Z=g(X_1,X_2,\cdots,X_n) \qquad (2)$$

여기서 X는 작용하중이나 강도를 표시하는 기본확률변수들이며, $Z<0$일 때 파괴상태를 나타낸다. AFOSM 방법에서는 $g(\cdot)$를 선형화 할 때 파괴면상의 점$(X_1^*,X_2^*,\cdots,X_n^*)$ 주위로 Taylor 급수전개를 하고, 확률변수 X들은

$$X_i'=\frac{X_i^*-\bar{X}_i}{\sigma_{X_i}} \qquad (3)$$

에 의해 표준변량 X'들로 변환한 환산좌표계를 이용한다. 이때 X들이 상관관계에 있다면 상관되지 않은 변수들로 변환한다[10]. 신뢰성지수 β는 X' 환산좌표계의 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리로 정의되며[1], 파괴확률과 신뢰성지수 β의 관계는 근사적으로 다음과 같다.

$$P_f=1-\Phi(\beta) \qquad (4)$$

여기서 Φ는 표준정규 누적분포함수이다.

식 (1)과 같은 설계형식에 대한 한계상태식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z=\phi\bar{R}-\gamma_1\bar{L}_1-\gamma_2\bar{L}_2-\cdots-\gamma_n\bar{L}_n=0 \qquad (5)$$

위의 식에서 $\phi\bar{R}$, $\gamma_i\bar{L}_i$들은 파괴면상에 있어야 하므로 하중 및 저항계수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\phi=\frac{R^*}{\bar{R}} \qquad (6)$$

$$\gamma_i=\frac{L_i^*}{\bar{L}_i} \qquad (7)$$

목표 신뢰성지수 β_0가 주어지면 그에 해당하는 파괴점은 다음 식들을 반복법으로 풀면 구할 수 있다.

$$\alpha_i^*=\frac{\left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right)_*\sigma_{X_i}}{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right)_*^2\sigma_{X_i}^2\right]^{1/2}} \qquad (8)$$

$$X_i^*=\bar{X}_i-\alpha_i^*\beta_0\sigma_{X_i} \qquad (9)$$

$$g(X_1^*,X_2^*,\cdots,X_n^*)=0 \qquad (10)$$

여기서 $\left(\frac{\partial g}{\partial X_i}\right)_*$는 파괴점에서의 도함수의 값이

며, α_i^*는 확률변수 X_i의 방향여현을 파괴점에서 계산한 값이다. 이때 확률변수가 비정규분포이면 등가 정규분포를 이용한다[9]. 식 (9)로부터

$$X_i^* = \overline{X}_i(1-\alpha_i^*\beta_0\Omega_{X_i}) \quad (11)$$

여기서 Ω_{X_i}는 확률변수 X_i의 변동계수이다. 따라서 변수들의 확률분포와 하중효과의 평균과 분산, 저항에 대한 변동계수가 주어지면 목표 신뢰성지수에 대응하는 저항의 평균값이 결정되고, 하중 및 저항계수는 식 (6), (7)과 (11)을 조합할 때 다음 식으로 구할 수 있다[1].

$$\phi = 1-\alpha_R^*\beta_0\Omega_R \quad (12)$$

$$\gamma_i = 1-\alpha_{L_i}^*\beta_0\Omega_{L_i} \quad (13)$$

설계형식에의 적용에 있어서 AFOSM 방법의 결점은 확률변수가 비정규분포일 경우 식 (12)와 (13)으로 구한 하중 및 저항계수가 식 (6) 및 (7)의 결과와 일치하지 않을 수 있다는 것이다. 또한 식 (12)와 (13)으로 구한 계수를 사용할 경우 그 결과적인 신뢰성지수 β는 목표 신뢰성지수 β_0와 다를 수 있다[6].

2.2 RC방법

등가 정규분포의 개념과 방향여현을 이용하지 않고, 설계변수의 신뢰성 조건으로부터 직접 파괴점을 구하여 식 (6)과 (7)에 의해 하중 및 저항계수를 계산하는 방법이 RC(Reliability-Conditioned) 방법이다[3]. 파괴가 일어난 후의 저항 R' 및 파괴를 일으키는 하중효과 L'의 확률밀도함수는 각각 다음과 같다[12].

$$f_{R'}(r) = \frac{f_R(r)[1-F_L(r)]}{P_f} \quad (14)$$

$$f_{L'}(l) = \frac{F_R(l)\cdot f_L(l)}{P_f} \quad (15)$$

여기서 $f_X(x)$와 $F_X(x)$는 각각 확률변수 X의 밀도함수와 누적분포함수이다. 이들 R'이나 L'의 평균값 또는 최빈값을 파괴점으로 계산하는 것은 매우 복잡하거나 또는 계산이 불가능할 수도 있으므로, 다음 식을 만족하는 점을 근사적인 파괴점으로 간주한다.

$$f_R(X^*) = f_L(X^*) \quad (16)$$

즉, 파괴점 X^*는 저항과 하중효과의 확률밀도함수 $f_R(R)$과 $f_L(L)$의 교점을 의미한다.

확률변수들이 독립적인 경우 하중 및 저항계수를 구하는 방법은 다음과 같다.

(1) 분산감소기법(Variance Reduction Techniques) 등을 이용한 시뮬레이션방법[2]에 의해 목표 신뢰성지수 β_0에 대응하는 저항의 평균값 $\overline{R}$를 구한다.

(2) 다음 식을 연립하여 풀어 파괴점을 구한다.

$$Z = R^* - L_1^* - L_2^* - \cdots - L_n^* = 0 \quad (17)$$

$$[F_{L_i}(L_i^*)]^{w_i} - [F_{L_j}(L_j^*)]^{w_j} = 0\ ;$$
$$i, j = 1, \cdots, n,\ i \neq j \quad (18)$$

$$f_R(R^*) = f_{L_1}(L_1^*) f_{L_2}(L_2^*)\cdots f_{L_n}(L_n^*) \quad (19)$$

여기서 w_i는 하중 L_i가 L_i^*를 넘는 경우에 대한 상대빈도를 나타내는 가중계수로써 $0 < w_i \leq 1$의 범위에 있어야 한다. 위의 $(n+1)$개의 식을 $(n+1)$개의 미지수에 대해 풀면 파괴점을 구할 수 있으며 그 절차는 다음과 같다. 먼저 $\overline{R}$보다 작은 R^*값과 $\overline{L}$보다 큰 L^*를 가정한다. 식 (17)과 (18)을 만족하는 새로운 L^*를 Newton의 반복법을 이용하여 구한다. 이때 k번째 과정에 대한 $\Delta L_{i,k-1}$은 다음 식으로부터 계산한다.

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial Z}{\partial L_i}\Delta L_{i,k-1} + Z = 0 \quad (20)$$

$$w_1 f_{L_1}(L_{1,k-1}^*)\cdot[F_{L_1}(L_{1,k-1}^*)]^{w_1-1}\cdot \Delta L_{1,k-1} - w_i f_{L_i}(L_{i,k-1}^*)\cdot [F_{L_i}(L_{i,k-1}^*)]^{w_i-1}\cdot \Delta L_{i,k-1} = [F_{L_i}(L_{i,k-1}^*)]^{w_i} - [F_{L_1}(L_{1,k-1}^*)]^{w_1}\ ;$$
$$i = 2, \cdots, n \quad (21)$$

그러면 파괴점을 계산하는 k번째 과정에서의 $L_{i,k}^*$는 윗식에서 구한 증분 $\Delta L_{i,k-1}$을 이용하여 다음 식으로 얻어진다.

$$L_{i,k}^* = L_{i,k-1}^* + \Delta L_{i,k-1}\ ;\ i = 1, \cdots, n \quad (22)$$

새로운 파괴점이 식 (19)를 만족하지 않으면 R^*를 적절히 변경하고 위의 계산을 반복한다.

(3) 식 (6)과 (7)로부터 하중 및 저항계수를 계산한다.

AFOSM 방법과는 달리 RC 방법에서는 목표 신뢰성지수 β_0에 대응하는 $\overline{R}$를 먼저 구한 다음 파괴점을 찾고 그로부터 하중 및 저항계수를 계산하므로, 이들 계수를 적용한 한계상태함수의 신뢰성지수 β는 이론적으로는 β_0와 일치한다. 또한 한계상태함수의 방향여현으로 파괴점을 결정하지 않고 확률변수의 신뢰성조건, 즉, 하중효과들의 상대빈도 또는 중요도에 대한 가중계

수를 사용하므로 보다 실제적인 계수들을 얻을 수 있다. 그러나 $\overline{R}$를 시뮬레이션방법에 의해 구할 때 분산감소기법을 사용하더라도 시행착오법에 많은 시간이 소요되며, 여전히 분산이 존재함을 피할 수 없으므로 일대일로 β_0에 대응하는 $\overline{R}$를 구하기 어렵고 그에 근사한 값만을 얻을 수 있으며 해석도중에 시뮬레이션을 해야 하는 과정상의 번거로움을 피할 수 없다. 파괴점도, 파괴시의 저항이나 하중효과의 확률분포로부터 직접 구하지 않고 식 (16)에 의한 근사적인 파괴점을 이용하므로, β_0에 대응하는 $\overline{R}$는 AFOSM 방법에 의하여 정하는 것이 RC 방법보다는 더 실용적이라 할 수 있다. 또한 파괴점을 Newton의 반복법으로 구할 때 R^*와 L^*의 가정값이 실제값에서 조금만 멀어져도 연산이 수렴하지 않으므로 실제값에 근접한 초기값을 가정한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

2.3 RC/AFOSM 조합방법

목표 신뢰성지수 β_0에 대응하는 $\overline{R}$를 AFOSM 방법에 의해 구하고 파괴점을 RC 방법에 의하여 구하되, R^*와 L^*의 초기값을 각각의 평균값 부근의 값으로 가정하여도 수렴이 되도록 연산과정을 수정한 것이 RC/AFOSM 조합방법이다.

이 방법에 의하여 하중 및 저항계수를 구하는 절차는 다음과 같다.

(1) AFOSM 방법에 의해 β_0에 대응하는 저항의 평균값 $\overline{R}$를 구한다. 이는 한계상태함수의 신뢰성지수를 계산할 때 사용되는 값으로, AFOSM 방법의 반복법을 이용하면 $\beta=\beta_0$되는 $\overline{R}$를 구할 수 있다. 이 값은 파괴점을 구할 때 $f_R(R^*)$의 계산에 이용된다.

(2) 저항 및 하중효과의 파괴점 R^*와 L^*를 가정한다.

(3) 식 (17)과 (18)을 만족하는 새로운 L^*를 반복법으로 구한다. 이때 k번째 과정에 대한 하중효과의 증분 $\Delta L_{i,k-1}$은 다음 식으로 계산한다.

$$\Delta L_{1,k-1}=\Big\{(R^*-L_1^*-L_2^*-\cdots-L_n^*)-[F_{L1}(L_1^*{}_{,k-1})]^{w_1}\cdot\sum_{i=2}^{n}\frac{1}{(wFf)_i}+\sum_{i=2}^{n}\frac{[F_{Li}(L_i^*{}_{,k-1})]^{w_i}}{(wFf)_i}\Big\}\Big/\left\{1+(wFf)_1\cdot\sum_{i=2}^{n}\frac{1}{(wFf)_i}\right\} \quad (23)$$

$$\Delta L_{i,k-1}=\frac{[F_{L1}(L_1^*{}_{,k-1})]^{w_1}-[F_{Li}(L_i^*{}_{,R-1})^{w_i}]+(wFf)_1\cdot}{(wFf)_i}\frac{\Delta L_{1,k-1}}{} ;\ i=2,\cdots,n \quad (24)$$

여기서

$$(wFf)_i=w_i[F_{Li}(L_i^*{}_{,k-1})]^{w_i-1}\cdot f_{Li}(L_i^*{}_{,k-1})$$

(4) 새로운 파괴점이 식 (19)를 만족하지 않으면 R^*를 수정하여 (3)단계를 반복한다.

(5) 식 (6)과 (7)로부터 하중 및 저항계수를 계산한다.

AFOSM 방법으로 구한 계수를 사용할 때 그 결과적인 $\overline{R}$를 식 (5)로부터 계산하여 그에 대응하는 신뢰성지수 β를 구하면 β_0와 다를 수 있다. 그러나 AFOSM 방법으로 β_0에 대응하는 $\overline{R}$를 먼저 구하면 그 결과적인 파괴확률은 RC 방법에서 시뮬레이션방법으로 구한 결과와 매우 근사하다. 또한 파괴점을 구하는 식 (23)과 (24)에는 많은 연산이 포함되어 있지만 R^*와 L^*의 초기값을 각각의 평균값 부근으로 하여도 수렴하므로 수치해석상의 난점을 피할 수 있을 뿐아니라, RC 방법에서 제시한 연산과정보다 반복회수가 적어져서 보다 효율적이라 할 수 있다.

3. 수치해석 및 고찰

RC/AFORM 조합방법의 유효성을 보이고 각 방법을 비교하기 위해 LRFD 형식에서 다음과 같은 사하중과 활하중의 조합을 예로 든다.

$$\phi' R_n \geq \gamma_D' D_n+\gamma_L' L_n \quad (25)$$

여기서 상첨자는 저항 및 하중효과의 공칭값(nominal value)에 대한 계수를 의미한다. 저항 R 및 사하중 D, 활하중 L에 대한 공칭값 대 평균값의 비(bias factors), 즉, ν_R, ν_D, ν_L을 이용하면 식 (25)를 평균값에 대한 식으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\phi\overline{R}\geq\gamma_D\overline{D}+\gamma_L\overline{L} \quad (26)$$

여기서

$$\phi=\nu_R\phi',\ \nu_R=\frac{R_n}{\overline{R}}$$

표 1. R,D,L에 대한 통계자료—예제 1.

	확률변수		
	R	D	L
변동계수	0.11	0.10	0.25
확률분포	정규분포	대수정규분포	EXTREME 2
공칭—평균비	0.95	0.95	1.18

$$\gamma_D=\nu_D\gamma_D',\ \nu_D=\frac{D_n}{\overline{D}}$$

$$\gamma_L=\nu_L\gamma_L',\ \nu_L=\frac{L_n}{\overline{L}}$$

3.1 RC/AFOSM 조합방법의 예민도 분석

예제 1 각 방법의 비교를 위해 참고문헌(3)의 예제 1을 택했다. 여기서 가중계수 w_i는 1로 가정하였으며 R, D, L에 대한 통계자료는 표 1과 같다.

목표 신뢰성지수 β_0를 2.5로 할 때 하중비 $\overline{L}/\overline{D}=2$에 대한 하중 및 저항계수는 표 2와 같다. 표 2에서의 결과를 보면 AFOSM 방법에 의한 계수를 사용할 경우 결과적인 β는 β_0와 차이가 있으며, RC 방법과 RC/AFOSM 조합방법에서는 β_0와 일치함을 알 수 있다. 모든 변수들의 확률분포가 정규분포일 때는 AFOSM 방법에 의한 β는 β_0와 일치한다.

RC/AFOSM 방법의 예민도 분석을 위해 $\Omega_R=0.15$이고 $\Omega_L=0.2\sim0.3$인 경우 평균값에 대한 하중 및 저항계수를 나타낸 것이 그림 1~3이다. 이들은 참고문헌(3)의 그림 4, 8, 5와 거의 일치함을 알 수 있다.

또한 이들 계수는 $\overline{L}/\overline{D}$의 변화에 대해 예민

표 2. 각 방법의 비교—예제 1.

방법	목표신뢰성지수 $\beta_0(P_f)$	저항 및 하중계수			파괴점			결과적인 $\overline{R}$	결과적인 $\beta(P_f)$
		$\phi(\phi')$	$\gamma_D(\gamma_D')$	$\gamma_L(\gamma_L')$	R^*	D^*	L^*		
AFOSM	2.5 (0.00621)	0.910 (0.958)	1.014 (1.067)	1.591 (1.348)	$4.879\overline{D}$	$1.014\overline{D}$	$3.863\overline{D}$	$4.602\overline{D}$	2.1 (0.02296)
RC		0.768 (0.808)	1.176 (1.238)	1.488 (1.261)	$4.151\overline{D}$	$1.176\overline{D}$	$2.976\overline{D}$	$5.405\overline{D}$	2.5 (0.0067)
RC/AFOSM		0.770 (0.811)	1.177 (1.239)	1.473 (1.248)	$4.122\overline{D}$	$1.177\overline{D}$	$2.945\overline{D}$	$5.355\overline{D}$	2.5 (0.00621)

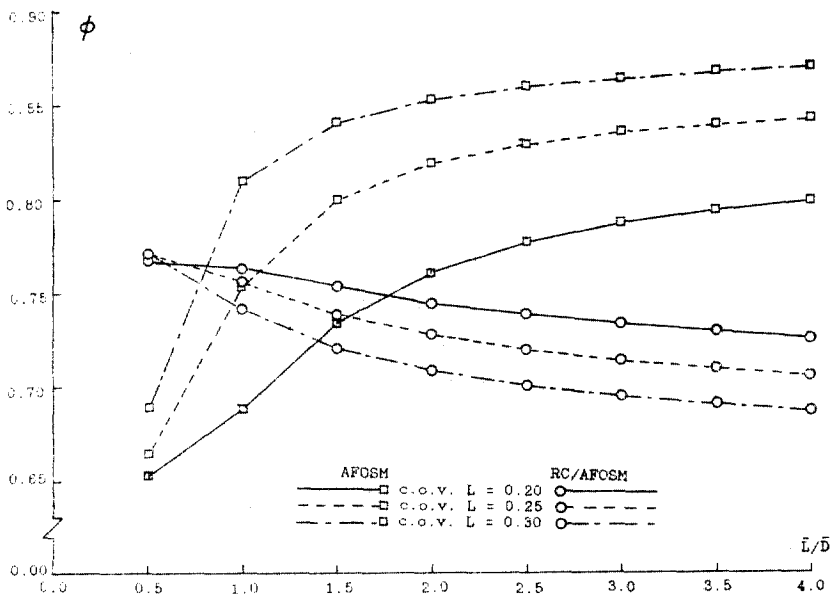

그림 1. 저항계수의 비교—예제 1

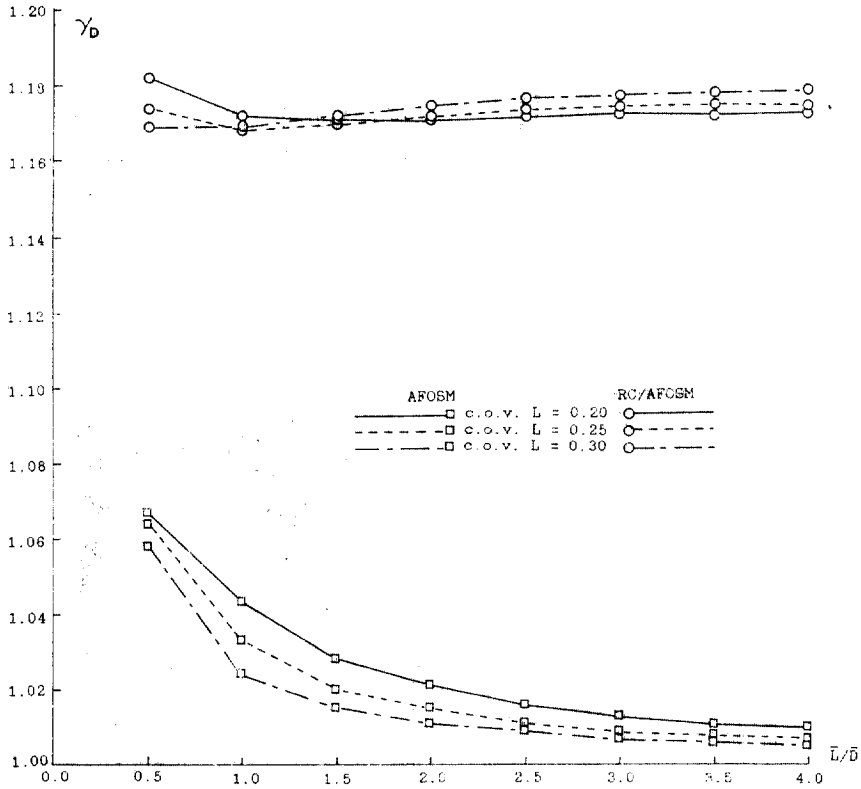

그림 2. 사하중계수의 비교—예제 1

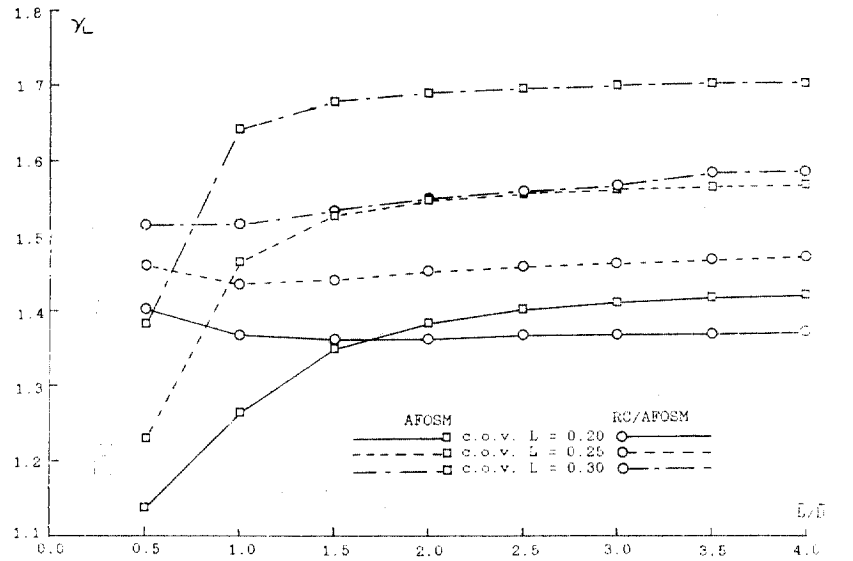

그림 3. 활하중계수의 비교—예제 1

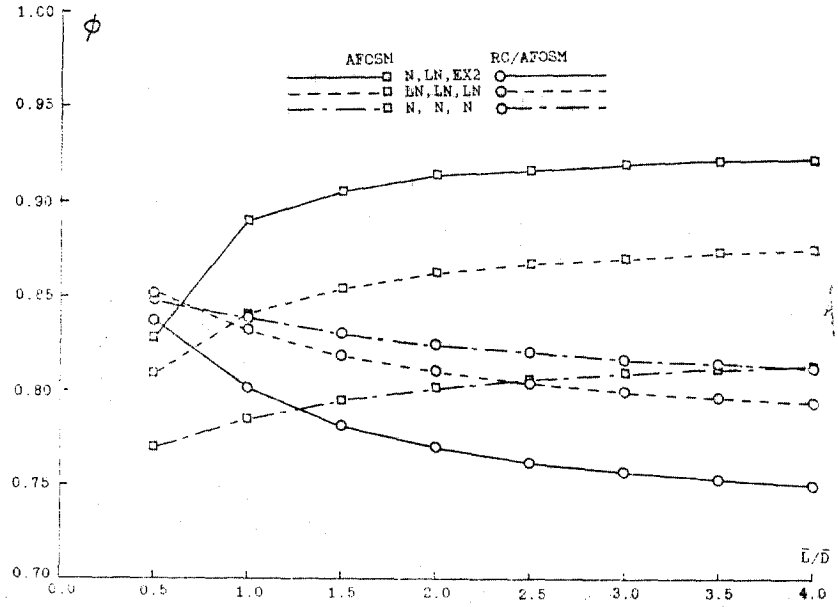

그림 4. 저항계수의 비교—예제 2

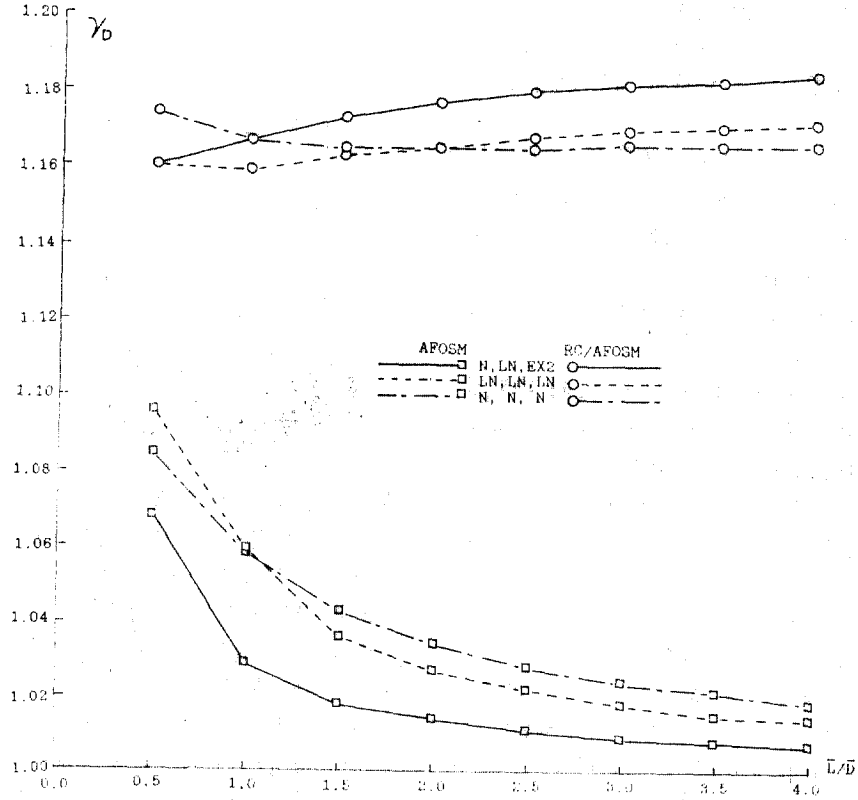

그림 5. 사하중계수의 비교—예제 2

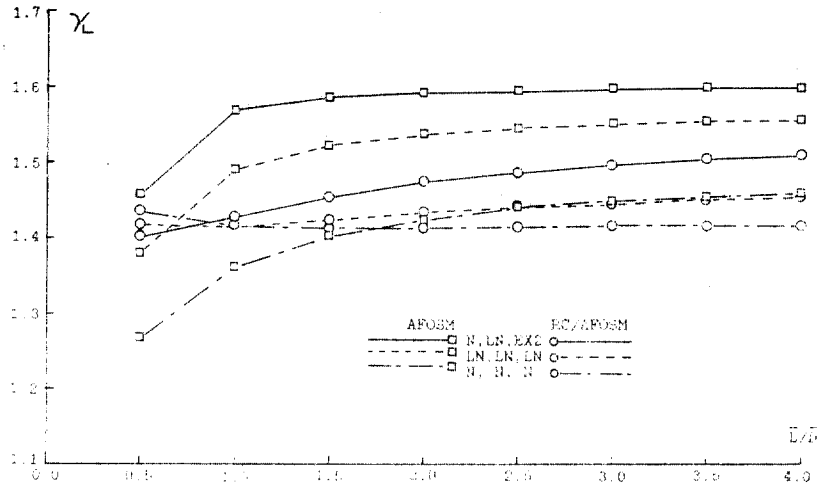

그림 6. 활하중계수의 비교—예제 2

하지 않으므로 넓은 범위의 설계조건에 적용할 수 있다.

예제 2 R, D, L의 확률분포에 따른 예민도 분석을 위해 기본확률변수들이 표 1과 같은 분포, 모두 정규분포 및 모두 대수정규분포인 경우의 하중 및 저항계수를 나타낸 것이 그림 4~6이다.

ϕ, γ_D, γ_L에 대한 범위가 AFOSM 방법에서는 각각 0.06~0.11, 0.01~0.03, 0.14~0.21의 분포를 보이고 있으나, RC/AFOSM 조합방법에서는 0.02~0.06, 0.01~0.02, 0.01~0.09로써 확률분포의 변화에 대해서도 AFOSM 방법보다 덜 예민함을 알 수 있다.

예제 3 식 (18)의 w_i는 하중 L_i가 파괴점 L_i^*를 넘을 확률에 관한 가중계수로써, 수치적으로는 두 하중효과 사이의 파괴점까지의 누적분포함수의 상대적 관계를 나타낸다. 그러나 이들 관계를 지수형태로 표시한 것은 개념의 직접적인 적용이라 볼 수 없으므로 곱의 형태인 다음 식의 결과와 비교하였다.

$$w_i[F_{Li}(L_i^*)]-w_j[F_{Lj}(L_j^*)] = 0 \; ; \; i,j=1,\cdots,n, \; i \neq j \qquad (27)$$

표 1의 분포와 변동계수에 대해 $L/D=2$인 경우 식 (18)에 의한 계수와 식 (27)에 의한 계수를 비교한 것이 그림 7이다.

위의 결과는 $w_D=1$에 대한 w_L의 변화에 따

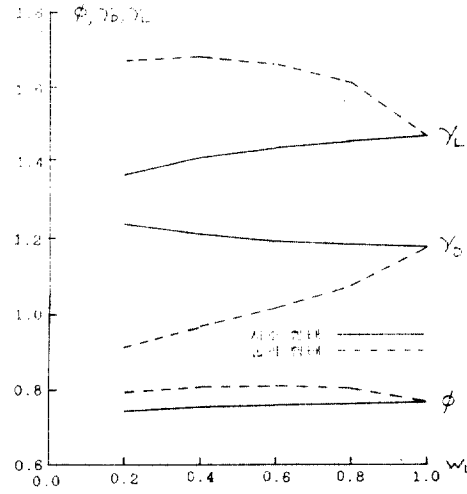

그림 7. 가중계수—예제 3

른 관계를 표시한 것으로, w_L이 작아질수록 두 방법사이의 차이가 커지고 있음을 보여준다. 그러나 두 하중효과사이의 누적분포함수의 상대적 관계로부터 각각의 가중계수를 얻는다면 두 방법의 결과는 같을 것이다. 실용적으로는 파괴점까지의 누적분포함수의 비교다는 하중이 파괴점을 넘는 빈도 또는 중요도의 비가 직접적용에 더 유리할 것이므로, 지수형태와 곱의 형태 중 어느 것이 더 바람직할는지에 대해서는 많은 통계자료를 통한 추가 연구가 필요하다고 본다.

3.2 시방서의 개별안전계수(Partial Safety Factors)

시방서의 개별안전계수 채택은 현행 규정의 신뢰성 수준을 검토하여 적절한 목표 신뢰성지수를 선정하고, 그에 대한 하중 및 저항계수를 구하는 단계로 이루어진다. 시방서에서는 설계

표 3. R,D,L의 확률분포—예제 4.

	확률변수		
	R	D	L
확률분포	대수정규분포	정규분포	EXTREME 1

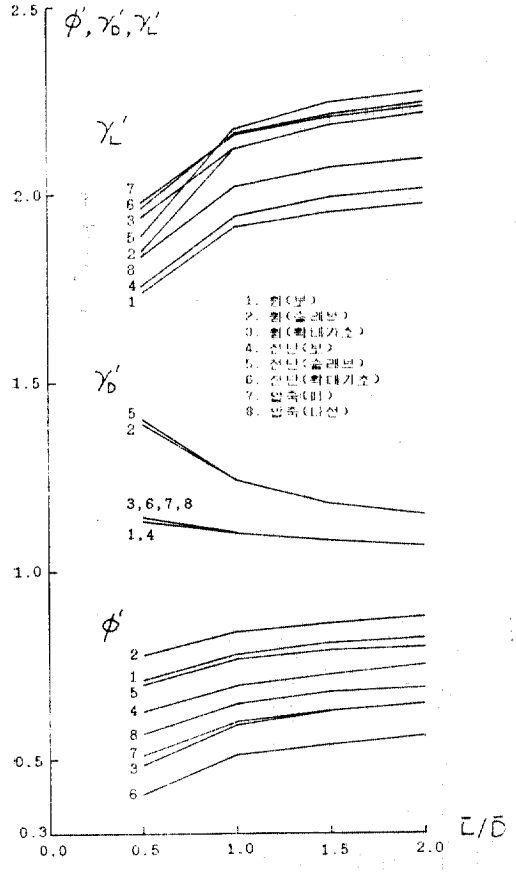

그림 8. AFOSM 방법에 의한 개별안전계수—예제 4

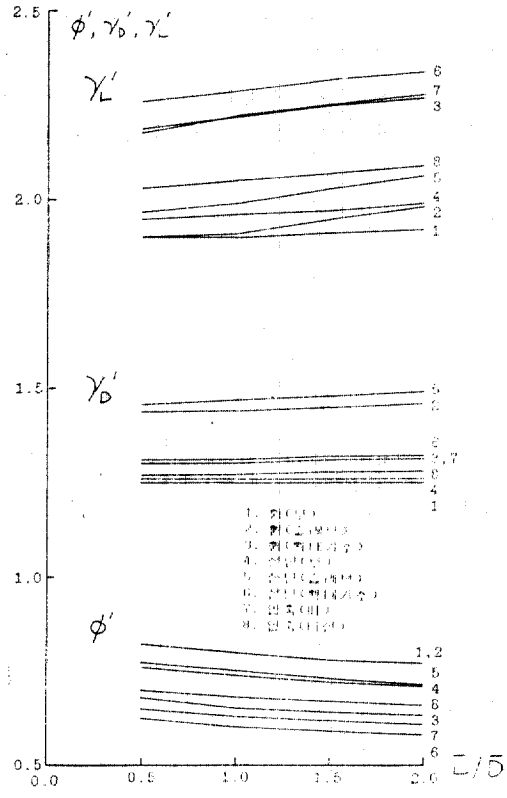

그림 9. RC/AFOSM 조합방법에 의한 개별안전계수—예제 4

표 4. R,D,L의 통계자료—예제 4.

		변동계수			공칭—평균비			목표신뢰성지수
		Ω_R	Ω_D	Ω_L	$R_n/\bar{R}$	$D_n/\bar{D}$	$L_n/\bar{L}$	β_0
휨	보	0.16	0.10	0.26	1/1.12	1/1.05	1/1.20	3.0
	슬래브	0.16	0.24	0.35				2.8
	확대기초	0.18	0.10	0.26				4.0
전단	보	0.17	0.10	0.26	1/1.09	1/1.05	1/1.20	3.2
	슬래브	0.17	0.24	0.35				3.0
	확대기초	0.19	0.10	0.26				4.2
압축	띠	0.17	0.10	0.26	1/1.05	1/1.05	1/1.20	4.0
	나선	0.17	0.10	0.26				3.5

의 단순화를 위하여 넓은 범위의 설계조건에 대해 하나의 계수를 사용하므로, 모든 경우에 대한 신뢰성 조건을 전부 만족할 수는 없다. 따라서 시방서의 개별안전계수는 각 설계조건에 대한 신뢰성 수준의 변동이 가장 작게 되는 계수를 구하는 최적화 문제이다[11].

예제 4 AFOSM 방법과 RC/AFOSM 조합방법에 의한 개별안전계수 추정결과를 비교하기 위하여 참고문헌(13)의 통계자료를 예로 들었다. 여기서 사용한 통계자료는 표 3 및 표 4와 같다.

두 방법에 의한 하중 및 저항계수의 공칭값, 즉, ϕ', γ_D', γ_L'을 표시한 것이 그림 8,9이다.

그림에서 보듯이 AFOSM 방법보다 RC/AFOSM 조합방법에 의한 계수들이 $\bar{L}/\bar{D}$의 변화에 대해 덜 예민하다는 것을 알 수 있다.

각 방법에 의한 개별안전계수 결과를 표시한 것이 표 5이다.

위에서 AFOSM 방법에 의한 계수는 참고문헌(13)의 값을 그대로 인용하였고, RC/AFOSM

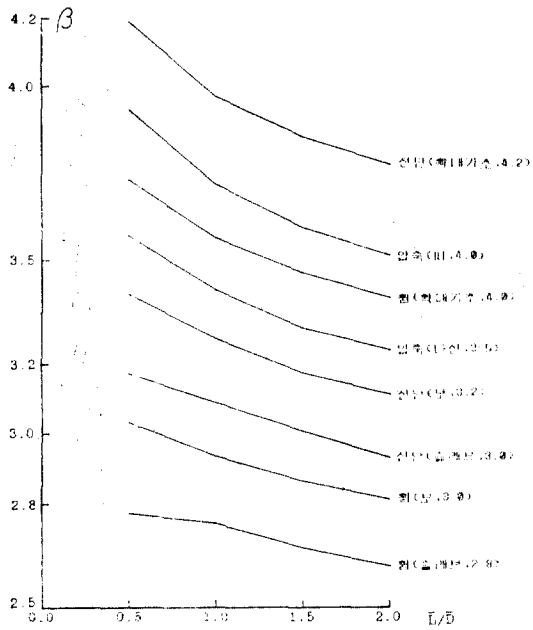

그림 10. AFOSM 방법에 의한 신뢰성지수—예제 4

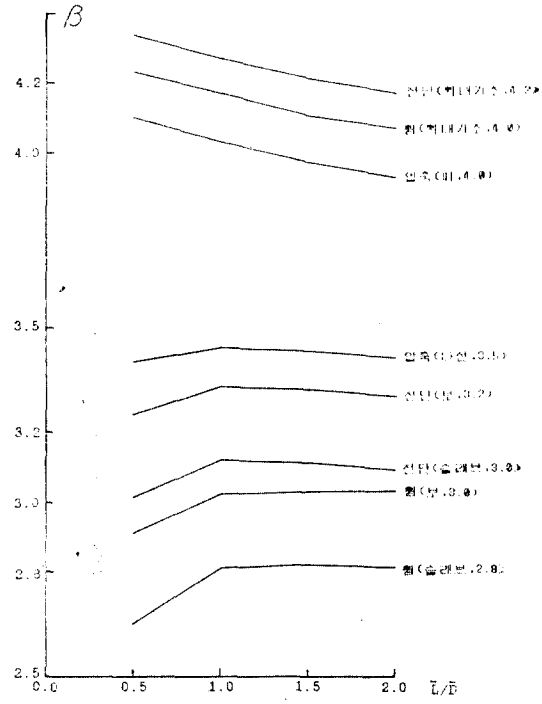

그림 11. RC/AFOSM 조합방법에 의한 신뢰성지수—예제 4

표 5. 하중 및 저항계수—예제 4.

방법		AFOSM			RC/AFOSM		
		ϕ'	γ_D'	γ_L'	ϕ'	γ_D'	γ_L'
휨	보	0.80	1.2	1.9	0.85	1.1	2.3
	슬래브	0.75			0.80		
	확대기초	0.65			0.60		
전단	보	0.70	1.2	1.9	0.75	1.1	2.3
	슬래브	0.65			0.70		
	확대기초	0.55			0.55		
압축	띠	0.60	1.2	1.9	0.60	1.1	2.3
	나선	0.65			0.70		

조합방법에 의한 계수는 다음 절차에 따라 구한 것이다.

(1) 목표 신뢰성지수 β_0에 대응하는 $\bar{R}$를 구한다.

(2) 각 설계조건에 대한 ϕ'의 변동이 가장 작게 되는 γ_D'과 γ_L'을 구한다.

(3) 지정된 $\bar{R}$, γ_D', γ_L'에 대한 ϕ'의 항목별 평균을 구한다.

표 5의 계수를 이용하여 결과적인 신뢰성 수준을 검증한 것이 그림 10, 11이다. 여기서 그림 10은 참고문헌(13)에서 시방서 규준으로 제안된 계수를 이용한 것으로, 계량적으로 표시하기 어려운 문제들을 고려하여 정책적으로 조정된 값으로 생각되며, 그림 11은 R, D, L의 조합에 대해 신뢰성 조건만을 적용한 결과이다. RC/AFOSM 조합방법에 의한 결과는, β의 변동이 작을 뿐 아니라 목표 신뢰성지수 β_0에 근접함을 알 수 있다.

예제 4는 시방서의 개별안전계수 채택에도 RC/AFOSM 조합방법이 유용하다는 것을 제시하기 위한 것으로, 실제 시방서의 규준의 채택에 있어서는 충분한 자료를 가지고 여러가지 가능성을 검토하여야 한다.

4. 결 론

이상의 수치해석 및 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 신뢰성 이론에 의한 하중 및 저항계수 설계에 있어서 한계상태함수의 방향여현을 이용하여 개별안전계수를 구하는 AFOSM 방법을 사용하면 결과적인 신뢰성지수 β는 목표 신뢰성지수 β_0와 다를 수 있으며, 신뢰성 조건을 바탕으로 직접 구한 파괴점을 이용하는 RC 방법을 사용하면 β_0에 부합하는 β를 얻을 수 있다.

(2) RC 방법은 시뮬레이션등의 방법으로 개별안전계수를 결정하기 때문에 계산의 신속성이나 일관적 체계를 유지하기 어려우므로, AFOSM 방법과 RC 방법을 조합한 방법을 사용하는 것이 보다 실용적이며 LRFD 또는 PSFD 규준의 개별안전계수 채택에 더욱 정확성을 기할 수 있다.

(3) 제안된 조합방법에 의하면 목표 신뢰성지수에 부합하며 각 하중비에 대하여 거의 일정한 개별안전계수를 결정할 수 있고, 이로부터 결과되는 신뢰성지수도 목표 신뢰성지수에 근접한다.

(4) 본 연구에서 제안된 방법으로 보다 포괄적인 LRFD 설계형식에 해당하는 개별안전계수들이 구조 재료별, 구조요소별 등에 대하여 연구가 보완되어야 할 것이다.

감사의 말

본 연구는 한국과학재단 연구비로 수행하였다. 연구비 지급으로 본 연구를 가능하게 해준 재단 당국에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Ang, A. H-S., and Tang, W.H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. 2—Decision, Risk, and Reliability, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., 1983, pp. 412~434.
2. Ayyub, B.M., and Haldar, A., "Practical Structural Reliability Techniques," *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 8, Aug., 1984, pp. 1707~1724.
3. Ayyub, B.M., and White, G.J., "Reliability-Conditioned Partial Safety Factors," *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 2, Feb., 1987, pp. 279~294.
4. Cornell, C.A., "A Probability-Based Structural Code," *J. of the ACI*, Vol. 66, No. 12, 1969, pp. 974~985.
5. Ellingwood, B.R., MaGregor, J.G., Galambos, T.V., and Cornell, C.A., "Probability Based Load Criteria: Load Factors and Load Combinations," *J. of Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST5, May., 1982, pp. 978~997.
6. Freudenthal, A.M., "The Safety of Structures," *Trans., ASCE*, Vol. 112, 1947, pp. 125~180.
7. Hasofer, A.M., and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format," *J. of the Engineering Mechanics Div., ASCE*, Vol. 100, No. 1, Feb., 1974, pp. 111~121.
8. Mansour, A.E., Jan, H.Y., et al., "Implementation of Reliability Methods to Marine Structures", *Trans., Society of Naval Architects and*

Marine Engineers, Vol. 92, 1984.

9. Rackwitz, R., and Fiessler, B., "Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences," *Computers and Structures*, Vol. 9, 1978, pp. 489~494.
10. Shinozuka, M., "Basic Analysis of Structural Safety," *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 3, Mar., 1983, pp. 721~740.
11. Siu, W.W.C., Parimi, S.R., and Lind, N.C., "Practical Approach to Code Calibration," *J. of the Structural Div., ASCE*, Vol. 101, No. ST 7, Jul., 1975, pp. 1469~1480.
12. Thoft-Christensen, P., and Baker, M., *Structural Reliability Theory and Its Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 1982, pp. 67~80.
13. 조효남, 장동일, 신재철, "확률이론에 기초한 철근콘크리트 강도설계규준", 대한토목학회 논문집 제 6 권 제 4 호, 1986 년 12 월, pp. 53~60.

(接受 : 1987. 6. 10)