

# 제 2 계 2 차모멘트 / 신뢰성조건 조합방법에 의한 부분안전계수

Partial Safety Factors by SOSM / RC Combined Method

이	종	현*
Lee,	Jong	Heon
신	현	목**
Shin,	Hyun	Mook
손	승	요***
Son,	Seung,	Yo

### 요 약

제2계 2차모멘트법인 점직합 포물체 근사법의 역과정의 연산을 구하여 신뢰성설계에 적용할 수 있도록 하였으며, 파괴점을 구하기 위한 신뢰성조건법의 연산과정을 수정하여 한계상태함수가 비선형인 경우에도 문제마다 식을 새로 수립하는 번거로움을 피하도록 하였다.

SOSM / RC 조합방법을 이용하면 결과적인 파괴확률은 목표파괴확률에 부합하며 넓은 범위의 하중비에 대해 거의 일정한 부분안전계수를 얻을 수 있다.

### Abstract

The inverse algorithm of Point-Fitted Paraboloid Approximation is derived and used in reliability-based calculations. The algorithm of Reliability-Conditioned method is modified in the calculation of failure points such that nonlinear performance functions can be treated in like manner as linear cases without new formulations.

SOSM / RC combined method results in probability of failure closed to specified one, and partial safety factors become nearly constant for a wide range of load ratio.

#### 1. 서론

구조물의 설계에는 많은 불확실성이 내재되므

로 절대적으로 안전한 구조물은 있을 수 없으며, 어느정도의 위험은 피할 수 없다. 이러한 불확실성을 고려하여 설계에서는 안전계수 또는 하중계수들을 사용하여 왔다. 그러나 구조물의 안전

\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 강사  
 \*\* 성균관대학교 토목공학과 교수  
 \*\*\* 정회원, 아주대학교 기계공학과 교수

□ 이 논문에 대한 토론을 1988년 12월 31일까지 본학회에 보내주시면, 그 결과를 1989년 6월호에 게재하겠습니다.

과 기능발휘여부에 대해 일관성있는 수준을 얻으려면 확률이론으로 불확실성을 정량적으로 취급함으로써 가능하다. 종래 널리 사용하던 허용응력설계(WSD)법은 점차 하중및 저항계수설계(LRFD)법으로 대체되어 가고 있는 추세이며 이들 하중및 저항계수의 부분 안전계수를 신뢰성이론에 근거하여 구하려는 시도가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 구조물의 파괴란 지정된 한계상태를 기준으로 하여  $R < S$ 로 정의할 수 있다. 여기서 R과 S는 구조물의 저항과 하중을 나타내는 계수로서 위험도는 다음의 파괴확률로 나타낼 수 있다.

$$P_f = P(R < S)$$

구조물에 따라 안전성 또는 기능성 수준을 위의 파괴확률로 지정하면 신뢰성 이론에 의하여 그에 적합한 부분안전계수를 구할 수 있다.

그러나 설계규준은 가능한한 간단하고, 설계자에게 익숙한 형태로 표시되는 것이 바람직하다. 최근 여러나라에서 채택하고 있는 LRFD방식, 즉

$$\phi R \geq \sum \gamma_i L_i$$

에 대해, 지정된 파괴확률  $P_f$ 에 적합한 부분안전계수를 확률이론에 의하여 구하고, 보다 일정한 신뢰성수준을 얻을 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

1986년 미국 AISC 시방서 등에서 부분적으로 채택하고 있는 신뢰성 설계방법은 제1계 2차모멘트법에 근거한 것으로서 이는 신뢰성이론을 설계에 적용하는 초기의 시도라 할 수 있다. 제1계2차모멘트 방법은 기존의 안전계수들 보다는 나은 신뢰성수준을 얻을 수 있지만 목표하는 파괴확률과 일치하는 신뢰성 수준은 기대하기 어렵다. 한계상태함수가 비선형이거나 확률변수가 정규분포에서 멀어질수록 파괴확률에 적합하지 않으며 구조물의 형태가 다양해지고 그 중요도가 높아짐에 따라 보다 정확하고 적용이 편리한 신뢰성 설계방법이 필요하다.

본 연구에서는 제2계2차모멘트법에 근거하여 하중및 저항계수를 구하며, 또한 그 필요성은 인식하면서도 제2계방법이 복잡하고 시간이 많이

소요되어 실용성을 인정받지 못한 점을 감안하여 제1계방법에 비해 그리 복잡하지 않은 연산과정을 개발하여 실용성과 정밀성 면에서 개선된 방법을 제시한다.

그 방법으로는 우선 제2계2차모멘트법에서 가장 시간이 많이 소요되는 2계도함수항의 계산을 대치할 수 있는 수치해석법이 최근에 제안되어 훨씬 정밀하면서도 계산량이 크게 늘지않게 되었으므로, 그 역과정의 연산을 연구하여 설계에 적용할 수 있도록 하며, 신뢰성 조건에 의하여 직접 파괴점을 계산함으로써, 일정한 신뢰성수준을 얻을 수 있고, 보다 현실적인 부분안전계수를 구할 수 있게 하고자 한다.

## 2. 기존의 연구

1969년 Cornell이 평균 2차모멘트법을 제안하고 나서부터 신뢰성 설계방법이 실용화 되었으나, Cornell의 평균 2차모멘트법은, 한계상태함수가 비선형일 때 오차가 상당히 커질 수 있으며, 같은 문제에 대해 한계상태함수의 형태를 바꿀 때 다른 결과가 나올 수 있고, 기본 확률변수가 정규분포 또는 대수정규분포가 아닐 때는 사용할 수 없었다. 그러나 신뢰성이론을 설계에 적용한다는 자체만으로도 훨씬 진보된 안전의 개념을 갖을 수 있어서, Ang(1) 등의 많은 사람들이 관심을 갖고 연구해 왔다. Hasofer와 Lind(9)가 불변성의 문제를 해결해 주는 AFOSM방법을 제안하였고 Rackwitz와 Fiessler(12)는 비정규분포를 정규분포화 하는 방법을 발표하였으며, Shinozuka(13)는 상관확률변수를 독립적인 변수로 변환할 수 있는 실용적인 알고리즘을 제안하였다.

미 연방표준국 NBS의 주관으로 신뢰성이론에 의한 하중및 저항계수의 표준화를 위한 연구가 Ellingwood등(6)에 의하여 수행되었으며, MacGregor(11)는 ACI 시방서의 표준화를 위한 연구를 수행하여 여러가지 하중조합의 경우에 대한 하중및 저항계수들을 제안한 바 있다. 1986년에 개정된 AISC manual에서는 신뢰성이론에 의한 계수

들을 부분적으로 채택하고 있다. 우리나라에서는 조효남등(15)이 철근 콘크리트 구조에 관한 신뢰성 설계기준을 연구한 바 있다.

위의 연구들은 모두 제1계2차모멘트법에 근거를 두고있다. 목표과외확률에 부합하는 부분안전계수들을 얻는 방법으로는 Ayyub등(2)이 제안한 신뢰성조건(RC) 방법이 있으며 저자들이 발표한 문헌 (14)에서는 신뢰성조건방법과 제1계2차모멘트법을 조합한 방법을 제시한 바 있다. 제1계2차모멘트법에서 상태함수의 선형화에 따른 오차를 줄이려는 노력이 Ditlevsen(5), Grigoriu(8) 들에 의해 이루어져 왔으며, Fiessler등 (7)은 한계상태함수를 2차로 근사화하는 방법을 제안하였다.

2.1 제2계 신뢰성 근사화

최근에 Kiureghian등(10)은 Breitung(3)이 제시한 다중적분의 근사식에서 2계도함수의 계산을 대치할 수 있는 수치해석법을 제안하여, 제1계 근사방법이 갖는 비선형 오차를 거의 줄일 수 있게 하였으며, Fiessler등의 제2계 근사방법과 비교하여 수치해석상 제1계 근사방법과의 격차를 줄일 수 있게 하였다.

문헌 (10)의 제2계 근사방법은 Breitung이 제안한 다중적분의 근사식

$$P_{R2} = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \beta \kappa_i)^{-1/2} \tag{1}$$

에서 한계상태함수의 설계점에서의 주곡률  $\kappa_i$ 를 구할 때 설계점이  $y'_n$ 축에 놓이도록 회전된 표준공간  $\{Y'\}$ 을 이용하는 방법으로 일명 점적합포물체 근사법이라 한다.

회전된 표준공간은 비상관 표준공간  $\{Y\}$ 로부터 다음의 직교변환에 의해 가능하다.

$$\{Y'\} = [R] \{Y\} \tag{2}$$

여기서 회전매트릭스  $[R]$ 의  $n$ 번째 행은  $\{y^*\} / (\{y^*\}^T \{y^*\})^{1/2}$  로 하며 Gram-Schmidt 알고리즘(4)을 이용하여  $[R]$ 을 구할 수 있다. 근사포물체는 한계상태면상에 있는 설계점 근방의 적

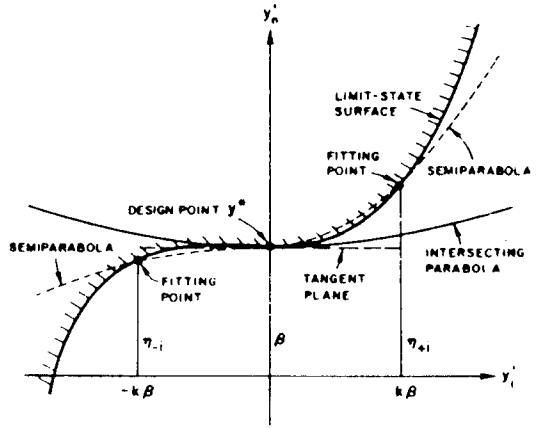


그림 1. 회전된 표준공간에서의 포물체의 적합

합점들의 향으로 정의된다. 이들  $2(n-1)$  점들은 회전된 공간의 좌표축을 따라 그림 1에 표시한 바와 같이 선택한다. 각각의 축  $y'_i, i, \dots, n-1$ 을 따라 좌표가  $(-k\beta, \eta_{-1})$ 와  $(k\beta, \eta_{+1})$ 인 두 점을 택한다.  $k$ 는 미리 지정한 계수로써  $\beta \leq 3$  일 때는  $k=1$ ,  $\beta > 3$  이면  $k=3/\beta$ 로 한다. 종 좌표  $\eta_{\pm 1}$ 는  $\{y'\} = \{0, \dots, \pm k\beta, 0, \dots, y'_n\}^T$  일 때  $G([\{R\}^{-1} \{y'\}] = 0$ 에서  $y'_n$ 의 해로써 구해진다.

근사포물체의 주방향은 한계상태면의 주방향과 무관하게, 회전된 공간의 좌표축과 일치하도록 택하면 제2 계도함수 매트릭스의 계산을 피할 수 있다. 이때 근사포물체는 다음 식으로 정의 된다.

$$y'_n = \beta + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \kappa_i y_i'^2 \tag{3}$$

그림에 보인  $y_i'$ 과  $y'_n$ 의 2차원 공간에서, 설계점에서 한계상태면에 접하며 좌표가  $(\pm k\beta, \eta_{\pm 1})$ 인 두개의 적합점을 지나는 두개의 반포물선을 정의한다. 근사포물체는 식(3)에서  $i$ 번째 항만을 갖도록 정의된 포물선이다.

앞의  $(\pm k\beta, \eta_{\pm 1})$ 를 식(3)에 대입하고  $\kappa_i$ 에 대해 풀면

$$\kappa_{\pm 1} = 2(\eta_{\pm 1} - \beta) / (k\beta)^2 \tag{4}$$

은 두개의 반포물선의 곡률이 되며 교차포물선

은 두개의 반포물선의 가중평균 이라고 정의할 수 있다. 즉

$$\frac{1}{\sqrt{1+\beta\kappa_i}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1+\beta\kappa_{-i}}} + \frac{1}{\sqrt{1+\beta\kappa_{+i}}} \right) \quad (5)$$

이를 식(1)에 대입하여 제2계 근사값을 얻는다.

### 2.2 신뢰성조건법에 의한 부분안전계수

RC 방법은 기발표문헌 (14)에서 요약한 바 있으므로 여기서는 구체적 언급을 생략하고 부분안전계수를 구하는 절차만을 간단히 기술한다.

(1) 목표신뢰성지수  $\beta_0$ 에 대응하는 저항의 평균값  $\bar{R}$ 를 구한다.

(2) 다음 식을 연립하여 풀어 파괴점을 구한다.

$$Z = R^* - \sum_{i=1}^n L_i^* = 0 \quad (6)$$

$$[F_{L_i}(L_i^*)]^{w_i} - [F_{L_j}(L_j^*)]^{w_j} = 0; i, j = 1, \dots, n, \quad (7)$$

$$i \neq j$$

$$f_R(R^*) = f_L(L^*) \quad (8)$$

(3) 다음 식으로 하중및 저항계수를 구한다.

$$\phi = \frac{R^*}{\bar{R}} \quad (9)$$

$$\gamma_i = \frac{L_i^*}{\bar{L}_i} \quad (10)$$

단, \*는 파괴점에서의 값을 나타낸다.

### 3. 제2계 2차모멘트 / 신뢰성조건조합 알고리즘

신뢰성조건방법으로 부분안전계수를 구하면, 결과적인 파괴확률이 목표파괴확률에 부합되며 설계변수의 신뢰성조건으로부터 직접 파괴점을 구하므로 일반적인 2차모멘트방법으로 구한 계수들보다 현실적인 값들을 얻을 수 있다. 그런데 목표파괴확률에 대응하는 저항의 평균값  $\bar{R}$ 를 구할 때 사용하는 시뮬레이션방법은 결과의 일관성이나 반복계산으로 인한 시간상의 문제로 인하여 기발표문헌 (14)에서는 이 부분을 AFOSM 방법으로 대체할 것을 제안하였고 또한 파괴점을 구하는 연산과정을 수정하여 수렴성을 보완하였다. RC / AFOSM 조합방법에서는 결과의

일관성및 계산의 신속성을 위해 AFOSM 방법이 내포하고 있는 비선형오차를 감수하더라도, 기존의 AFOSM 방법에 의한 부분안전 계수들 보다는 신뢰성수준이 더욱 일정한 계수들을 얻을 수 있었다.

그런데 점적합 포물체 근사방법은 적용하기에 간단하며 변수가 많은 경우에 계산이 적고, 한계상태면의 noise에 예민하지 않으며, 좌표계를 따라 한계상태면의 고차항의 영향을 근사적으로 고려한다. 또한 점적합포물체에 내포된 오차는 안정하며, 변수의 수가 많거나 곡률이 분산되어 있어도 그 오차는 매우 작은 것으로 밝혀졌다.

따라서 목표확률에 대응하는  $\bar{R}$ 를 구하는 과정을 점적합 포물체 근사방법으로 대체한다면 AFOSM 방법이 갖는 비선형오차 문제를 개선할 수 있으며 시뮬레이션방법으로 구한  $\bar{R}$  값과의 차이를 거의 없앨 수 있다.

본 연구에서는 점적합 포물체로 근사화하는 역과정의 연산을 구하여 신뢰성 설계에 적용할 수 있도록 하였으며, 파괴점을 구하는데 있어서는 기존의 RC방법의 연산을 수정하여 한계상태 함수가 비선형일 때도 문제마다 Newton 방법을 위한 식을 새로 수립하는 번거로움을 피하였다.

SOSM / RC 조합방법의 연산과정을 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

(1)설계점  $X^*$ 를 가정한다. 초기 가정값은 각 변수의 평균값으로 취한다.

(2)기본확률변수  $\{X\}$ 가 상관관계에 있다면 상관관계수 매트릭스의 Choleskey 방법으로 변환매트릭스  $[L]$ 을 구한다.

(3)목표파괴확률  $P_{f0}$ 를  $P_n$ 으로, 그에 해당하는  $\beta_0$ 를 초기의  $\beta_1$ 로 가정한다.

(4)기본확률변수들이 비정규분포인 경우 등가정규분포의 평균  $\mu_{x_i}^*$ 과 표준편차  $\sigma_{x_i}^*$ 을 구한다.

(5) $x_i^* = (x_i^* - \mu_{x_i}^*) / \sigma_{x_i}^*$ 으로부터 환산변수  $\{x\}$ 을 계산한다.

(6)  $\{Y\} = [L]^{-1} \{X\}$ 을 이용하여 비상관 환산공간으로 변환한다.

(7) Y 공간에서 방향여현  $\{\alpha_Y^*\}$ 를 계산한다.

(8)  $\{X^*\} = [\sigma_X^N] [L] \{\alpha_Y^*\} \beta_1 + \{\mu_X^N\}$ 로 부터 새로운 설계점을 계산한다.

(9) 전단계의 설계점과 일치할 때까지 (4)에서 (8)의 과정을 반복한다.

(10) 회전된 표준공간으로의 변환을 위해 Gram-Schmidt 알고리즘을 이용하여 회전 매트릭스 [R]을 구한다.

(11)  $\{y_i\} = \{0, \dots, \pm k\beta, 0, \dots, \eta_{z_i}\}^T$ 를  $G([R]^{-1}\{y\}) = 0$ 에 대입하여  $\eta_{z_i}$ 를 구한다. 여기서  $k$ 는 미리 지정한 계수이다.

(12) 식 (4)로부터 주곡률을 계산하고 식 (5)로부터 Breitung의 추가항을 계산한다.

(13) 식(1)로부터 제2 계근사 파괴확률  $P_{f2}$ 를 계산한다.

(14)  $P_{f1} = P_{f0} / (P_{f2} / P_{f1})$ 과  $\beta_1 = -\Phi^{-1}(P_{f1})$ 으로부터 새로운  $P_{f1}$ 과  $\beta_1$ 을 계산한다.

(15)  $P_{f1}$  또는  $\beta_1$ 이 수렴할 때까지 (4)에서 (14)의 과정을 반복한다.

(16) 저항의 평균값  $\bar{R}$ 를 구한다.

점적합 근사법에서는 회전 매트릭스 [R]의 초기값이 결과의 오차를 좌우하며  $(1 + \beta_1 \kappa_1)$ 의 변동계수가 최대로 될 때 오차가 최소가 된다는 사실을 밝혀내고 [R]을 개선시키는 방법을 제시했지만, 초기의 [R]을 가장 나쁘게 택하였을 경우에도 기타의 2개방법에 비해 오차가 심각하지 않으며, [R]을 개선하여 새로운 곡률을 계산함으로써 추가되는 계산시간에 비해 얻어지는 정밀도의 증감은 미소하므로 실용상 처음 가정한 [R] 값으로  $P_{f2}$ 를 구하기로 한다.

(17) 앞에서의 설계점을 파괴점의 초기값으로 가정한다.

(18) 저항의 새로운 파괴점  $R^*$ 를 가정한다.

(19) 식(8)을 만족하는 새로운  $L_i^*$ 를 계산한다. 이를 위한 연산과정은 다음과 같다.

1)  $\Delta L_i$ 를 가정한다. 식(8)의 조건을 만족하는  $L_i^*$ 는 (17)단계 이전의 설계점 근방이므로  $\Delta L_i$ 은 0부근에 있다.

2) 다음 식을 이용하여 나머지 하중변수의 증분  $\Delta L_i$ 를 계산한다.

$$\Delta L_i = \frac{[F_{L_i}(L_i^*)]^{w_{L_i}} - [F_{L_i}(L_i^*)]^{w_{L_i} +}}{w_{L_i}[F_{L_i}(L_i^*)]^{w_{L_i}-1} f_{L_i}(L_i^*)} + \frac{w_{L_i}[F_{L_i}(L_i^*)]^{w_{L_i}-1} f_{L_i}(L_i^*) \Delta L_i}{w_{L_i}[F_{L_i}(L_i^*)]^{w_{L_i}-1} f_{L_i}(L_i^*)} \quad (11)$$

3)  $(L_i^*)^k = (L_i^*)^{k-1} + \Delta L_i$ 로부터 다음 k번째 단계의  $L_i^*$ 를 계산한다.

(20) 이들 저항 및 하중의 파괴점이 식(6)을 만족하지 않으면 새로운  $\Delta L_i$ 을 가정하여 (12)의 단계를 반복한다.

(21) 식(6)과 (7)을 만족하는 파괴점이 식(8)을 만족하지 않으면 새로운  $R^*$ 를 가정하여 (18)에서 (20)의 연산을 반복한다.

(22) 식(9)와 (10)으로부터 부분안전계수를 구한다.  $R^*$ 의 수렴을 위해서는 최초 두개의  $R^*$ 를 가정하여 (19), (20) 단계를 두번 수행한 후, 두개의  $R^*$ 값의 차이에 따른  $g(\{x\})$  값의 변화를 검토하면  $g(\{x\}) = 0$ 을 만족하는  $R^*$  값을 쉽게 구할 수 있다.

#### 4. 수치예 및 고찰

SOSM / RC 조합방법의 예민도분석 및 AFOSM 방법과의 비교를 위해 LFRD 형식에서 다음과 같은 사하중과 활하중의 조합을 예로 든다.

$$\phi \bar{R} \geq \gamma_D \bar{D} + \gamma_L \bar{L} \quad (12)$$

이는 한계상태함수를 평균값에 대한 식으로 표시한 것으로, 공칭평균비를 이용하면 공칭값에 대한 부분안전계수들을 얻을 수 있다.

예제 1. 확률변수의 분포에 대한 예민도 분석을 위해 변동계수를 각각  $\Omega_R = 0.11$ ,  $\Omega_D = 0.10$ ,  $\Omega_L = 0.25$ 인 경우에 대해 case 1: R, D, L을 모두 정규분포로 본 경우, case 2: 모두 대수정규분포로 본 경우, case 3: R을 정규분포, D는 대수정규분포, L는 EXTREME 2 분포로 본 경우의 부분 안전계수를 구하였다. 여기서 가중계수  $w_i$ 는 1로 가정하였으며, 목표파괴확률을  $P_{f0} = 0.00620968$  ( $\beta_0 = 2.5$ 로 할 때 하중비  $\bar{L} / \bar{D} = 0.5 \sim 4.0$ 에 대해 부분안전계수를 구하였다. 그들 중 저항에 대한 안전계수  $\phi$ 를 나타낸 것이 그림 2이다.

각각의  $\bar{L} / \bar{D}$ 에 대한  $\phi$ ,  $\gamma_D$ ,  $\gamma_L$ 의 범위가 AFOSM 방법에서는 각각 0.06~0.11, 0.01~0.03, 0.14~0.21의 분포를 보이고 있으나, SOSM / RC 조합방법에서는 각각 0.03~0.07, 0.01~0.02, 0.01~0.11

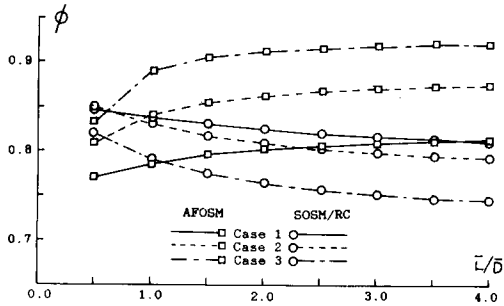


그림 2. 저항계수의 비교-예제 1

로써 세가지 경우의 분포를 가질 가능성에 대해 SOSM/RC 조합방법이 덜 예민하다는 것을 알 수 있으며,  $\bar{L}/\bar{D}=0.5\sim 4.0$  전체 범위에 대한 각 부분안전계수의 최대차이는 AFOSM 방법의 경우, 각각 0.15, 0.09, 0.33인 반면 SOSM/RC 조합방법에서는 각각 0.10, 0.03, 0.11로써 하중비에 대해서도 덜 예민함을 알 수 있다.

예제2. 변동계수의 변화에 대한 부분안전계수의 비교를 위해 예제1의 case 3의 분포에 대해  $\Omega_L$ 을 각각 0.2, 0.25, 0.3으로 본 경우를 계산하였다. 이의 결과중  $\phi$ 를 표시한 것이 그림3이다.

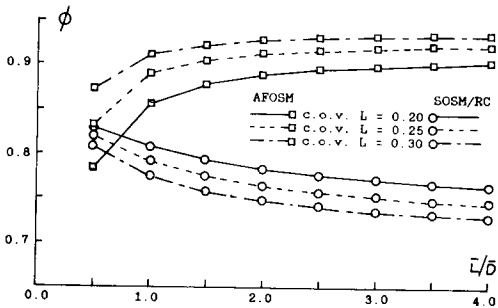


그림 3. 저항계수의 비교-예제 2

이 경우 각각의  $\bar{L}/\bar{D}$ 에 대한  $\phi$ ,  $\gamma_D$ ,  $\gamma_L$ 의 범위는 AFOSM 방법에서는 각각 0.03~0.09, 0.004~0.04, 0.26~0.39, SOSM/RC 조합방법에서는 각각 0.02~0.03, 0.003~0.01, 0.15~0.25이며, 전체 하중비의 범위에 대한 최대차이는 AFOSM 방법의 경우 각각 0.15, 0.08, 0.47이며, SOSM/RC 조합방법의 경우 각각 0.10, 0.03, 0.29 이다. 이 경우도 AFOSM 방법보다는 SOSM/RC 조합방법이 덜 예민함을 알 수 있으며, 그 차이는 비록 근소하더라도 AFOSM 방법으로 구한 계수를 사용할 경우 확률분포가 정규분포에서 멀어질수록 결과적인 파괴확률은 목표파괴확률과

차이가 커질 수 있음을 고려할 때 SOSM/RC 조합방법으로 부분안전계수를 구하는 것이 바람직하다고 본다.

예제 3. 예제1의 case 3에 대해 목표파괴확률이 각각  $P_{fo}=0.02275015(\beta_o=2.0)$ ,  $P_{fo}=0.00620968(\beta_o=2.5)$ ,  $P_{fo}=0.00134991(\beta_o=3.0)$ 인 경우의 부분안전계수를 구하였다. 그들중  $\phi$ 를 표시한 것이 그림4이다.

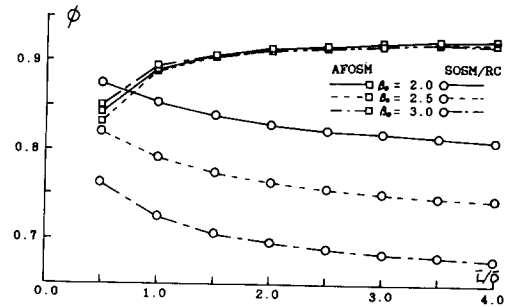


그림 4. 저항계수의 비교-예제 3

그림에서 보듯이 AFOSM 방법은 목표파괴확률이 달라져도 부분안전계수의 값들이 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 계수들이 약간만 달라져도 결과적인 파괴확률은 심하게 차이를 보일 수 있다는 것을 의미하는 것으로, 실용상 여러가지 구조요소에 대해 하나의 부분안전계수를 택하게 되면 결과적인 파괴확률은 상당히 예민한 반응을 나타낸다고 볼 수 있다.

예제4. 예제1과 예제2는 부분안전계수들의 분포만을 비교한 것이다. 확률변수들이 비정규분포일 경우 SOSM/RC 방법의 유효성을 보이기 위해 예제1의 case3에 대해 결과적인 파괴확률을 비교한 것이 표1이다.

표 1. 결과적인 파괴확률의 비교

$\bar{L}/\bar{D}$	AFOSM	SOSM/RC
0.5	0.01324	0.00602
1.0	0.02132	0.00566
1.5	0.02276	0.00570
2.0	0.02288	0.00568
2.5	0.02312	0.00578
3.0	0.02322	0.00576
3.5	0.02332	0.00578
4.0	0.02344	0.00574

표1의 결과는 각 방법의 일관성있는 비교를

위해 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용한 것이며 이때 표본의 수는 50,000개로 하였다. 표에서 보듯이 SOSM/RC 조합방법의 결과적인 파괴확률이 AFOSM방법의 결과보다 훨씬 더 목표파괴확률에 근접한다.

5. 결론

(1)제2계 2차모멘트법인 점적합 포물체 근사방법의 역과정 연산을 신뢰성설계에 적용하였다.

(2)신뢰성조건방법의 연산과정을 수정하여 한계상태함수가 비선형인 경우에 식을 새로 수립해야 하는 번거로움을 피하도록 하였다.

(3)앞의 수치예를 통해 볼 때 SOSM/RC 조합방법을 이용하면 결과적인 파괴확률은 목표파괴확률에 부합하며 넓은 하중비에 대해 거의 일정한 부분안전계수들을 얻을 수 있다.

6. 참고문헌

1. Ang, Alfredo H.S., "Structural Risk Analysis and Reliability Based Design," J. of Struct. Div., ASCE, Vol.99, No.ST9, Sep., 1973, pp. 1891-1910.
2. Ayyub, B. M., and White, G. J., "Reliability-conditioned Partial Safety Factors," J. of Struct. Eng., ASCE, Vol. 113. No.2, Feb., 1987, pp. 279-294.
3. Breitung, Karl, "Asmptotic Approximation for Multinormal Integrals," J. of Eng. Mech., ASCE, Vol. 110, No.3, Mar., 1984, pp.357-366.
4. Cullen, C.G., "Matrices and Linear Transformations," Addison-Wesley Pub. Co., London, 1972.
5. Ditlevsen, Ove, "Generalized Second Moment Reliability Index," J. of Struct. Mech, 7(4),

- 1979, pp.435-451.
6. Ellingwood, Bruce, "Reliability of Current Reinforced Concrete Designs," J. of Struct. Div., ASCE, Vol. 105, No. ST4, Apr., 1979, pp.699-712.
7. Fiessler, B., Neumann, H-J., and Rackwitz, R, "Quadratic Limit State in Structural Reliability," J. of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 105, No. EM4, Aug., 1979, pp.661-676.
8. Grigoriu, M., "Methods for Approximate Reliability Analysis," Structural Safety, 1(1982/1983), pp.155-165.
9. Hasofer, A.M. and Lind, N.C., "Exact and Invariant Second-Moment Code Format," J. of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.100, No. 1, Feb., 1974, pp.111~121.
10. Kiureghian, Armen Der, Lin, Hong-Zong, and Hwang, Shyh-Jiann, "Second-Order Reliability Approximations," J. of Eng. Mech., ASCE, Vol.113, No.8, Aug., 1987, pp.1208~1225.
11. MacGregor, James, "Load and Resistance Factors for Concrete Design," ACI Journal, Jul. - Aug., 1983, pp.279-287.
12. Rackwitz, R., and Fiessler, B., "Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences," Computers and Structures, Vol. 9, 1978, pp.489~494.
13. Shinozuka, M., "Basic Analysis of Structural Safety," J. of Struct. Eng., ASCE, Vol. 109, No. 3, Mar., 1983, pp.721-740.
14. 손승요, 이종현, "신뢰성이론에 의한 하중및 저항계수 설계," 대한토목학회 논문집 제7권 제4호, 1987년 12월, pp.1-12.
15. 조효남, 장동일, 신재철, "확률이론에 기초한 철근콘크리트 강도설계기준," 대한토목학회 논문집 제6권 제4호, 1996년 12월, pp.53-60.  
(1988년 6월 1일 접수)