

## 구조계의 신뢰도해석을 위한 개선된 기법

Improved Methods for Reliability Evaluations of Structural Systems

○ 류 정 수 \*                      윤 정 방 \*\*  
Ryu, Jeong Soo                      Yun, Chung Bang

### ABSTRACT

The primary objective of this study is the development of second moment methods for the efficient reliability evaluations of structural systems. Two methods are presented. One is the improved first order reliability method (IFORM), and the other is the modified probabilistic network evaluation technique (MPNET). For the purpose of verifying the proposed methods, example analyses are carried out on several cases with two failure modes, a plane frame structure involving three failure modes and simplified parallel member models for fatigue reliability evaluations of offshore structures. Numerical results indicate that the effectiveness of the proposed methods over the conventional ones (i.e., the FORM and the PNET) increases very significantly as the number of failure modes of the system increases.

### 1. 서 론

구조계의 신뢰도 해석을 위한 기법들에는 수치적분, 근사해법, 시뮬레이션기법들이 있다. 수치적분은 파괴확률계산시 가장 정확한 방법이지만 랜덤벡터의 결합밀도함수를 다중적분해야하는 어려움이 있다. 근사해법인 FORM<sup>1-3</sup>과 SORM<sup>4-5</sup>은 제 2차 모멘트방법으로써 한계상태함수가 극심한 비선형이 아니라면 매우 근사적인 값을 얻을 수 있다. 이들 근사해법은 비선형성이 크고 랜덤변수의 수가 매우 많은 경우에는 정확성이 좀 떨어진다. 그러나 신뢰도 계산시 제 2차 모멘트방법은 계산상 간단하기 때문에 널리 사용되어 왔다. 요즘 관심이 높아지고 있는 시뮬레이션 기법(MCS, IST, DST)들은 대용량 고속계산과 더불어 신뢰성 해석에 응용되기 시작했다.

본 연구에서는 계산상 간단한 제 2차 모멘트방법을 사용하였다. 흔히 랜덤변수들의 비선형함수로 정의되는 파괴모우드의 수가 매우 많다면 FORM은 체계신뢰도 산정시 정확한 값을 산정할 수 없다. 이런 경우에 SORM은 좀 더 정확한 값을 산정할 수 있지만 2차곡면으로 구성된 모우드들 사이의 결합파괴확률을

계산해야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 개선된 FORM (IFORM)을 제안한다. IFORM에서는 각 모우드들의 파괴면은 FORM과 SORM으로 구한 안전지수 값들을 평균하고, 상관관계는 FORM의 상관관계를 그대로 사용하여 FORM의 선형식에 평행한 선형식으로 근사화한다. 그러므로 체계신뢰도 계산은 FORM의 간단함에 기반을 둔다. 따라서 매우 많은 모우드를 가진 체계에 대해 파괴모우드들 사이의 결합파괴확률 계산의 복잡성을 상당히 줄일 수 있다.

또한 높은 상관관계의 파괴모우드가 많은 체계에 대한 점추정 계산시 수정된 PNET (MPNET)를 제안하였다. 이 MPNET에서는 PNET<sup>6</sup>에서와 같이 모우드들 사이 상관관계수에 따라 감소된 수의 집단으로 파괴모우드를 분류한 후, 집단내 가장 큰 파괴확률을 가지는 하나의 모우드로 그 집단을 대표한다. 그러나 MPNET에서는 대표모우드들 사이 상관영향을 고려하여 체계신뢰도를 산정하지만, PNET에서는 이런 영향을 고려하지 않는다.

본 연구의 예제해석은 제안된 방법들의 타당성을 간단한 예제의 경우에 대해 검증한 후, 해양구조물의 이상화된 병렬부재에 대해 피로신뢰도 해석을 수행하였다. IFORM과 MPNET의 효율성은 수행하여 얻은 수치결과들의 타당성을 같은 모델을 사용한 다른 연구결과들과 비교함으로써 입증하였다.

\* 정회원, 한국원자력연구소 연구로기술부

설계종합기술실 선임연구원

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

## 2. 신뢰도 해석

### 2.1 각 모우드의 신뢰도 해석

제 2차 모멘트방법을 사용할 때 비정규 확률변수와 관련된 신뢰도산정을 위해서 비정규확률변수에 대한 동가정규분포<sup>1)</sup>를 흔히 사용한다. 그러나, 해양구조물의 피로수명의 분산계수가 3과 같이 큰 경우<sup>11,13)</sup>, 동가정규분포를 사용하는데 수치적 어려움을 경험하였다. 따라서 본 연구에서는 독립표준정규변수를 얻기 위하여 Rosenblatt 변환<sup>7)</sup>을 사용하였다. 변수들의 순서에 따라 여러개의 다른 Rosenblatt 변환이 존재한다. 그러나 대수정규(Lognormal) 확률변수의 경우, 각각의 변환된 파괴면들이 같은 파괴확률값<sup>13)</sup>을 줌으로, 대수정규확률변수( $T_i$ )의 경우 Rosenblatt 변환은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_j = \frac{\ln T_j - \lambda_j + \sum_{i=1}^{j-1} (\Lambda_{ji}/\Lambda_{jj})(\ln T_i - \lambda_i)}{\sqrt{\Lambda/\Lambda_{jj}}} \quad (1)$$

여기서  $U_j$ 는 독립표준정규변수,  $\lambda_j = E[\ln T_j]$ ,  $\Lambda$ 와  $\Lambda_{ji}$ 는  $\ln T$ 의 공분산 매트릭스의 행렬식과 여인자이다.

FORM에서 U-공간내 각 비선형파괴곡면  $g_i(u)$ 는 원점에서 가장 가까운 파괴곡면 위의 파괴점( $u_i^*$ )에서 접선  $g_i^{FO}(u)$ 로 근사화된다.

$$g_i^{FO}(u) = \alpha^T(u - u_i^*) = \alpha^T u + \beta_i^{FO} = 0 \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 는  $u_i^*$ 에서  $g_i(u)$ 의 기울기벡터,  $\beta_i^{FO}$ 는 FORM의 안전지수(= $\|u_i^*\|$ )이다. 모우드  $i$ 에 대한 파괴확률은 다음과 같다.

$$P_i^{FO} = \Phi(-\beta_i^{FO}) \quad (3)$$

파괴곡면이 극심한 비선형이 아니라면 FORM은 파괴곡면을 잘 근사화시킬 수 있다. 그러나 대부분의 파괴곡면은 선형이 아니므로 파괴점에서 2차곡면으로 근사화하여 더 정확한 산정을 할 수 있다. 파괴곡면이 비교적 2차곡선에 가깝다면 SORM에 의한 파괴확률  $P_i^{SO}$ 는 Tvedt<sup>4)</sup>가 제안한 3항 근사식으로 쉽게 구할 수 있다.

$$P_i^{SO} \approx A_1 + A_2 + A_3 \quad (4)$$

여기서 3항인  $A_1$ ,  $A_2$ 와  $A_3$ 는 다음과 같다.

$$A_1 = \Phi(-\beta_i) \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \beta_j \kappa_{ij})^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$A_2 = [\beta_i \Phi(-\beta_i) - \phi(\beta_i)] \left\{ \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \beta_j \kappa_{ij})^{-\frac{1}{2}} - \prod_{j=1}^{n-1} (1 - (\beta_i + 1) \kappa_{ij})^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

$$A_3 = (\beta_i + 1) [\beta_i \Phi(-\beta_i) - \phi(\beta_i)] \left\{ \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \beta_j \kappa_{ij})^{-\frac{1}{2}} - \text{Re} \left[ \prod_{j=1}^{n-1} (1 - (\beta_i + i) \kappa_{ij})^{-\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (7)$$

여기서  $\beta_i$ 는 FORM의 안전지수,  $\kappa_{ij}$ 는 U-공간내의 파괴점에서  $j$ 번째 주곡률,  $\text{Re}[\cdot]$ 는 실수부,  $i$ 는 허수이다. 위 근사식도 파괴곡면이 원점과 반경  $\beta_i$ 를 가진 원에 가깝고  $\beta_i$ 값이 작다면 오차는 커진다. 그러나 파괴곡면이 비교적 2차곡면에 가깝다면 SORM에 의한 파괴확률은 식 (4)를 사용하여 쉽게 구할 수 있으며, 개념적인 SORM의 안전지수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_i^{SO} = -\Phi^{-1}(P_i^{SO}) \quad (8)$$

### 2.2 체계신뢰도 해석

파괴모우드  $k$ 개를 가진 체계의 파괴확률 산정은 구간해법인 제 2계 구간<sup>8)</sup>을 많이 사용하는데, FORM이나 SORM으로 구한 각 모우드와 결합파괴확률값을 이용한다. 일반적으로 SORM이 더 정확한 방법이지만 결합 파괴 사상의 파괴점( $u_{ij}^*$ )를 결정하기 위한 최소화 절차가 포함되기 때문에 파괴모우드의 수가 매우 많은 체계에 대해선 훨씬 더 많은 계산상의 노력이 요구된다.

제 2계 구간은 모우드의 수가 매우 많고 각 모우드들의 파괴확률이 큰 경우에는 너무 광범위하므로 이런 경우에는 구간의 기하평균 혹은 Dunnett & Sobel<sup>9)</sup>이 제안한 점추정방법이 유용하다. 본 연구에서는 후자의 방법을 주로 사용하였으며 FORM과 함께  $k$ 개 모우드를 가진 직렬체계의 파괴확률은 다음과 같다.

$$P_{f(a)}^{FO} = 1 - \Phi_k(\beta^{FO}; \rho^{FO}) \quad (9)$$

여기서  $\beta^{FO}$ 는 파괴모우드의 FORM의 안전지수 벡터이고  $\rho^{FO}$ 는 FORM에서의 상관계수행렬이다. Dunnett & Sobel이 제안한 방법을 적용시키면 파괴확률의 점추정치<sup>10)</sup>는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{f(a)}^{FO} \approx 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{\beta_j^{FO} - \sqrt{\rho_{av}^{FO}} \xi}{\sqrt{1 - \rho_{av}^{FO}}}\right) d\xi \quad (10)$$

여기서  $\rho_{av}^{FO}$ 는 다음식과 같은 평균상관계수이며

$$\rho_{av}^{FO} = \frac{1}{k(k-1)} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \rho_{ij}^{FO} \quad (11)$$

그리고  $\phi(\xi)$ 는 표준정규확률밀도 함수이다.

### 2.3 개선된 FORM (IFORM)

파괴모우드가 많은 대부분의 경우 FORM은 체계파괴확률의 구간해법이나 점추정을 위해 정확한 값을 얻기 어렵다. 이런 경우에 SORM이 사용된다. 그러나 체계신뢰도 산정을 위한 SORM은 2차곡면들 사이의 결

합확률을 여러번 계산해야하기 때문에 FORM 보다 훨씬 더 많은 계산상의 노력이 요구된다. 더우기 SORM은 식 (10)의 근사식을 이용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 FORM보다는 정확하고 SORM보다는 계산상 간단한 개선된 FORM (IFORM)을 제안한다. 이 방법의 체계파괴확률은 근사적으로 다음과 같다.

$$P_{f(2)}^{IFO} = 1 - \Phi_2(\beta^{IFO}; \rho^{FO}) \quad (12)$$

여기서

$$\beta^{IFO} = \frac{1}{2}(\beta^{FO} + \beta^{SO}) \quad (13)$$

IFORM의 이론적 배경이 모우드가 2개인 경우 그림 1에서 설명된다. 그림 1에서와 같이 체계가 원점에 대해 불룩한 파괴모우드들로 구성된다면, 좀 더 정확한 산정을 주는 SORM의 체계파괴확률  $P_{f(2)}^{SO}$ 은 FORM의 체계파괴확률  $P_{f(2)}^{FO}$ 보다 작다. 즉,

$$P_{f(2)} \approx P_{f(2)}^{SO} < P_{f(2)}^{FO} \quad (14)$$

여기서

$$P_{f(2)}^{FO} = P_{f_1}^{FO} + P_{f_2}^{FO} - P_{f_{12}}^{FO} \quad (15)$$

$$P_{f(2)}^{SO} = P_{f_1}^{SO} + P_{f_2}^{SO} - P_{f_{12}}^{SO} \quad (16)$$

그리고  $P_{f_{12}}^{FO}$ 와  $P_{f_{12}}^{SO}$ 는 각각 1차와 2차 곡면들 사이의 결합파괴확률이다.

그림 1에서 보여준 바와 같이 SORM의 안전지수와 같고 FORM의 접선과 평행한 다른 하나의 근사적 파괴면을 고려하자. 그러면 이에 대응하는 체계파괴확률은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{f(2)}^{APP} = 1 - \Phi_2(\beta^{SO}; \rho^{FO}) = P_{f_1}^{SO} + P_{f_2}^{SO} - P_{f_{12}}^{APP} \quad (17)$$

여기서  $P_{f_{12}}^{APP}$ 는 2개의 근사화된 접선면들 사이의 결합파괴확률이다. 그림 1에서 엄밀한 증명은 아니지만 불룩한 파괴곡면을 가진 대부분의 경우에 대해  $P_{f_{12}}^{APP} > P_{f_{12}}^{SO}$  이기 때문에 다음의 관계가 성립됨을 알 수 있다.

$$P_{f(2)}^{APP} < P_{f(2)}^{SO} \quad (18)$$

식 (14)와 (18)을 연결하면,  $P_{f(2)}^{SO}$ 의 구간은 다음과 같다.

$$P_{f(2)}^{APP} < P_{f(2)}^{SO} < P_{f(2)}^{FO} \quad (19)$$

그러므로 식 (12)의  $P_{f(2)}^{IFO}$ 는 식 (19)의  $P_{f(2)}^{SO}$ 와 같은 구간을 가짐을 쉽게 알 수 있다.

$$P_{f(2)}^{APP} < P_{f(2)}^{IFO} < P_{f(2)}^{FO} \quad (20)$$

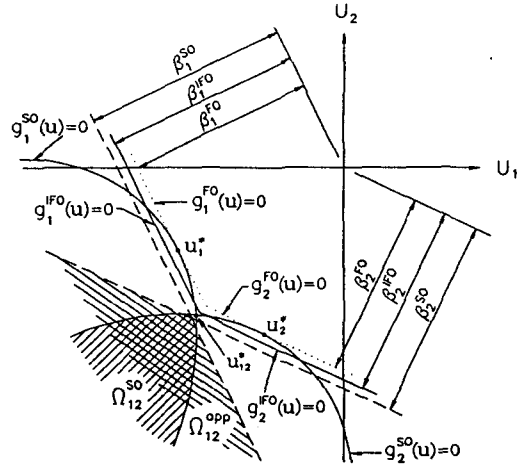


Fig. 1. Approximate Failure Surfaces for Two Modes

또한 오목한 파괴곡면을 가진 체계에 대해 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$P_{f(2)}^{FO} < P_{f(2)}^{IFO} < P_{f(2)}^{APP} \quad (21)$$

식 (20)과 (21)은 IFORM이 FORM보다 더 좋은 산정을 준다는 것을 의미한다. IFORM에서 요구되는 계산상 노력들은 2차 파괴곡면 모우드들 사이의 결합확률 계산을 포함하는 SORM의 계산상 어려움에 비하면 매우 작다. IFORM이 기본적으로 FORM과 비슷하기 때문에 여러 파괴모우드를 가진 체계에 대한 점추정치를 식(10)과 함께 편리하게 사용될 수 있다. IFORM의 효율성의 검증은 3.1절 예제해석에서 보이게 된다.

## 2.4 수정된 PNET (MPNET)

많은 파괴 모우드를 가진 체계의 파괴확률을 계산하기 위한 또하나의 점추정기법이 PNET (Probabilistic Network Evaluation Technique)<sup>6)</sup>이다. PNET는 한계를 정하는 상관계수( $\rho_0$ )보다 큰 양의 상관계수를 가지는 파괴모우드들을 완전의존이라고 가정한다. 그러면 파괴모우드들의 집단이 생기고 각 집단은 집단내의 가장 큰 파괴확률을 가지는 모우드가 그 집단을 대표한다. 그 다음, 대표되는 모우드들은 완전독립이라고 가정한다. 따라서, 체계파괴확률은 대표되는 모우드들만 고려하여 그냥 합하여 계산된다.

PNET는 모우드들의 상관관계가 낮다면 적절한 점추정치를 얻을 수 있다. 그러나 PNET는 파괴모우드의 수가 매우 많고 대부분의 모우드들이 높은 상관관계가 있다면 비효율적이다. 해양구조물의 진전하는 피로파괴에 대한 신뢰도해석의 경우에 대해 체계의 부

재수(n)가 증가함에 따라서 모드 수가 급속히 증가하였고 모드들 사이의 상관계수가 매우 커졌다. 예로써 부재수가 8이면 총파괴모드수는 40320이고 상관계수의 최소값은 0.85이었다. 따라서 일반적인 PNET는 수정되어야 할 것이다.

그러므로 본 연구에서는 수정된 PNET (MPNET)를 제안하였다. 이 MPNET는 PNET에서와 같이 상관계수( $\rho_0$ )에 따라 감소된 수의 대표모드로 분류되지만, 대표되는 모드들 사이의 상관관계를 고려하여 앞절에서 제안한 기법과 함께 신뢰도 값을 산정하였다.

### 3. 예제해석 및 분석검토

#### 3.1 IFORM의 검증

**파괴모드 2개를 가진 경우:** 비정규 변수  $X_1$ 과  $X_2$ 의 선형파괴함수 2개씩 가진 각각 다른 4개의 경우를 해석하였다. 표 1에 파괴함수와 확률분포함수를 정리하였다. 독립표준정규변수를 가지는 변환된 U-공간내에서 Case I 과 II의 파괴함수는 원점에 대해 불룩한 경우이며, Case III 과 IV는 오목한 경우이다. Case I 과 III에 대한 파괴곡면들을 그림 2에 보였다. FORM, IFORM 과 SORM으로 체계안전지수를 계산한 후 수치적분으로 구한 정확한 결과와 비교하였다. 표 1의 결과들은 IFORM이 FORM보다 더 좋은 산정값을 주며 FORM과 SORM의 결과들 사이에 IFORM 결과가 존재함을 알 수 있었다.

**평면 뼈대 구조:** 그림 3에서와 같이 수평 및 수직 하중을 받는 평면뼈대구조물을 해석하였다. 구조물 파괴가 되는 3개의 소성힌지 구조형상을 그림 3에 보였다. 5개 절점의 소성모멘트와 2개 절점의 작용하중을 확률변수로 하고, 각 확률변수는 대수정규분포를 가진다고 가정하였다. 확률변수의 통계값을 그림 3에서 보여준다. 체계안전지수에 대한 점추정치를 제 2차 모멘트방법으로 계산하고, 그 결과를 표 2에서 Monte Carlo Simulation (MCS)으로 얻은 결과와 비교하였다. 이 예제에서도 IFORM으로 구한 체계파괴확률이 FORM보다 더 정확함을 보이고 있다.

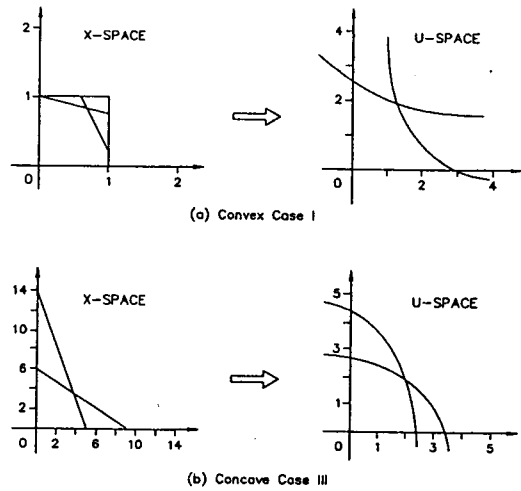


Fig. 2. Failure Surfaces in X- and U-Space for Case I and III

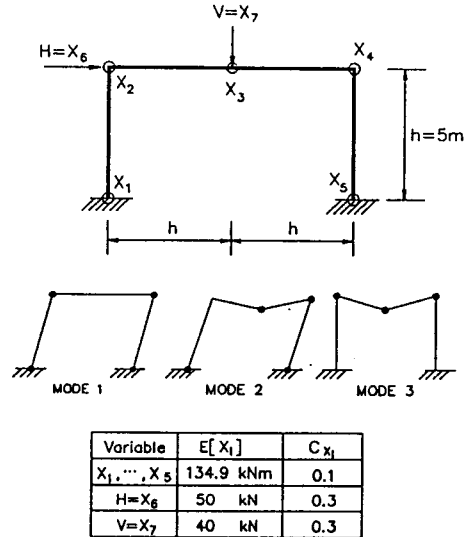


Fig. 3. Plane Frame Structure with Possible Failure Modes

Table 1. System Safety Indices of 2-Mode Systems by Various Methods

Cases	Failure Modes	Probability Distributions	$\beta_s$			
			Exact	FORM	SORM	IFORM
I	$g_1(x)=2.2-2x_1-x_2$ $g_2(x)=4-x_1-4x_2$	$f(x_1, x_2)=4(1-x_1)(1-x_2)$ $0 < x_1 < 1, 0 < x_2 < 1$	1.997	1.922 (-3.8)	2.010 (0.7)	1.972 (-1.3)
II	$g_1(x)=9.6-8x_1-3x_2$ $g_2(x)=9.6-3x_1-8x_2$	$f(x_1, x_2)=4(1-x_1)(1-x_2)$ $0 < x_1 < 1, 0 < x_2 < 1$	2.910	2.790 (-4.1)	2.926 (0.5)	2.868 (-1.4)
III	$g_1(x)=2x_1+3x_2-18$ $g_2(x)=2.8x_1+x_2-14$	$f(x_1, x_2)=e^{-(x_1+x_2)}$ $x_1 > 0, x_2 > 0$	2.161	2.218 (2.6)	2.143 (-0.8)	2.171 (0.5)
IV	$g_1(x)=2x_1+x_2-8$ $g_2(x)=x_1+2x_2-8$	$f(x_1, x_2)=e^{-(x_1+x_2)}$ $x_1 > 0, x_2 > 0$	1.566	1.629 (4.0)	1.537 (-1.9)	1.571 (0.3)

Note : Values in parenthesis are the relative errors (%) to the exact  $\beta_s$

Table 2. System Failure Probabilities of a Plane Frame Structure

Method	System $P_f$	$\beta_s$
FORM [5]	$4.67 \times 10^{-3}$	2.599
SORM [5]	$4.93 \times 10^{-3}$	2.581
IFORM	$4.83 \times 10^{-3}$	2.588
Monte Carlo Simulation [5]	$4.85 \times 10^{-3}$	2.586

### 3.2 해양구조물의 피로신뢰도 해석

해양구조물의 진전하는 피로파괴에 대한 신뢰도 해석이 그림 4와 같은 이상화된 병렬부재 모형을 사용하여 수행되었다. 같은 모형에 대해 MCS<sup>11</sup>과 수치적분<sup>12</sup>을 사용한 비슷한 두 연구가 이미 보고된 바 있다. 본 연구에서도 결과를 비교하기 위하여 비슷한 타 연구보고서<sup>11, 12</sup>와 같은 모형과 같은 변수값들을 사용하였다. 각 절점의 피로수명을 대수정규분포라고 가정하였으며 분산계수는 3.3값을 취하였다. 구조물의 설계수명은 20년, 각 절점의 피로파괴에 대한 목표안전지수( $\beta_o$ )는 각각 2.0과 3.0이다. S-N곡선의  $m$ 은 3.0이며, 절점들사이의 상관계수( $\rho$ )는 0.32이다. 앞에서 언급한 제 2차 모멘트방법들을 사용하여 피로신뢰도 해석을 수행하였다. 진전하는 피로파괴로 인해  $n$ 개의 부재로부터  $k$ 개의 부재파괴확률은 다음과 같다.

$$P_{f(k)} = P\left[\bigcup_{i=1}^{n_m} M_i\right] = P\left[\bigcup_{i=1}^{n_m} (t_{ki} < T_o)\right] \quad (22)$$

여기서  $M_i$ 는  $k$  부재파괴로 구성된  $i$ 번째 파괴모우드,  $t_{ki}$ 는 모우드  $M_i$ 에 대한  $k$ 번째 부재파괴까지 시간이며,  $n_m$ 은 가능한 파괴모우드수(=  $n!/(n-k)!$ )이다. 그림 5와 6에서 부재수가 2개와 3개인 경우 진전하는 피로파괴에 대한 영역을 보여준다.

먼저, 2개의 부재만으로 구성된 모형에 대해 본 연구에서 계산한 신뢰도지수와 비슷한 타 연구 결과들을 표 3에 정리하였다. IFORM의 결과를 정확한 수치해석결과와 비교해 볼때 FORM보다 더 정확한 결과를 주었으며, 특히 여기서는 SORM보다 더 정확하였다.

더 나아가 여러 병렬부재를 가지는 체계에 대하여 수행하였는데, 그림 7에서 첫번째 부재파괴와 체계파괴에 대한 점추정 결과의 안전지수를 비슷한 연구결과와 같이 보여주었다. 여기서 모든 모우드가 고려되었다. IFORM의 체계안전지수를 수치적분 결과와 비교해보면 비교적 작은 수의 부재를 가지는 체계(예로,  $n \leq 4$ )에 대해 좋은 결과를 준다. 그러나 부재수가 증가함에 따라 IFORM에 의한 산정의 정확성이 좀 떨어

Table 3. System Safety Indices of 2-Member Systems by Various Methods

Method	$\beta_o = 2.0$		$\beta_o = 3.0$	
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
FORM	1.930	1.743	3.216	3.084
SORM	2.087	1.895	3.368	3.214
IFORM	2.009	1.825	3.292	3.162
Monte Carlo Simulation [11]		1.76		3.15
Numerical Integration [12]		1.83		3.15

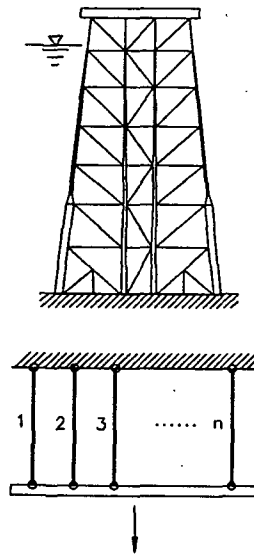


Fig. 4. Simplified Reliability Analysis Model for Progressive Fatigue Failure

지는데, 이는 체계파괴확률의 구간이 매우 넓어짐에 따라 점추정식 (10)의 정확성이 떨어지기 때문이다. 그렇지만 IFORM은 항상 FORM의 산정보다 항상 더 좋은 결과를 줄 수 있었다. 그리고 첫번째 부재파괴에 대한 안전지수는 부재수가 증가함에 따라 감소하였으며, 수치해석 결과와 매우 잘 일치하였다.

그림 8은 MPNET에서 한계를 정하는 상관계수( $\rho_o$ )가 0.99일때, MPNET으로 계산한 체계안전지수를 보여준다. 모든 모우드를 사용한 결과와 비교하면 MPNET로 산정된 안전지수는 약간 더 높았지만 적절한 범위에 있음을 알 수 있었다. 그림 9에서 PNET와 MPNET에 의해 산정된 체계안전지수를 여러 경우의  $\rho_o$  값에 대하여 보여주었다.  $\rho_o$  값이 작아짐에 따라, 대표모우드의 수(모우드집단의 수)가 급격히 감소하는 것을 보였다. 그리고  $\rho_o$ 의 값이 1에 접근함에 따라, MPNET에 의해 산정한 체계안전지수값이 꾸준히 개선되었으나, PNET결과들에서는 그러한 경향을 관측할

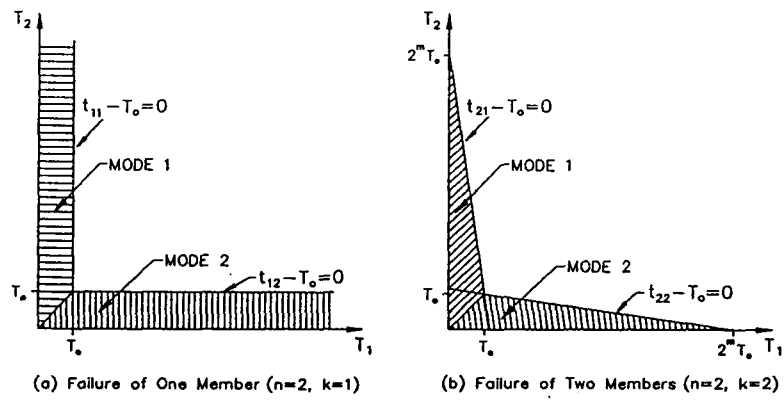


Fig. 5. Progressive Fatigue Failure Domain for a 2-Member System

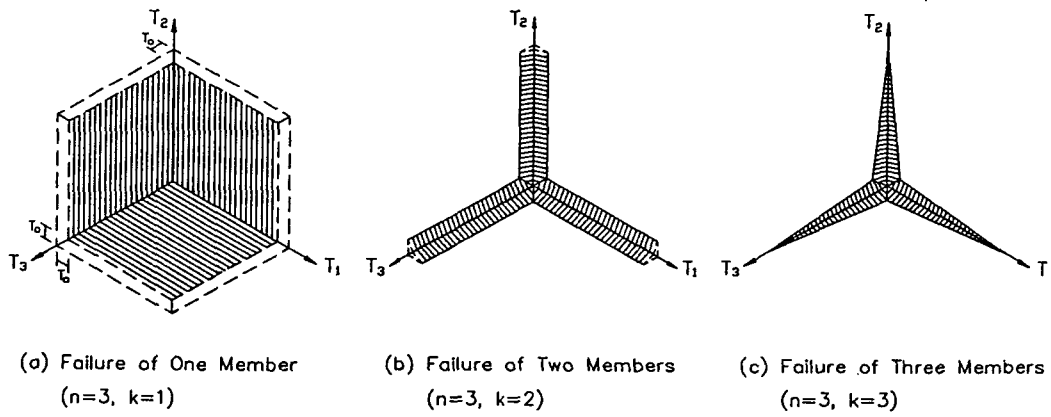


Fig. 6. Progressive Fatigue Failure Domain for a 3-Member System

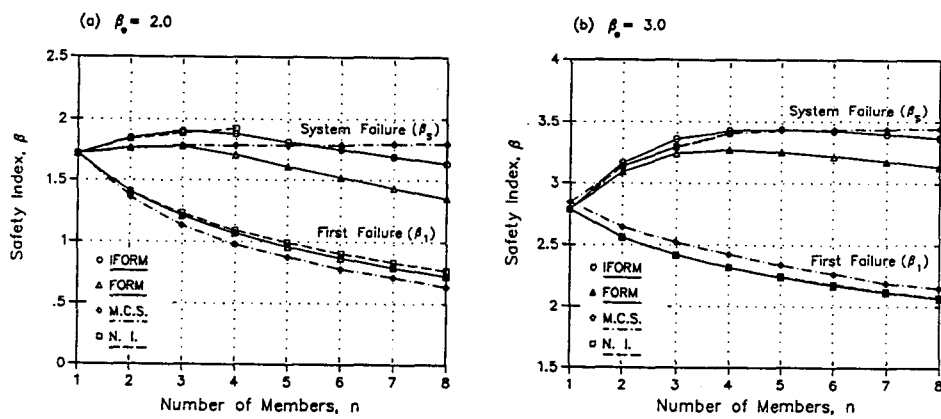


Fig. 7. Safety Index vs Number of Members

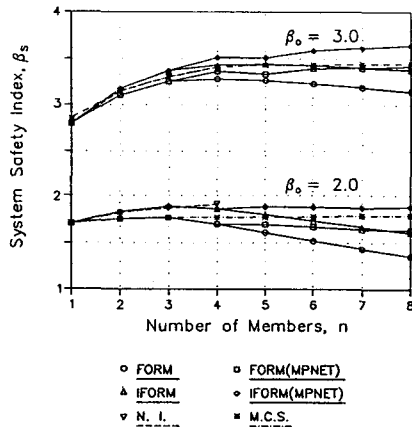
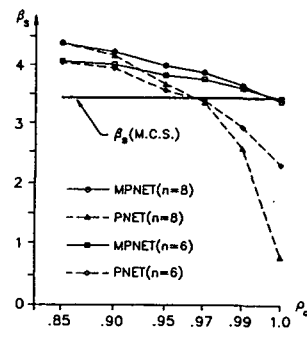


Fig. 8. System Safety Index vs Number of Members by MPNET for  $\rho_0=0.99$



		Number of Representative Modes					
$n$	$\rho_0$	.85	.90	.95	.97	.99	1.0
6	2	6	19	46	163	720	
8	1	3	21	66	831	40320	

Fig. 9. Estimated  $\beta_s$  by MPNET and PNET (for  $\beta_0=3.0$  and by Using IFORM)

수 없었다. 따라서 MPNET는 파괴모드가 많고, 이들의 상관계수가 높은 경우에 적용하기가 매우 유용하고 편리함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 구조계의 신뢰도 해석을 위한 개선된 기법으로 IFORM과 MPNET를 제안하였다. 연구결과에 따라 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) IFORM과 MPNET를 사용하여 얻은 체계안전지수는 MCS 과 수치적분 결과와 비교하면 상당히 잘 일치한다.
- 2) IFORM은 많은 파괴모우드를 포함하는 체계에 대해 SORM에서 야기되는 2차 곡면들의 결합파괴확률을 계산해야 하는 어려움을 피할수 있었으며, 항상 FORM 보다 좋은 결과를 주었다.
- 3) MPNET은 모우드수가 많고 상관계수가 높은 체계의 신뢰도해석에 대해 매우 타당한 방법임을 알 수 있었다.
- 4) Dunnett & Sobel이 제안한 식과 함께 사용한 IFORM과 MPNET는 파괴모우드 수가 많은 체계에 대해 매우 효율적이었다.

#### 참고 문헌

1. Rackwitz, R., and Fiessler, B., "Structural Reliability under Combined Random Load Sequences", Computers & Structures, 1978, Vol.9, No.5, pp.489-494.
2. Hohenbichler, M., and Rackwitz, R., "Non-normal Dependent Vectors in Structural Safety", Jour. of Eng. Mech. Div., ASCE, 1981, Vol.107, No. 6, pp.1227-1240.
3. Dolinski, K., "First-Order Second-Moment Approximation in Reliability of Structural Systems:

- Critical Review and Alternative Approach", Structural Safety, 1983, Vol.1, No.3, pp.211-231
4. Tvedt, L., "Two Second-Order Approximations to the Failure Probability", Veritas Report RDIV/20-004-83, Det norske Veritas, Oslo, Norway, 1983.
5. Madsen, H.O., "First Order vs Second Order Reliability Analysis of Series Structures", Structural Safety, 1985, Vol.2, No.3, pp.207-214.
6. Ma, H-F., and Ang, A.H-S., "Reliability Analysis of Redundant Ductile Structural Systems", Univ. of Illinois, Civil Eng. Studies, Struc. Research Series No.494, August, 1981.
7. Rosenblatt, M., "Remarks on a Multivariate Transformation", Annals of Math. Stat., 1952, Vol.23, No.3, pp.470-472.
8. Ditlevsen, O., "Narrow Reliability Bounds for Structural Systems", Journal of Structural Mechanics, 1979, Vol.7, No.4, pp.453-472.
9. Dunnett, C.W., and Sobel, M., "Approximations to the Probability Integral and Certain Percentage Points of a Multivariate Analogue of Students' t-Distribution", Biometrika, 1955, Vol.42, pp.258-260.
10. Thoft-Christensen, P., and Sørensen, J.D., "Reliability of Structural Systems with Correlated Elements", Applied Mathematical Modelling, 1982, Vol.6, pp.171-178.
11. Martindale, S.G., and Wirsching, P.H., "Reliability-Based Progressive Fatigue Collapse", Jour. of Struc. Eng., ASCE, 1983, Vol. 109, No. 8, pp.1792-1811.
12. Stahl, B., and Geyer, J.F., "Fatigue Reliability of Parallel Member Systems", Jour. of Struc. Eng., ASCE, 1984, Vol.110, No.10, pp.2307-2323.
13. 류정수, "해양구조물의 피로파괴에 대한 신뢰도 해석", 한국과학기술원, 박사학위논문, 1991.
14. Ryu, J.S., Yun, C.B., and Cho, H.N., "Improved Methods for Reliability Evaluations of Series Systems", Proc. of ICASP6, Mexico, 1991, pp.265-272.