

〈감 좌〉

수공학에서의 신뢰도 분석방법(II)

김 문 모* 조 원 철** 이 원 환***

(* 편집자 주 : 본 강좌의 구성은 다음과 같다. 그러나, 지면 관계상 지난호에 3.3절 까지 게재하였으며, 나머지를 이번호에 실는다.)

1. 서론
2. 시스템의 위험도와 신뢰도의 정의
3. 신뢰도 분석방법
 - 3.1 직접 적분법(Direct Integration Method)
 - 3.2 Monte Carlo Simulation Method
 - 3.3 Mean Value First-Order Second Moment(MVFOSM) Method
 - 3.3.1 MVFOSM에 기초한 확률산정
 - 3.3.2 MVFOSM법의 장점과 단점
 - 3.4 Advanced First-Order Second Moment(AFOSM) Method
 - 3.4.1 파괴점을 찾기 위한 방법
 - 3.4.2 AFOSM방법에 기초한 확률계산
 - 3.4.3 AFOSM방법의 장점
4. 신뢰도 분석방법의 수공학에서의 적용예
 - 4.1 직접적분법의 적용
 - 4.2 Monte Carlo Simulation방법의 적용
 - 4.3 MVFOSM방법의 적용
 - 4.4 AFOSM방법의 적용
5. 맺음말
6. 참고문헌

지난호에는 시스템의 위험도와 신뢰도의 정의, 신뢰도 분석방법 중 직접적분법(Direct Integration Method)과 Monte Carlo Simulation Method, Mean Value First-Order Second Moment (MVFOSM) Method에 대하여 살펴보았으며, 본 기고에서는 Advaced First-Order Second Moment (AFOSM)방법과 신뢰도 분석방법의 수공학에서의 적용예에 대하여 알아보기로 하겠다.

3.4 Advanced First-Order Second Moment (AFOSM) Method

최근의 연구는 MVFOSM 방법의 단순성과 장점을 유지하려고 노력해 왔으나, 아직도 결점들이 많이 발견되고 있다. 그 결과 AFOSM 방법을 개발하였고, AFOSM 방법의 기본개념은 Hasofer와 Lind (1974)⁽¹⁶⁾에 의해 최초로 제안되었으며, Rackwitz (1976)⁽⁶⁾가 완전한 AFOSM 방법을 만들었다. 이 방법의 요점은 파괴평면상의 가능파괴점 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_p^*)$ 에서 실행함수, $g(\underline{x}^*)$ 가 0일때 Taylor 급수확장을 통해 실행함수를 선형화하는데 있다. 통계

* 신구전문대학 토목공학과 전임강사

** 연세대학교 토목공학과 부교수

*** 연세대학교 토목공학과 교수

학적으로 독립인 기본변량일 경우에 파괴점에서 1계 Taylor급수에 의해 근사되는 실행함수의 기대값과 분산은 다음과 같다.

$$E[Z] = g(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^p C_i(\bar{x}_i - x_i^*) \quad (3.9)$$

$$VAR(Z) = \sigma_z^2 = \sum_{i=1}^p C_i^2 VAR(x_i) \quad (3.10)$$

$$\sigma_z = \left[\sum_{i=1}^p (C_i \sigma_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

여기서, c_i 는 이 경우에, $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_p^*)$ 에서 계산되는 $\partial g / \partial x_i$ 이다.

σ_z 의 식은 다음과 같은 선형형태로 다시 쓸 수 있다.

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^p \alpha_i C_i \sigma_i \quad (3.12)$$

여기서, α_i 는 민감도 계수이며, 다음식으로 부터 계산된다.

$$\alpha_i = \frac{C_i \sigma_i}{\left[\sum_{j=1}^p (C_j \sigma_j)^2 \right]^{1/2}} \quad (3.13)$$

식(3.9)와 (3.11)을 식(3.6)에 대입하면 AFOSM 방법에서의 신뢰도 지수는 다음과 같이 된다.

$$\beta = \frac{g(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^m C_i(\bar{x}_i - x_i^*)}{\sum_{i=1}^p \alpha_i C_i \sigma_i} \quad (3.14)$$

3.4.1 파괴점을 찾기 위한 방법

앞에서의 식들은 아주 간단하며 단순한 것처럼 보이지만 파괴점의 결정은 일반적으로 쉬운 작업이 아니다. 따라서, 파괴점을 결정하기 위해서 여러가지 반복기법이 제안되어 왔다(예를 들어, Rackwitz(1976)⁽⁶⁾와 CIRIA(1977)⁽¹¹⁾). Rackwitz방법은 Ang과 Tang(1984, p.361)⁽¹⁴⁾에 의해 제안된 AFOSM방법의 요약에도 나타나듯이 표준적인 반복 기법으로 알려져 있다. Rackwitz반복기법의 흐름도가 그림 3.1에 나와 있다.

최근에 제한적인 비선형 최적화의 사용이 반복기

법의 선택에서 가장 유망한 것으로 나타나고 있다. Shinozuka(1983)⁽¹²⁾와 Cheng(1982)⁽⁷⁾의 제한적 비선형 최적화 기법은 아래와 같다. 만일 기본변량들이 표준화되었다면, 즉

$$y_i = (x_i - \bar{x}_i) / \sigma_i \quad (3.15)$$

표준화된 기본변량, y_i 는 평균이 0이고 표준편차가 1이다. Shinozuka(1983)⁽¹²⁾는 다음과 같은 최적화문제를 풀었다.

$$\text{Minimize } : \gamma_0 = (\underline{y}^T \underline{y})^{1/2} \quad (3.16)$$

$$\text{Subject to } : g_1(\underline{y}) = 0 \quad (3.17)$$

여기서, \underline{y}^T = 표준화 된 기본변량 matrix의 Transpose

이 문제를 풀기위해 Lagrange multiplier method를 사용하면, Lagrangian은 식(3.18)과 같다.

$$L_k = (\underline{y}^T \underline{y})^{1/2} + \lambda g_1(\underline{y}) \quad (3.18)$$

여기서, λ = Lagrangian multiplier

$\partial L_k / \partial y = \partial L_k / \partial \lambda = 0$ 으로 놓으면, \underline{y}^* 와 λ^* 의 해는 식(3.19)로 부터 얻어진다.

$$\underline{y}^* = -\lambda^* \gamma \underline{G} \quad (3.19)$$

여기서, $\gamma = \gamma_0$ 의 최솟치

$\underline{G} = \underline{y}^*$ 에서 계산된 $\partial g_i / \partial y_i$ 의 vector

γ 에 대해 풀면

$$\gamma = \pm \frac{\underline{y}^{*T} \underline{G}}{(\underline{G}^T \underline{G})^{1/2}} \geq 0 \quad (3.20)$$

시스템의 실행함수, Z는 표준화된 기본변량, y_i , 즉, $Z = g_2(\underline{y})$ 에 의해 표현될 수 있다. 파괴면에서 1계 Taylor 급수확장을 하면

$$E[Z] \approx g_2(\underline{y}^*) - \sum_{i=1}^p G_{2,i} y_i^* \quad (3.21)$$

$$VAR(Z) = \sigma_z^2 = \sum_{i=1}^p C_i^2 G_{2,i} \quad (3.22)$$

여기서, $G_{2,i} = \underline{y}^*$ 에서 계산된 $\partial g_2 / \partial y_i$ 이다. 파괴면에서, $G_2(\underline{y}^*) = 0$ 이므로 신뢰도 지수(Reliability Index), β 는 다음과 같이 된다.

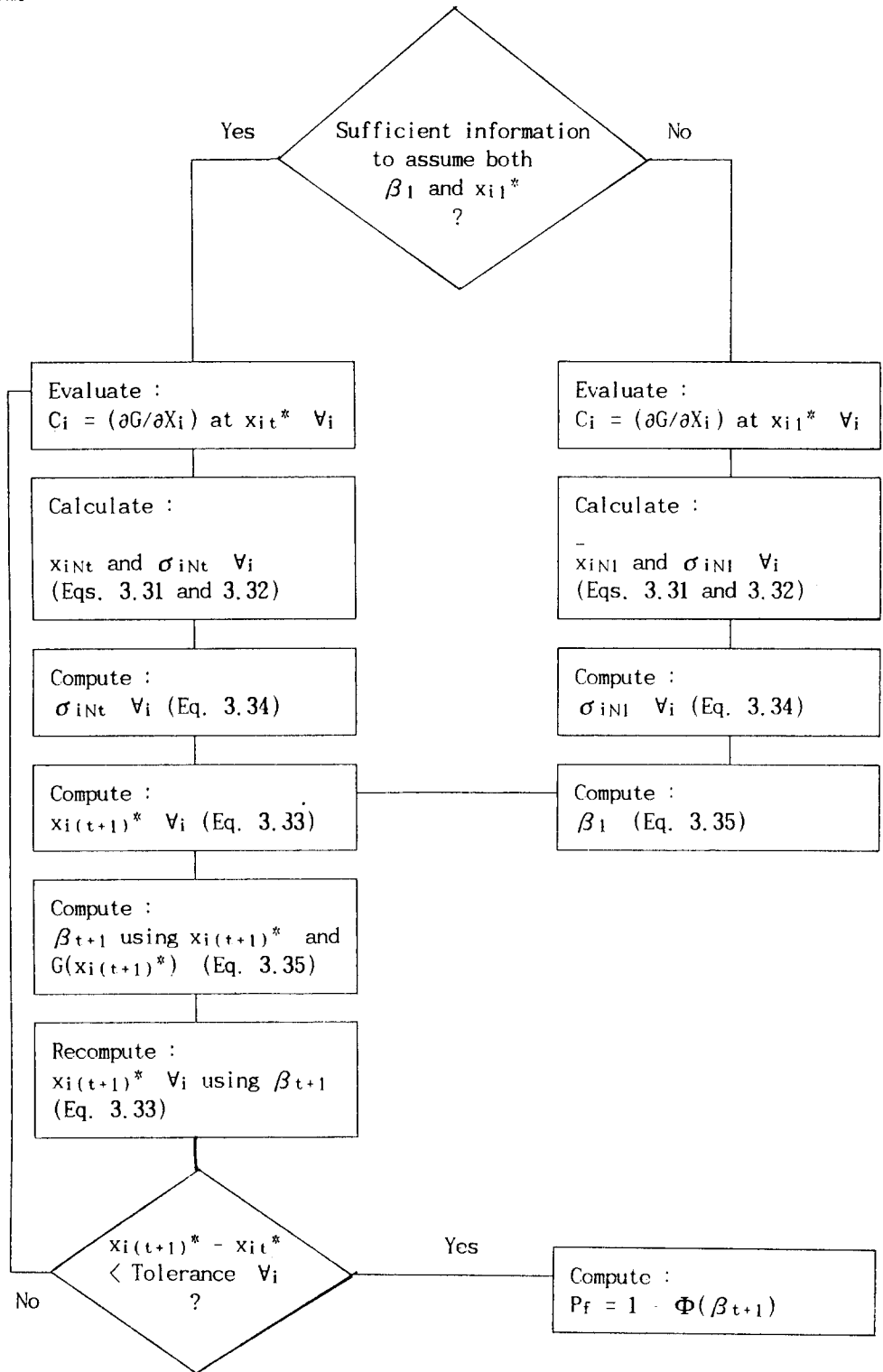


그림 3.1 Rackwitz 반복기법의 흐름도

$$\beta = - \frac{\sum_{i=1}^p G_{2i} y_i^*}{[\sum_{i=1}^p G_{2i}^2]^{1/2}} \quad (3.23)$$

식(3.23)을 다시 쓰면 식(3.24)와 같다.

$$\beta = - \frac{G_2 y^*}{(G_2^T G_2)^{1/2}} \quad (3.24)$$

Shinozuka(1983)⁽¹²⁾는 식(3.20)과 식(3.24)를 비교하여 만일 $g_1(y)$ 를 $g_2(y)$ 로 놓는다면, 신뢰도지수 (또는 그것의 절대값)는 시스템의 평균상태(즉, 모든 기본 변량들이 그들의 평균값 일때)와 파괴면 사이에 표준화된 공간에서 가장 짧은 거리로 나타난다고 했다. 때문에 Lagrange multiplier method를 포함하여, 최근에 사용되는 비선형 programming 방법을 위해 유용한 최적화 기법은 파괴점의 결정에 사용될 수 있다. 예를 들어, Wang 등 (1983)⁽¹⁷⁾은 파괴점을 찾기 위해 반복 “Redesign Travel”식을 병용한 Lagrange Multiplier Approach를 사용하였다. 그들이 연구한 문제에서, “Redesign Travel” 최적화 기준기법은 일반적으로 5~8회 반복에서 얻어지는 수렴치가 가장 효율적이었다. 또한, 그들은 수렴속도가 문제의 크기에 관계없이 대부분 독립적으로 나타난다는 것을 알았다. Cheng의 제한 선형 Programming기법은 또다른 문제를 가진다. Cheng은 파괴면 $g(x^*)=0$ 상의 점에서 식(3.14)는 다음과 같이 쓸 수 있다고 했다.

$$\sum_{i=1}^p C_i(\bar{x}_i - x_i^* - \alpha_i - \beta \sigma_i) = 0 \quad (3.25)$$

이 식을 풀면 다음과 같이 된다.

$$\bar{x}_i - x_i^* - \alpha_i - \beta \sigma_i = 0 \text{ (모든 } i \text{에 대해)} \quad (3.26)$$

때문에, 식(3.26)은 파괴점 x^* 를 정의하며, 같은 제한조건을 가지는 급수로 생각될 수 있다.

$$\text{Min } |g(x^*)| \quad (3.27)$$

식(3.26)에 종속하는 식(3.27)의 목적함수를 선정하고 식(3.13)과 식(3.14)에 의해 각각 주어지는 α ,와 β 를 정의함으로써 파괴면을 구할 수 있다. 이 문제는 같은 수의 제약조건과 변량을 가지고 있지만

β 와 α_i 는 각 점에서 다르기 때문에 간단한 해를 주지는 않으므로, 각 점에서, 새로운 최적화 문제를 풀어야 한다. Cheng(1982)⁽⁷⁾은 Generalized Reduced Gradient(GRG)기법, (Abadie와 Carpentier, 1969)⁽¹⁸⁾을 이용하여 파괴점과 β 를 구하였다. 다른 모든 비선형 Programming기법과 마찬가지로, GRG는 전체적인 최적화를 보장하지는 못하며, 따라서, Algorithm 내에 여러개의 다른 시작점을 필요로 한다. 다행히, Cheng (1982)⁽⁷⁾은 만일 $|g(x^*)|$ 의 최소치가 0에 가까워지면, β 와 x^* 의 해는 일반적으로 전체적인 최적값이라는 것을 발견하였다. 때문에, 만일 목적함수가 충분히 0에 가깝다면, 적절한 β 값이 결정되었다고 결론지을 수 있다. Cheng의 GRG방법의 강점은 GRG기법의 Robustness에 있다. Sandgren과 Ragsdell(1980)⁽¹⁹⁾은 비선형 최적화방법에서 기존 Computer Code의 재검토와 비교를 행하였으며, GRG의 기본 Code는 다른 방법들보다 훨씬 효율적이고, 다양한 문제도 해결할 수 있다는 것을 발견했다. 따라서, Cheng의 GRG 방법을 사용한 AFOSM 방법은 정확하고, 바르게 수학적으로 표현되어야 하는 문제에서 유용하게 사용될 것이다.

3.4.2 AFOSM 방법에 기초한 확률계산

MVFOSM 방법에서와 마찬가지로 β 를 포함한 확률상태의 관점에서 보면, 신뢰도에 관한 정보는 빈약하며 Tchebychev 부등식의 형태를 가진다 (Rackwitz와 Fiessler, 1978)⁽²⁰⁾. 그러나, MVFOSM 방법과는 달리 AFOSM 방법에서는 만일 기본변량의 분포가정이 채택된다면 보다 정확한 확률상태를 만들 수 있다. 모든 기본 변량들이 정규 분포하는 선형파괴면에서 파괴확률(위험도)은 식(3.7)에 의해 정확히 주어진다. 모든 기본변량들이 정규분포하는 볼록 파괴면에서 파괴확률(위험도)은 다음과 같이 제한된다.

$$1 - \Phi(\beta) \leq R_s \leq 1 - X_p^2(\beta) \quad (3.28)$$

여기서, $X_p^2(\cdot)$ 은 자유도가 p 인 χ^2 분포이다 (Hasofer, 1974)⁽²¹⁾. 구조적인 문제에서 Rackwitz (1976)⁽⁶⁾에 따르면 만일 β (즉, 시스템의 평균에서

과괴면 까지의 거리함수)가 하나의 최소치를 가지면, 하한치는 일반적으로 1계 근사의 정도내에서 상대적으로 좋은 확률계산치가 된다고 했다. 하수관거의 신뢰도평가에 대한 경험이 적으므로, 수리학적인 문제들은 하나의 거리함수(Distance Function) 최소치를 가지는 것으로 나타날 수도 있으며, 따라서 하한치는 구조적인 문제에서와 마찬가지로 수리학적 시스템에서도 좋은 위험도 계산치이다.

그러나, 대부분의 실제 시스템에서는 기본변량들이 정규분포를 하지 않으므로, 비정규 변량들은 대응하는 정규분포 변량들로 변환하는 것이 좋다. Rackwitz(1976)⁽⁶⁾는 비정규분포의 누가분포함수(CDF)와 확률밀도함수(PDF)의 값들을 파괴점에서 대응하는 정규분포와 같도록 하는 변환을 제안하였다. 즉,

$$F_{x_i}(x_i^*) = \Phi\left(\frac{x_i^* - \bar{x}_i^N}{\sigma_i^N}\right) \quad (329)$$

$$f_{x_i}(x_i^*) = f^N\left(\frac{x_i^* - \bar{x}_i^N}{\sigma_i^N}\right) \quad (330)$$

여기서, $F_{x_i}(x_i^*)$ 와 $f_{x_i}(x_i^*)$ 는 각각 x_i 와 x_i^* 의 CDF와 PDF이고, $\Phi(\cdot)$ 와 $f^N(\cdot)$ 은 각각 표준정규분포의 CDF와 PDF이다. 이렇게 하기 위하여, Rackwitz는 1계 Taylor급수 확장에 의해 비정규 분포함수를 근사하였다.

때문에, 대응하는 정규분포의 평균, \bar{x}_i^N 과 표준편차, σ_i^N 은 다음과 같이 된다.

$$\bar{x}_i^N = x_{i,N}^* - \Phi^{-1}(F_{x_i}(x_i^*)) \sigma_i^N \quad (331)$$

$$\sigma_i^N = \frac{f(\Phi^{-1}(F_{x_i}(x_i^*)))}{f_{x_i}(x_i^*)} \quad (332)$$

또한, 비선형 최적화 문제에서의 제약조건은 다음과 같다.

$$\bar{x}_i^N - x_i^* - \alpha_i \beta \sigma_i^N = 0 : \text{모든 } i \text{에 대해} \quad (333)$$

여기서,

$$\alpha_i = \frac{C_i \sigma_i^N}{\left[\sum_{j=1}^p (C_j \sigma_j^N)^2\right]^{1/2}} \quad (334)$$

$$\beta = \frac{g(\underline{x}^*) + \sum_{i=1}^p C_i (\bar{x}_i^N - x_i^*)}{\sum_{i=1}^p \alpha_i C_i \sigma_i^N} \quad (335)$$

Rackwitz와 Fiessler는 비정규변량의 이러한 정규변환은 1계 이론의 정도내에서 정확한 값을 갖는다고 했다. 더구나, Yen 등 (1986)⁽¹⁵⁾과 Cheng (1982)⁽⁷⁾은 변환된 정규변량을 사용한 AFOSM 방법과 식(3.28)의 하한치를 취한 위험도, 그리고 간단한 몇개의 예제에서 얻은 엄밀해를 비교하였다. 그 결과 AFOSM 방법이 위험도가 작은 경우(즉, $R_s < 0.001$)에서도 엄밀해와 매우 근접한 위험도 값을 준다는 것을 알았다. Ang과 Tang(1984, p. 383)⁽¹⁴⁾은 AFOSM 방법에 의한 위험도 값이 실제적인 공학문제에서 나타나는 전형적인 비선형 실행함수를 가진 다양한 문제에서도 아주 정확한 값을 준다고 했다. 때문에, 식(3.28)에서 하한치를 위험도계산값으로 하는 것은 모든 기본변량들이 정규분포하거나 정규분포로 변환된 블록과괴면을 가진 시스템에서 1계 근사의 정도내에서 아주 정확함을 나타낸다.

3.4.3 AFOSM 방법의 장점

수리구조물의 불확실성 산정에서 AFOSM 방법의 성공적인 사용예와 이 방법의 일반적인 특성을 고려해 볼 때, 상대적인 단순성, 정확성, Robustness 때문에, AFOSM 방법이 공학 시스템설계 문제에 가장 적절한 신뢰도 분석방법일 것이다. 이러한 생각은 Rackwitz (1976)⁽⁶⁾, CIRIA(1977)⁽¹¹⁾와 같이 구조적인 안전 Code에서 과학적인 사고를 기본으로 AFOSM 방법의 사용을 강하게 지지한 구조공학 연구자들에 의해서도 반영되었다. 따라서, AFOSM 방법은 설계문제에 적용될 수 있고, 실시간 홍수예보 불확실성 분석에서도 사용될 것이다. 홍수예보 문제에서 AFOSM 방법의 주된 장점은 강우-유출 과정의 여러가지 다른 모형 구성에서도 작업할 수 있도록 하는 Robustness에 있다. 대부분의 AFOSM 방법은 모든 기본 변량들이 상관되어 있지 않다고 가

정한 것에 주목하여야 한다. AFOSM 방법의 기본 변량들의 상관성을 다루는 방법들이 존재하지만(예를 들어, Ang과 Tang, 1984)⁽¹⁴⁾ 실제적인 단순한 관점으로 볼 때, 이러한 것들은 가능한 한 피하는 것이 좋다.

Garen과 Burges(1981)⁽¹³⁾는 매개변수의 상관성을 고려한 Monte Carlo Simulation의 결과가 상관성을 무시한 결과와 크게 차이나지 않는다고 했다. 때문에, 기본변량들 사이에 약간의 상관성이 있다는 가정은 AFOSM 위험도 계산치에 크게 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

4. 신뢰도분석방법의 수공학에의 적용 예

4.1 직접적분법의 적용

Wood(1976)⁽⁸⁾는 강우자료로부터 발생하는 홍수 빈도 관계에 대해 아주 간단한 수문모형의 단일변수의 불확실성의 영향과 수문모형을 분석하기 위해 직접적분법을 사용하였다.

Davis와 Nnaji(1982)⁽²²⁾는 Arizona, Tucson 근처의 Airport Wash라는 33km²의 배수구역에서 홍수 예보 신뢰성의 단순화된 연구를 수행하였다. 그들은 대류성강우의 종모양 모형과 수정 Purdue 강우-유출 모형에 기초하여 Wash의 유출구 근처에 측정된 강우가 주어질 때 유출량의 조건부 확률을 결정하였으며, 이 확률분포는 측정강우량이 주어질 때 초과하는 위험홍수위의 확률을 결정하기 위해 적분되었다. 이 연구는 자료나 강우량의 매개변수, 유출모형의 불확실성은 고려하지 않았다.

Kooman 등 (1978)⁽²³⁾은 하중(파력과 정압력)의 직접적분과 저항의 부분안전도 계수 분석을 결합하여 Netherlands에서 Oosterschelde 고조 방파제의 기초를 건설하는 데 신뢰도분석에 기초한 설계를 개발하였다. 이 설계법의 결과는 AFOSM법에 의해 점검되었고, 실제적인 설계적용에 아주 유용하다고 알려졌다.

Tung과 Mays(1980, 1981)^{(3), (4)}는 직접적분법을

사용한 가장 혁신적인 수단을 제안하였다. 그들은 하중과 저항을 위한 분포함수의 매개변수를 결정하기 위해 1차 근사를 사용함으로써 하중과 저항에 대한 기본변량분포의 관계와 문제점을 다루었다.

4.2 Monte Carlo Simulation 방법의 적용

Garen과 Burges(1981)⁽¹³⁾가 연구한 실시간 수문 예보에서 불확실성을 분석하는 경우에서, 이들은 단순화된 Stanford Watershed모형에 의한 수문곡선의 예측에서 오차의 범위를 계산하기 위한 모형 매개변수 변동성의 Monte Carlo Simulation을 사용하였다. Monte Carlo Simulation에 의해 산정된 오차의 범위는 MVFOSM 신뢰도 분석방법을 사용하여 계산된 것과 비교하기 위해 사용되었다.

4.3 MVFOSM 방법의 적용

MVFOSM 방법은 단순성과 실용성으로 수자원 시스템의 불확실성 분석에 다양하게 사용되고 있다. MVFOSM 방법은 하수관거(Tang and Yen, 1972)⁽¹²⁾와 암거(Yen 등, 1980)⁽²⁴⁾의 수리구조물 신뢰도 분석에 직접적으로 적용되어 왔으며, 이전에도 언급했듯이 Tung과 Mays(1980, 1981)^{(3), (4)}에 의해서도 유사한 분석에 간접적으로 적용되었다.

Burges(1979)⁽²⁵⁾는 설계홍수량의 산정과 홍수터 결정에 사용된 홍수추적과정에서 오차에 기인하는 홍수터 지도의 불확실성 분석에 MVFOSM법을 적용하였다. 그러나 Burges의 연구는 홍수유량의 불확실성과 유로소통능력의 불확실성을 같다고 보는 오류를 범했다.

McBean 등(1984)⁽²⁶⁾과 Oegema와 McBean(1986)⁽²⁷⁾은 Burges의 오류를 수정하였고 설계유량과 유로소통능력의 불확실성을 결합하여 홍수터 폭에서 표준편차 1인 오차한계를 결정하였다.

Tung (1987)⁽²⁸⁾은 미국기상청(NWS)의 강우빈도지도-U.S. Weather Bureau Technical Paper No. 40(Hershfield, 1961)-에서 강우깊이의 신뢰한계를

결정하기 위해 MVFOSM 법을 사용하였다.

마지막으로, Garen과 Burges(1981)⁽¹³⁾는 수정 Stanford Watershed 모형에 의해 발생하는 총유출량의 모의에서 오차한계를 근사하는데 식(3.4)를 사용하였다. Yen과 Tang(1977)⁽²⁹⁾은 여러가지 모형에 의해 주어지는 실시간 홍수예보의 신뢰도를 평가하기 위해 홍수추적모형의 불확실성을 분석하는데 MVFOSM법을 적용하였다. 그들은 보정계수(Correction Factor)로서 불확실성의 여러가지 근원을 분리한 후 MVFOSM 분석을 적용하였다. 이 연구는 실시간 홍수예보에서 포함된 불확실성을 고려하기 위한 첫번째 시도였으나, 보정계수에 의한 접근은 분석의 유용성을 감소시켰다. 보정계수를 사용한 단순화는 MVFOSM 법을 사용할 수 있게 하지만, 종합적인 분석을 하는데 적당하지 않다. 왜냐하면 모형의 매개변수와 자료의 불확실성에 대한 기지의 유용한 정보를 보정계수와 어떻게 같게 할 수 있는가가 분명하지 않기 때문이다. 때문에, 이러한 불확실성의 근원에 대한 지식은 보정계수에 의한 접근이라는 가정 때문에 상실될 수도 있다. 따라서, 모형의 매개변수와 자료의 불확실성에 대한 유용한 정보를 모형예측에 대한 효과로 직접적으로 사용할 수 있게 하는 것이 좋은 접근방법이다.

4.4 AFOSM 방법의 적용

AFOSM 방법은 여러가지 수리구조물의 위험도 평가에 아주 효율적인 방법이다. Kooman 등(1978)⁽²³⁾과 Vrijling (1982)⁽³⁰⁾은 콘크리트 부재의 주 단면, 철문, 토대, 기초를 포함하여, 네덜란드에서 Oosterschelde 고조방파제 부재들의 신뢰도를 조사하였다. Mol 등(1983)⁽³¹⁾은 잡석으로 만든 쇄파제방의 설계에 AFOSM 방법을 사용하였다. Melching과 Yen (1986)⁽¹⁵⁾은 하수관거의 신뢰도에 대한 시공오차의 영향(설계경사에 영향을 주는)을 분석하기 위하여 AFOSM 방법을 사용하였다. Melching 등(1986)⁽³²⁾은 강우-유출 홍수빈도 모형에서 불확실성을 분석하고 Wood (1976)⁽⁶⁾에 의해

얻어진 수치적인 결과와 AFOSM 방법을 비교함으로써 수문학적 문제에서 AFOSM 방법의 잠재적인 유용성을 시사했다. Cheng (1982)⁽¹⁷⁾은 Dam의 월류위험도를 산정하기 위해 AFOSM 방법을 사용하였으며, 또한 단순한 예제를 통해 여러가지 위험도 산정방법들을 비교하였다. 그는 정도, 일관성, 계산 비용 등을 고려하여 볼 때 GRG 최적화 기법을 쓴 AFOSM 방법이 댐 안전도 평가나 위험도 수준이 10^{-3} 보다 작은 중요한 다른 시스템에서 아주 추천할 만하다고 하였다.

5. 맺음말

본 기고는 최근에 수공학자들에 의해 관심을 끌고 있는 신뢰도 분석기법을 소개하기 위한 것으로서 기 발표된 논문을 요약, 정리한 것이다. 필자도 이에 관해 연구를 계속하고 있으므로 미진한 점이 많을 것으로 사료되나, 이 분야에 관심이 있는 분들에게 조금이라도 도움이 될까하여 소개하는 것이며, 관심이 있는 분과는 여러가지로 협조를 하고 싶은 생각에서 본 강좌를 게재한다.

6. 참 고 문 헌

1. CIRIA, "Rationalization of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes", Report 63, London, 1977.
2. M. Shinozuka, "Basic Analysis of Structural Safety", Vol. 109, No. 3, pp. 721-740, 1983.
3. Y. K. Tung, and L. W. Mays, "Risk Analysis for Hydraulic Design", Vol. 106, No. HY5, pp. 893-913, 1980.
4. Y. K. Tung and L. W. Mays, "Risk Models for Flood Levee Design", Vol. 17, No. 4, pp. 833-841, 1981.
5. C. A. Cornell, "First-Order Analysis of Model and Parameter Uncertainty", Proceedings, International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems, Vol. 2, Tucson, Arizona, pp. 1245-1272, December 1972.

6. R. Rackwitz, "Practical Probabilistic Approach to Design", Bulletin 112, Comite European du Beton, Paris, France, 1976.
7. S. T. Cheng, "Overtopping Risk Evaluation for an Existing Dam", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1982.
8. E. F. Wood, "An Analysis of the Effects of Parameter Uncertainty in Deterministic Hydrologic Models", Vol. 12, No. 5, pp. 925-932, 1976.
9. H. Mayer, "Du Sicherheit der Bauwerk (The Safety of Structures), Springer Verlag, Berlin, 1926.
10. H. L. Su, "Statistical Approach to Structural Design", Proceedings, Institution of Civil Engineers, London, Vol. 13, pp. 353-362, 1959.
11. C. A. Cornell, "Bounds on the Reliability of Structural Systems", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 93, No. ST1, pp. 171-200, February 1967.
12. W. H. Tang, and B. C. Yen, "Hydrologic and Hydraulic Design Under Uncertainties", Proceedings, International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems, Vol. 2, Tucson, Arizona, pp. 868-882, December 1972.
13. D. C. Garen, and S. J. Burges, "Approximate Error Bounds for Simulated Hydrographs", Vol. 107, No. HY11, pp. 1519-1534, 1981.
14. A. H-S. Ang, W. H. Tang, "Probability Concepts in Engineering Planning and Design : Vol. I Basic Principles, Vol. II. Decision, Risk, and Reliability", John Wiley & Sons, 1984.
15. B. C. Yen, "Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering", WRP, 1986.
16. A. M. Haosfer, and N. C. Lind, "Exact and Invariant Second-Moment Code Format", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM1, pp. 111-121, February 1974.
17. S. H. Wang, J. T. P. Yao, and W. F. Chen, "Reliability of Antenna Structures", Recent Advances in Engineering Mechanics and Their Impact on Civil Engineering Practice, edited by W. F. Chen and A. D. M. Lewis, Vol. II, West Lafayette, Indiana, pp. 855-858, 1983.
18. J. Abadie, and J. Carpentier, "Generalization of the Wolfe Reduced Gradient Method to the Case of Nonlinear Constraints", in Optimization, edited by R. Fletcher, Academic Press, London, 1969.
19. E. Sandgren, and K. M. Ragsdell, "The Utility of Nonlinear Programming Algorithms : A Comparative Study", Journal of Mechanical Design, ASME, Vol. 102, No. 3, pp. 540-551, July 1980.
20. R. Rackwitz, and B. Fiessler, "Non-normal Vectors in Structural Reliability", SFB 96 Report 29, Technical University of Munich, pp. 1-22, 1978.
21. A. M. Haosfer, "Reliability Index and Failure Probability", Journal of Structural Mechanics, Vol. 3, No. 1, pp. 25-27, 1974.
22. D. R. Davis, and S. Ninaji, "The Information Needed to Evaluate the Worth of Uncertain Information, Predictions and Forecasts", Vol. 21, pp. 461-470, 1982.
23. D. Kooman, J. K. Vrijling, T. Maldir, and L. de Quelirij, "Probabilistic Approach to Determine Loads and Safety Factors", Symposium on Foundation Aspects of Coastal Structures, Delft, 1978.
24. B. C. Yen, S. T. Cheng, and W. H. Tang, "Reliability of Hydraulic Design of Culverts", Proceedings, International Conference on Water Resources Development, IAHR Asian Pacific Division Second Congress, Vol. 2, Taipei, Taiwan, pp. 991-1001, May 1980.
25. S. J. Burges, "Analysis of Uncertainty in Flood Plain Mapping", Water Resources Bulletin, Vol. 15, No. 1, pp. 227-243, February 1979.
26. E. A. McBean, J. Penel, and K. L. Siu, "Uncertainty Analysis of a Delineated Floodplain", Canadian Journal of Civil Engineers, Vol. 11, pp. 387-395, 1984.
27. B. W. Oegema, E. A. McBean, "Uncertainties in Flood Plain Mapping", presented at the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis, May 14-17, Baton Rouge, Louisiana, 1986.
28. Y. K. Tung, "Uncertainty Analysis of National Weather Service Rainfall Frequency Atlas", Vol. 113, No. 2, pp. 179-189, 1987.
29. B. C. Yen, W. H. Tang, "Reliability of Flood Warn-

- ing”, Stochastic Processes in Water Resources Engineering, Proceedings of the 2nd International Symposium on Stochastic Hydraulics, Lund, Sweden, 1976, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp. 333-347, 1977.
30. J. K. Vrijling, “Design of Concrete Structures : Probability Design Method”, Cement, Vol. 34, No. 11, pp. 721-728, 1982.
31. A. Mol, H. Ligteringen, A. Paape, “Risk Analysis in Breakwater Design”, Proceedings, Conference on Breakwaters-Design Construction, London, May 4-6, 1983, Thomas Telford Ltd., London, pp. 81-86, also Delft Hydraulics Laboratory Publication No. 301, 1983.
32. C. S. Melching, H. G. Wenzel, and B. C. Yen, “Application of System Reliability Analysis to Flood Forecasting”, presented at the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis, May 14-17, Baton Rouge, Louisiana, 1986.