

상용 유한요소 프로그램에 기초한 댐 구조물의 신뢰성해석

Commercial Finite Element Program-based Reliability Analysis of Dam Structures

허 정 원* 이 정 학**
Huh, Jungwon Lee, Jeonghak

ABSTRACT

A hybrid structural reliability analysis method that integrates a commercial finite element program and a reliability analysis algorithm is proposed to estimate the safety of real structures in this paper. Since finite element method (FEM) is most commonly and widely used in the analysis and design practice of real structures, it appears to be necessary to use general FEM program in the structural reliability analysis. In this case, simple conventional reliability methods cannot be used because the limit state function can only be expressed in an algorithmic form. The response surface method(RSM)-based reliability algorithm with the first-order reliability method (FORM) found to be ideal in this respect and is used in this paper. The intention of use of RSM is to develop, albeit approximately, an explicit expression of the limit state function for real structures. The applicability of the proposed method to real structures is examined with help of the example in consideration of a concrete dam. Both the strength and serviceability limit states are considered in this example.

1. 서 론

최근 댐, 교량, 지하철, 항만시설 등과 같은 대형 산업기반시설물(infrastructures)의 안전에 대한 상당한 사회적 관심의 증대에 기인하여, 구조물 위험도의 정량적 평가에 대한 연구와 보다 안전하고 경제적인 구조물의 구현을 위한 성능에 기초한 구조물설계 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구조물의 위험성에 관한 정량적 평가는 구조신뢰성이란 용어로 정의되고, 이러한 구조신뢰성은 사실적인 구조물거동의 파악과 하중 및 저항력과 관련된 설계인자들의 불확실성을 고려하여야 한다. 또한 최근의 LFRD(Load & Resistance Factor Design; AISC, 2002) 등의 설계 시방서와 같이 불확실성 개념을 반영하는 것이 세계적인 추세이다. 따라서 댐과 같은 사회기반시설물의 해석과 설계에서 하중조건, 구조물의 기하학적 표현, 사용되는 재료특성, 구조물 거동(선형 또는 비선형) 그리고 경계 조건 등과 같은 구조적 요인들(structural parameters)을 사실적으로 표현하고, 그들이 포함하는 불확실성을 고려하는 것은 정밀한 해석과 안전하고 효율적 설계를 위한 필수적 조건이다. 성능에 기초한 구조물설계에 대한 사회적 관심의 증대는 구조물의 기능, 사용성 및 안전도에 대한 확률적 평가를 위한 실질적이고 효율적인 방법의 개발을 요구하며, 이를 위해서는 신뢰성평가 기법이 일상적인 구조해석 및 설계과정과 결합되는 것이 필요하다. 현재 유한요소법은 광범위한 역학적 현상(선형·비선형·비탄성 해석, 정·동적해석 등)에 대한 적용성, 높은 정확도 그리고 사용상의 편리성 등으로 인하여

* 정회원, 여수대학교 해양시스템공학전공 전임강사

** 대림산업주식회사 기술연구소 차장

일상적인 구조해석과 설계에서 가장 광범위하게 사용되고 있으므로, 유한요소법과 신뢰성기법의 통합으로 이루어지는 유한요소 신뢰성해석은 성능에 기초한 구조설계와 신뢰성해석을 위한 이상적인 방안이다. 하지만 이러한 상용 유한요소 프로그램을 사용한 구조신뢰성 해석은 한계상태함수가 명시적으로 표현되지 않기 때문에 기존의 방법과는 다른 새로운 기법의 도입이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 요구에 부응하는 유한요소 구조신뢰성 해석을 위하여 일반적인 상용 유한요소 프로그램(LUSAS, ABAQUS 등)과 신뢰성 해석기법을 역학적으로 결합한(mechanically coupled) 새로운 복합 알고리즘을 제안하였다. 여기서 신뢰성 해석기법은 유한요소법과 같은 알고리즘형태의 실제 한계상태함수를 입력 랜덤변수들로 표현되는 2차 다항식으로 근사하는 응답면기법(Response Surface Method: RSM)과 일차신뢰도법(First-Order Reliability Method: FORM)에 기초하여 개발되었다. 수치예제에서는 실구조물에 대한 적용성을 검증하기 위하여 실제 설계된 댐 구조물의 강도 및 사용성한계상태에 대한 구조 신뢰성해석을 수행하여 댐 구조물의 안전성을 검토하였다.

2. 확률론적 신뢰성 평가기법

구조물의 안전도(safety) 또는 위험도(risk)는 일반적으로 한계상태함수(limit state function)의 형태로 표현되는 미리 결정된 성능기준(performance criterion)에 대하여 평가해야 한다. 이러한 한계상태함수는 모든 하중의 영향과 저항력 관련된 매개변수들 상호간의 함수적 관계(functional relationship)를 의미하며, 명시적(explicit)인 형태로 표현되거나 또는 유한요소법과 같은 알고리즘의 형태로 암시적(implicitly)으로 표현된다. 대부분의 경우 구조물의 한계상태는 강도한계상태(strength limit state)와 사용성한계상태(serviceability limit state)로 대별할 수 있으며, 구조물의 안전도를 평가하기 위해서는 각각의 한계상태함수를 분리해서 고려해야 한다.

한계상태(limit state)는 설계변수의 공간에서 “안전”과 “파괴”의 경계[즉 $g(\mathbf{X}) = 0$]를 정의하며, 파괴확률은 다음 식 (1)로 표현되는 다차원 적분식(multidimensional integral equation)으로 정의 된다(Haldar and Mahadevan, 2000).

$$P_f = P\{g(\mathbf{X}) \leq 0\} = \int \cdots \int_{g(\mathbf{X}) < 0} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n \quad (1)$$

여기서, $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 기본 랜덤변수들 X_1, X_2, \dots, X_n 의 결합 확률밀도함수(joint probability density function)이며, 파괴영역 [즉, $g(\mathbf{X}) < 0$]에 대하여 적분을 수행한다. 신뢰성 해석의 궁극적 목표는 식 (1)의 다차원 적분을 수행하는 것이지만, 일반적으로 대부분의 실제적인 공학문제에서는 한계상태함수에 포함되는 기본 랜덤변수들의 결합 확률밀도함수를 정의할 수 없으며, 또한 랜덤변수의 수가 많아지면 식 (1)의 직접적인 다중적분을 통한 해석적 파괴확률의 계산은 거의 불가능하다. 이러한 실제적인 경우에 이용 가능한 신뢰성 해석기법은 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation: MCS)으로 대표되는 다양한 종류의 MCS기법으로 직접적으로 파괴확률을 산정하는 Level III 기법과 각 확률변수의 평균과 분산 그리고 분포형태를 이용하여 신뢰도지수(reliability index)를 근사적으로 산정하는 모멘트법이라고도 불리는 Level II 기법이 있다. 이러한 Level II 기법에는 MVFOSM(Mean Value First Order Second Moment method), Generalized Safety Index(Hasofer-Lind, 1974), FORM(First Order Reliability Method; Rackwitz-Fiessler, 1978; Chen-Lind, 1982), 그리고 SORM(Second Order Reliability Method) 등이 있다. 본 연구에서 적용하는 댐과 같은 실제 구조물의 신뢰성 해석문제에 있어서는 한계상태함수가 유한요소법과 같은 알고리즘 형태를 가지는 음(implicit)함수로 표현되는 경우가 대부분이며, 이 경우 Level III 기법인 다양한

MCS의 적용은 시뮬레이션과 동일한 회수의 확정적 유한요소해석을 수행함을 의미하며, 이것은 상당한 계산 시간(computing time)을 요구하며 복잡한 구조물의 비선형해석과 같은 경우에는 적용이 거의 불가능한 방법이다. 또한 Level II 기법의 각 방법들은 음함수의 한계상태함수를 가지는 경우 독립적으로 적용할 수 없다. 그러므로 본 논문에서 상용 유한요소해석 프로그램과 같은 알고리즘 형태의 음함수 한계상태함수를 가지는 실제적 문제에 음함수의 한계상태함수를 명시적으로 정식화하는 응답면기법과 FORM에 기초한 신뢰성기법과 상용 유한요소 프로그램이 역학적으로 결합된(mechanically coupled) 혼합 구조신뢰성 해석기법(hybrid structural reliability analysis method)을 제안한다.

3. 응답면기법 (Response Surface Method: RSM)

응답면기법은 입력변수(랜덤 설계변수)의 변동이나 불확정성을 고려하여 가장 적합한 응답을 구하기 위한 통계적 방법이다. 일반적으로 구조응답은 일련의 입력변수와 특정한 상관관계에 있는 음함수(FEM과 같은 알고리즘) 형태의 한계상태함수를 가지므로, 본 연구에서는 응답면기법을 사용하여 음함수형태의 한계상태함수를 입력변수들의 향으로 명확히 표시되는 2차 다항식의 양함수로 표현한다. 이렇게 확정적 구조해석(deterministic structural analysis) 결과를 이용하여 회귀분석 등의 방법으로 고려하고자하는 구조응답이나 한계상태함수를 랜덤변수의 함수로 명시적으로 근사하는 응답면기법의 정확도와 효율성은 아래에서 간략하게 설명되는 근사 다항식의 차수와 그에 대응하는 표본추출방법과 매우 밀접한 상관관계를 가진다.

실제의 한계상태함수 또는 구조응답의 근사를 위하여 응답면에 사용되어질 다항식의 차수는 응답의 예측되는 비선형성에 의해 좌우될 것이다. 본 연구에서는 실제 한계상태함수를 근사하기 위해 아래 식 (2)에 보이는 각 변수들의 교차항(cross terms)을 포함하지 않는 2차 다항식 또는 식 (3)에 주어진 교차항(cross terms)을 포함하는 완전 2차 다항식을 사용하여 응답면을 표현한다.

$$\hat{g}(X) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \quad (2)$$

$$\hat{g}(X) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

여기서, X_i ($i=1, 2, \dots, k$)는 i -번째 랜덤변수이며, b_0 , b_i , b_{ii} , 그리고 b_{ij} 는 회귀분석이나 일련의 연립방정식을 풀어 결정하는 미지계수다. 식 (2)와 (3)의 다항식에 요구되는 미지계수의 개수는 각각 $p=2k+1$ 과 $p=(k+1)(k+2)/2$ 이다. 응답면에 대한 최적의 2차 다항식을 얻기 위하여 다수의 특정 값에서 표본점(sampling points)을 추출하는 Design기법들 중 Saturated Design과 Central Composite Design이 각기 식 (2)와 (3)의 다항식에 잘 맞는 것으로 여러 연구에서 입증되었으므로(Huh and Haldar, 2001; Huh and Haldar, 2002) 본 연구에서 이용된다. 여기서 1개의 표본점은 1번의 확정적 유한요소해석을 의미한다. 신뢰성 해석에 대한 계산상의 효율성과 정확성을 고려하여 Huh and Haldar(2001)가 제안한 세 가지 모델 중 다음 두 가지 모델을 사용한다. 즉, 식 (2)의 2차 다항식과 Saturated Design을 이용한 모델 ①과 식 (3)의 완전 2차 다항식과 Central Composite Design을 이용한 모델 ②를 고려하는 랜덤변수의 개수에 따라 적용하며, 각 모델에 대한 세부적인 개념과 적용기준 및 장·단점을 아래에서 간략하게 설명한다.

모델 ①은 식 (2)의 교차항을 포함하지 않는 2차 다항식과 Saturated Design을 이용하므로, 추정하는 다항식의 미지계수의 수와 정확히 동일한 수만큼의 표본추출점을 필요로 한다. 결국 이 모델은 하나의 중심점(a center point)과 $2k$ 의 star point (코드화된 좌표에서 각 변수에 대하여 +1과 -1의 값에 각각 하나씩)로 구성

된다. 즉, 총 표본추출점 수는 다항식 (2)의 미지계수의 수와 같은 $N = p = 2k+1$ 이다. 이 모델은 다음에 설명되는 모델 ②와 비교하여 상대적으로 훨씬 적은 표본점을 필요로 하기 때문에 상당한 계산상의 효율성을 보장한다. 예를 들어 15개의 랜덤변수를 고려한다면 모델 ①은 단지 31개($2k+1=2 \times 15+1$)의 표본점을 필요로 하는 반면 모델 ②는 32799개($2^k+2k+1=2^{15}+2 \times 15+1$)의 표본점을 필요로 한다. 하지만 이 모델은 결과의 정확도 검증이 어려우며, 고려되는 랜덤변수의 수가 적을 경우 적은 수의 표본점을 사용하게 되므로 랜덤변수들 사이의 표본공간을 충분히 반영하지 못하여 부정확한 응답면을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고려하고자하는 랜덤변수가 9개 이상일 경우에 모델 ①을 사용한다.

모델 ②는 식 (3)의 교차항을 포함하는 완전 2차 다항식과 Central Composite Design을 이용한다. 따라서 이 모델은 ㉠ 하나의 중심점(a center point), ㉡ $2k$ 의 star points (코드화된 좌표에서 각 변수에 대하여 중심점으로부터 각각 $+ \alpha$ 와 $- \alpha$ 만큼 떨어진 위치에 하나씩) - 여기서 ($\alpha = 4\sqrt{2^k}$), 그리고 ㉢ 완전 2^k factorial design(코드화된 좌표에서 각 변수들의 값을 +1과 -1을 조합하여 2^k 개수만큼으로 구성)으로 구성된다. 즉, 모델 ②에 필요한 총 표본추출점 수는 다항식 (3)의 미지계수의 수, $p = (k+1)(k+2)/2$, 보다 많은 $N = 2^k + 2k + 1$ 이다. 모델 ①과 달리 모델 ②에서는 한계상태함수를 근사화한 식 (3)의 완전 2차 다항식에 b_0, b_i, b_{ii} , 그리고 b_{ij} 로 표현된 최소자승 산정계수(least squares estimates)를 회귀분석을 수행하여 구한다. 모델 ②는 모델 ①보다 많은 표본점을 포함하므로, 상대적으로 매우 정확하며 오차의 평가, 모델의 적합성 검증, rotatability, 및 orthogonality 등의 몇 가지 통계적 특성치를 이용할 수 있는 장점이 있다. 하지만 이 모델은 구조계가 크고 복잡하며 특히 고려하는 랜덤변수가 많을 경우에 상당히 계산상으로 비효율적이다. 따라서 모델 ②는 랜덤변수가 8개 이하인 경우에 사용한다.

4. 통합된 구조신뢰성 해석 알고리즘

본 연구에서 제안한 복합 구조신뢰성 해석기법은 일련의 입력 랜덤변수와 특정한 상관관계에 있는 음함수 (FEM과 같은 알고리즘) 형태의 실제 한계상태함수를 먼저 응답면기법을 사용하여 입력 랜덤변수들로 표현되는 2차의 다항식으로 근사화한 후, FORM을 적용하여 대상 구조물의 신뢰성 해석을 수행하고 안전성과 위험성을 평가하는 매우 효율적이고 정확한 기법이다. 또한 응답면기법은 구조해석과정을 블랙박스로 유지하고 단지 주어진 입력 값에 대한 응답만을 사용하여 한계상태함수의 근사식을 얻을 수 있으므로 유한요소 프로그램의 이용이 가능한 모든 구조물과 다양한 파괴형태에 적용이 가능하다는 장점이 있다. 응답면기법의 적용은 먼저 랜덤변수의 개수에 따라 이미 효율성과 정확도가 고려된 두 가지 모델 중의 하나를 선택한다. 그런 다음 선택한 모델에서 적용하는 특정 표본추출기법을 이용하여 랜덤변수들의 평균값에서 표본을 sampling한 후 각각의 표본점에 대하여 확정적 유한요소해석을 수행한다. 여기서 하나의 표본점은 한번의 확정적 유한요소해석을 위한 입력

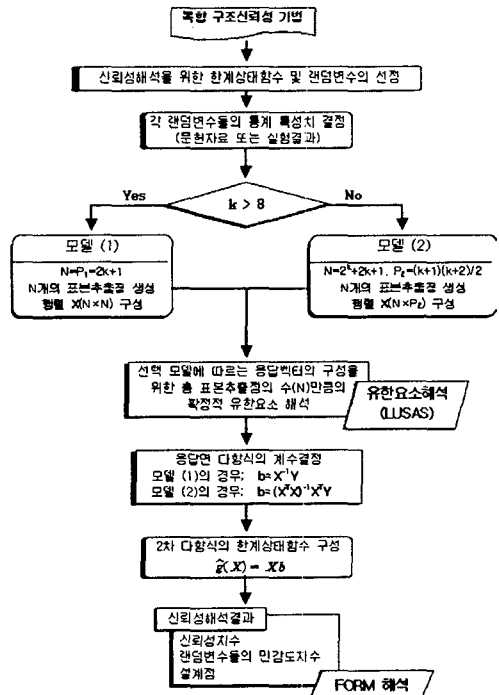


그림 1. 복합 구조신뢰성 해석기법 흐름도

랜덤변수들의 값을 나타내는 벡터이다. 모든 표본점에 대한 확정적 유한요소해석의 결과를 회귀분석 또는 연립방정식을 해를 구함으로써 실제의 한계상태함수가 입력 랜덤변수들의 향으로 표현되는 근사된 2차 다항식을 얻는다. 최종적으로 근사된 2차 다항식에 FORM을 적용하여 신뢰성지수(Reliability Index), 파괴확률(Probability of Failure), 각 랜덤변수의 파괴확률에 대한 기여도의 정량적 값인 민감도 지수(Sensitivity Index), 그리고 설계점(design point or checking point)을 구하는 신뢰성해석을 수행하여, 대상 구조물의 안전성과 위험성을 평가한다. 이상에서 설명한 복합 구조신뢰성 해석기법의 과정을 그림 1의 흐름도(flowchart)에 도식화하였다.

5. 수치해석 예제 (댐 구조체의 신뢰성해석)

수치예제에서는 제안된 복합 구조신뢰성 해석기법의 실제 구조물에 대한 적용성의 검증을 위하여 그림 2에 보이는 기본설계를 통하여 실제 설계된 댐 구조물의 단면을 고려한다. 신뢰성해석을 위한 강도 및 사용성 한계상태함수를 규정하기 위하여, 각종 설계변수의 평균값을 확정치로 사용한 확정적 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 이미 그 성능이 검증된 상용 유한요소프로그램 LUSAS(2002)를 사용하여, 그림 3에 보이는 2차원 평면요소로 댐 구조체와 암반층을 분리 모델링한 후 평면변형률 해석(Plane-strain Analysis)으로 수행하였다. 확정적 유한요소해석 결과로부터 최대응력이 발생하는 곳은 댐 외부의 우측 하단부이며 또한 수직방향에 비하여 상대적으로 수평방향의 변위가 크게 발생하는 것으로 판명되었다. 그래서 댐 외부(최대응력이 발생하는 댐 우측의 하단부)에서 콘크리트의 강도(압축응력)한계상태에 대한 신뢰성해석과 댐 구조체의 수평방향의 사용성한계상태함수에 대한 신뢰성해석을 아래와 같이 고려한다.

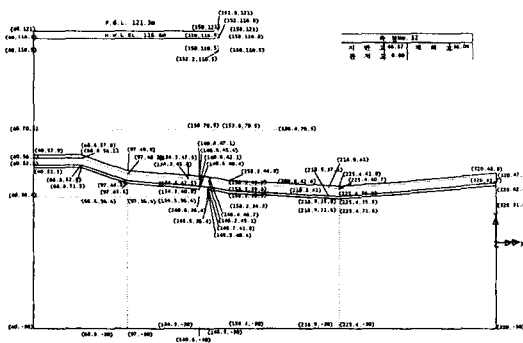


그림 2. 해석대상 단면

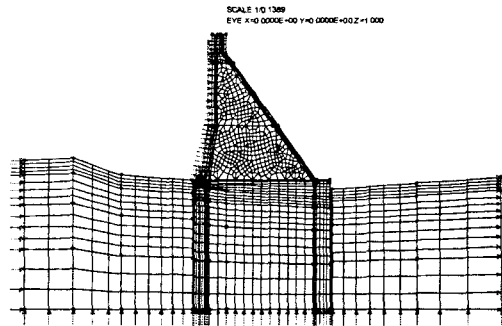


그림 3. 유한요소 모델링

먼저 콘크리트 댐 구조체의 강도파괴(strength failure)에 대한 안전성검토를 위하여 콘크리트 구조체에 발생하는 최대압축응력에 대한 극한강도 한계상태함수를 고려하였다. 즉, 댐 구조체의 임의 요소에서 발생하는 최대의 압축응력이 콘크리트의 설계기준 압축응력을 초과하는 상태를 파괴라고 규정하면 고려하는 극한강도 한계상태함수는 식 (4)로 표현된다.

$$g(X, y) = \sigma_{ck} - \sigma(y) \quad (4)$$

여기서 σ_{ck} 는 댐 내부와 외부 구조체의 콘크리트에 대한 설계압축강도로서 랜덤변수이며 그 통계적 특성치는 표 1에 제시되었다. 또한 $\sigma(y)$ 는 각 표본추출점에 대하여 LUSAS의 확정적 유한요소해석을 통하여 얻

여기는 최대 압축응력 값이다.

다음에는 콘크리트 댐 구조체의 사용성 검토를 위하여 최대 허용변위에 대한 한계상태합수를 고려한다. 즉, 댐 구조체의 임의 위치에서 발생하는 최대의 수평변위가 시방서 및 설계기준 등에 정해진 허용 변위량을 초과하는 상태를 사용성에 대한 파괴라고 규정하면 고려하는 사용성 한계상태합수는 아래의 식 (5)로 표현된다.

$$g(\mathbf{X}) = \delta_{allow} - \delta(\mathbf{X}) \quad (5)$$

여기서 δ_{allow} 는 수평방향의 최대 허용 변위량을 나타내는 확정적 값으로 그 기준이 명확하지 않아, 본 연구에서는 수평방향에 대하여 2cm로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한 $\delta(\mathbf{X})$ 는 각 표본추출점에 대하여 LUSAS의 확정적 유한요소해석을 통하여 얻어지는 수평방향의 발생 최대변위 값이다.

초기해석의 민감도지수(γ)와 참고문헌(Pham, 1985; Nikolaidis and Kaplan, 1991; Kuschel and Rackwitz, 2000)에 기초하여, 강도 및 사용성한계상태에 대한 신뢰성해석을 위하여 각기 9개와 7개의 랜덤변수를 선택하였다. 고려한 랜덤변수들의 평균값, 변동계수, 그리고 분포형태와 같은 통계적 특성치들은 실험결과와 다양한 참고문헌(Pham, 1985; Nikolaidis and Kaplan, 1991; Kuschel and Rackwitz, 2000)을 기초로 하여 선택되었으며 아래 표 1에 주어져 있다.

표 1 한계상태별 랜덤변수의 통계적 특성

분류	랜덤변수 (SI 단위)	평균값	강도한계상태			사용성한계상태			
			변수	변동계수	분포형태	변수	변동계수	분포형태	
댐	공통	단위중량, γ_c (tonf/m ³)	2.35	X_1	0.10	N	X_1	0.10	N
		프와송비, ν_c	0.18	X_2	0.06	N	X_2	0.06	N
	내부	탄성계수, E_c^{inner} (tonf/m ²)	1643200	X_3	0.06	LN	X_3	0.06	LN
		설계압축강도, σ_{ck}^{inner} (tonf/m ²)	1200	X_4	0.18	N	-	-	-
	외부	탄성계수, E_c^{outer} (tonf/m ²)	2012500	X_5	0.06	LN	X_4	0.06	LN
		설계압축강도, σ_{ck}^{outer} (tonf/m ²)	1800	X_6	0.18	N	-	-	-
지반	경암	탄성계수, E_{rock} (tonf/m ²)	1000000	X_7	0.15	LN	X_5	0.15	LN
		프와송비, ν_{rock}	0.45	X_8	0.06	N	X_6	0.06	N
하중 (수압)	정수압계수, C_{HS}	1	X_9	0.15	Type I	X_7	0.15	Type I	

여기서 N은 Normal, LN은 Log-Normal 분포

본 연구에서 제안한 복합 구조신뢰성 해석기법을 사용하여 강도한계상태와 사용성한계상태에 대하여 신뢰성해석을 수행하였다. 강도와 사용성한계상태에서 고려한 랜덤변수는 각기 9개와 7이므로 3절에서 제안한 모델 ①과 ②를 적용하고, 그에 대한 결과를 표 2, 표 3, 그림 4 그리고 그림 5에 정리하였다. 댐 구조물에서 최대 압축응력이 발생하는 요소(즉, 최소의 신뢰성지수 또는 최대의 파괴확률을 가지는 요소)에서 강도한계상태와 최대 수평변위가 발생하는 절점(즉, 최소의 신뢰성지수 또는 최대의 파괴확률을 가지는 절점)에서 사용성한계상태에 대한 신뢰성해석 결과를 신뢰성지수와 그에 대응하는 파괴확률로 표 2에 표시하였으며, 각 한계상태에 대한 랜덤변수의 민감도지수를 표 3에 제시하였다. 또한 그림 4와 5에 댐 구조체의 강도한계상태와 사용성한계상태에 대한 신뢰성지수 등치선도(等值線圖) (reliability index contour)를 표시하였다.

댐 구조체의 강도한계상태에 대한 극한요소에서의 최소 신뢰성지수는 4.745로 계산되었으며, 약 1.0438×10^{-6} 의 파괴확률을 의미한다. 이 수치는 일반적인 구조물의 설계 목표신뢰성지수 3.0을 훨씬 상회하는 값으로서

강도한계상태에 대한 댐 구조체의 안전도가 충분히 확보되었음을 알 수 있다. 최대 압축응력이 발생하는 극한요소에 대하여 고려한 랜덤변수들의 민감도지수를 살펴보면 댐 외부의 콘크리트 설계압축강도가 가장 중요한 인자로 판별되었다. 따라서 시공시 댐의 콘크리트 품질에 대한 엄격한 관리를 통하여 계획된 설계압축강도를 확보하는 것은 매우 중요하다. 또한 댐 구조체가 받는 정수압도 중요한 영향인자로 판명되었다. 사용성한계상태에 대한 극한절점에서의 최소 신뢰성지수는 3.033으로 약 1.2107×10^{-3} 의 파괴확률을 의미하며 상대적으로 강도한계상태보다 낮은 안전도를 나타낸다. 이는 본 예제에서 사용한 최대 횡방향 허용변위량인 2cm가 댐 구조물 전체치수에 비하여 매우 안전측(conservative)으로 가정되었기 때문인 것으로 판단된다. 랜덤변수들 중 정수압계수가 횡방향변위에 대한 사용성한계상태에 가장 민감하며 위험도를 결정하는 중요하고 지배적인 인자임을 알 수 있다.

표 3 한계상태별 랜덤변수의 민감도지수

분류	랜덤변수		민감도지수 (γ)				
			강도한계상태		사용성한계상태		
댐 콘크리트	공동	단위중량	γ_c	X_1	+0.01611	X_1	-0.11818
		프와송비	ν_c	X_2	+0.00615	X_2	+0.00294
		탄성계수	E_c^{inner}	X_3	+0.00117	X_3	-0.03413
	외부	설계 압축강도	σ_{ck}^{inner}	X_4	0.00000	-	-
		탄성계수	E_c^{outer}	X_5	-0.01285	X_4	-0.01699
		설계 압축강도	σ_{ck}^{outer}	X_6	-0.99343	-	-
지반	경암	탄성계수	E_{rock}	X_7	-0.03507	X_5	-0.08631
		프와송비	ν_{rock}	X_8	-0.03589	X_6	-0.04194
하중 (수압)	정수압계수	C_{HS}	X_9	+0.10053	X_7	+0.98761	

표 2 신뢰성해석결과

	강도 한계상태	사용성 한계상태
랜덤변수 의 개수	9개	7개
사용모델	모델 ①	모델 ②
위치	최대 압축응력 발생 요소	최대 수평변위 발생 절점
신뢰성지 수 (β)	4.745	3.033
파괴확률 (P_f)	1.0438×10^{-6}	1.2107×10^{-3}

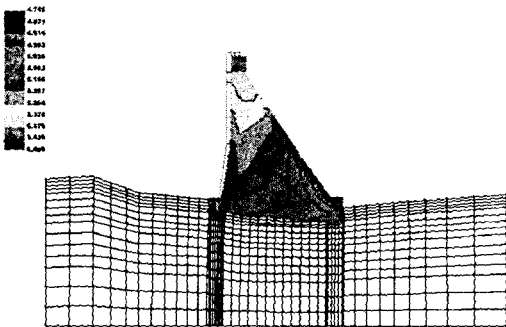


그림 4. 신뢰성지수 Contour (강도한계상태)

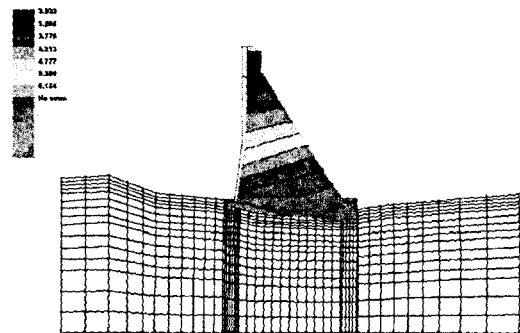


그림 5. 신뢰성지수 Contour (사용성한계상태)

6. 결론

본 논문에서는 상용 유한요소 프로그램과 신뢰성해석을 결합하여 실제 구조물의 신뢰성해석을 수행하여 구조물의 안전성을 평가할 수 있는 복합 구조신뢰성해석 기법을 제안하였다. 현재 일상적인 실무 구조해석과 설계에 이용되는 여러 상용 유한요소 프로그램을 사용한 구조신뢰성 해석은 한계상태함수가 명시적으로 표현되지 않기 때문에 기존의 방법과는 다른 새로운 기법의 도입이 요구된다. 따라서 제안된 복합 알고리즘은 일

런의 입력 랜덤변수와 특정한 상관관계에 있는 유한요소법과 같은 알고리즘형태의 실제 한계상태합수를 응답면기법을 사용하여 입력 랜덤변수들로 표현되는 2차 다항식으로 근사한 후 일차신뢰도법을 이용하여 대상 구조물의 신뢰성해석을 수행하고 안전성과 위험성을 평가할 수 있는 매우 효율적이고 정확한 기법이다. 수치예제에서는 제안 기법의 실구조물에 대한 적용성 검증을 위하여 실제 설계된 댐 구조물의 강도 및 사용성한계상태에 대한 신뢰성해석을 수행함으로써 댐 구조물에 대한 파괴확률을 산정하고 안전성 검토를 수행하였다. 그 결과 고려한 댐 구조물의 강도 및 사용성한계상태에 대한 신뢰성지수는 각기 4.745와 3.033으로 댐 구조체의 안전성이 충분히 보장된다는 정량적 판단근거를 제시하였다. 또한 신뢰성지수와 설계변수들의 민감도지수 및 설계검증점(design checking point) 등의 결과들을 토대로 댐 구조물의 성능에 기초한 설계(performance based design)를 구현하는 것이 가능하다. 그러므로 본 논문에서 제안된 복합 구조신뢰성해석 기법은 다양한 실제 구조물의 신뢰성에 기초한 설계와 해석에 적용이 가능한 효율적이며 실용적인 구조신뢰성해석기법이다.

참고문헌

1. American Institute of Steel Construction, *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design*, AISC, Chicago, Illinois, U.S.A., 2002
2. Chen, X. and Lind, N. C., *A New Method of Fast Probability Integration*, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada. Paper No.171, 1982, June
3. Haldar, A. & Mahadevan, S., *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York, NY., 2000
4. Hasofer, A. M. and Lind, N. C., "Exact and Invariant Second Moment code Format", *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, 100(EM1), 1974, pp.111~121
5. Huh, J. & Haldar, A., "Stochastic Finite-Element-Based Seismic Risk of Nonlinear Structures", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.127, No.3, 2001, pp.323~329
6. Huh, J. & Haldar, A., "Seismic reliability on non-linear frames with PR connections using systematic RSM", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.17, No.2, 2002, pp.177~190
7. Kuschel, N. and Rackwitz, R., "Optimal design under time-variant reliability constraints", *Structural Safety*, 22, 2000, pp.113~127
8. *LUSAS Finite Element Analysis System User manual - Version 13.4*, FEA Ltd., 2002
9. Nikolaidis, E. and Kaplan, P., *Uncertainties in Stress Analysis in Marine Structures*, SSC-363, U.S. Coast Guard (available from NTIS), 1991
10. Pham, L., "Reliability analyses of reinforced concrete and composite column sections under concentric loads", *Civil Engineering Transactions, IEAust*, CE27(1), 1985, pp.68~72
11. Rackwitz, R. and Fiessler, B., "Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences", *Journal of Computers and Structures*, 9, 1978, pp.489~494