

# 체계신뢰성 평가와 비교한 응답면기법에 의한 교량시스템의 위험성평가

## Risk Assessment for a Bridge System

### Based upon Response Surface Method Compared with System Reliability

조 태 준\* · 문 제 우\*\* 김 종 태\*\*\*

Cho, Taejun · Moon Jae-Woo · Kim, Jong-Tae

---

#### ABSTRACT

Probabilistic Risk Assessment considering statistically random variables is performed for the preliminary design of a Arch Bridge. Component reliabilities of girders have been evaluated using the response surfaces of the design variables at the selected critical sections based on the maximum shear and negative moment locations. Response Surface Method (RSM) is successfully applied for reliability analyses for this relatively small probability of failure of the complex structure, which is hard to be obtained by Monte-Carlo Simulations or by First Order Second Moment Method that can not easily calculate the derivative terms of implicit limit state functions. For the analysis of system reliability, parallel resistance system composed of girders is changed into parallel series connection system. The upper and lower probabilities of failure for the structural system have been evaluated and compared with the suggested prediction method for the combination of failure modes. The suggested prediction method for the combination of failure modes reveals the unexpected combinations of element failures in significantly reduced time and efforts compared with the previous permutation method or system reliability analysis method.

**Keywords:** Arch Bridge, Risk Assessment, System Reliability, Response Surface Method

---

#### 1. 서 론

건설공사는 공사종류별로 다른 공정과 관리계획 때문에 공사 중 위험성평가와 대책수립에 어려움이 많다. 우리나라처럼 구조물의 규모와 기능이 준공시마다 새로운 기록을 수립하는 특이한 경우에는 시공경험 및 기존자료의 부족 때문에 전문가의 지식과 판단에 의존해야 하므로, 계획 및 설계단계에서 이를 정량화하여 위험성을 평가하고 안전관리계획을 수립해야 할 필요성이 더욱 크다. 과거 1970년대에 핵발전소의 위험도 분석을 위해서 도입한 파괴모드 결과분석법 (Failure Mode and Effect Analysis), 위험조정법(Hazard Operability Method), 사건수 분석법(Event Tree Analysis) 등의 여러 방법들이 위험도평가를 위하여 사용되어 왔다. 그 중에서도 귀납적 분석방법 중의 하나인 사건수분석법이 가장 대표적인 위험도분석기법으로 사용되어 왔다<sup>1)</sup>. 설계단계에서는 설계하중 및 지향에 관련된 기하학적 또는 재료학적 변수의 확률 분포를 합리적으로 가정 또는 확보할 수 있으므로 통계학적 파괴확률의 평가가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 아치교량의 건설에

---

\* 한국철도시설공단 KR기술연구소 책임연구원 Email: cho\_taejun@hanmail.net

\*\* 한국철도시설공단 KR기술연구소 시설연구파트장 Email: ktx2000@empal.com

\*\*\* 한국철도시설공단 KR기술연구소 연구소장 Email: jt3404@hanmail.net

서 발생 가능한 사건 중 설계, 재료, 시공 상의 오류가 있을 경우, 시스템의 붕괴를 유발할 수 있는 중요한 사건들에 대해서 최종 설계단계의 무작위 변수들을 이용하여 정량적인 위험도 평가에 관한 연구를 수행하고, 응답면기법 (Response Surface Method, 이성로와 배용귀, 2004; Box, G.E.P., and Wilson, 1951)에 의한 시스템신뢰성 해석을 통하여 시공 전에 발생 가능한 위험도를 파악하고 손실을 최소화할 수 있는 방법을 연구하고자 한다.

## 2. 구조물의 신뢰성평가

### 2.1. 구조신뢰성 평가

구조신뢰성은 크게 요소신뢰성(Component Reliability)과 체계신뢰성(System Reliability)의 두 가지로 분류될 수 있다. 요소신뢰성해석에서는 한계상태함수의 형태나 확률변수의 특성 등에 따라 정식화기법, 해석방법 등이 다양하게 적용된다. 한계상태함수가 음함수(Implicit Function)인 경우 이를 정식화하는 방법에는 응답면기법과 확률유한요소법 (Probabilistic Finite Element Method) 등이 사용될 수 있다. 이와 같이 정식화된 한계상태함수의 파손확률을 해석하는 방법으로는 근사해석법으로서 제 1계 2차모멘트방법인 FOSM방법 그리고 Monte-Carlo Simulation 기법 등이 있다. 구조물 시스템은부재간의 연결을 독립관계로 가정한다면 가장 약한 부재의 파손으로 시스템의 붕괴를 일으키는 직렬연결구조와 가장 강한 부재의 파손으로 시스템의 붕괴를 일으키는 병렬저항 연결구조로 분류할 수 있다. 병렬연결구조는 연성재료와 취성재료 사이에 상이한 저항 구조를 갖는다 (Nowak A. S., Collins K. R., 2000). 또한 각 연결구조는 요소간의 상관관계에 따라서 완전 비상관 관계(독립관계), 완전상관관계 또는 그 중간관계를 갖게 된다.

### 2.2. 응답면 분석기법에 의한 요소신뢰성평가

Leve II의 모멘트법은 구조물의 안전성을 평가하기 위한 한계상태식이 확률변수들의 양함수(Explicit Function) 형태로 정의될 때 사용이 가능한 반면, 확률유한요소법이나 응답면기법은 구조물 응답의 변동특성을 파악하거나 음함수적인 한계상태식에 대한 파괴확률을 산정하는데 유용하게 이용될 수 있다. 이 기법은 근사화의 정확도, 근사화를 위해 필요한 구조해석의 횟수, 그리고 구조해석을 수행하여야 할 표본점의 선정이 중요하며, 표본점의 선정은 각 확률변수의 중심점을 정하여 그 주변으로 일정거리만큼 떨어져 있는 점을 취하는 방법 등이 제안되었다. 응답면 기법 중 중심합성계획법(Central Composite Design)은 응답면을 연성항(Cross-coupled Term)이 포함된 2차 다항식으로 표현함으로써 회귀방정식이 직교성, 회전성, 정도의 균일성이라는 통계적 성질을 갖도록 하는 방법이며, Bucher-Bourgund (1987)법은 연성항이 없는 이차 다항식으로 근사식을 표현하여 표본점의 수를 줄일 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 Bucher-Bourgund법을 이용하여 중심점(무작위 변량의 평균값)과 중심점에서 표준편차 만큼 떨어진 3개의 축점을 선정하여 응답함수를 구성하였다.

## 3. 응답면 기법에 의한 신뢰성평가

### 3.1. 응답면기법에 의한 아치교량의 위험도 평가

#### 3.1.1 대상아치교

본 연구에서 적용 예로 사용된 교량은 기본설계가 완료된 실 교량으로 왕복2차선의 교폭 14.3 m, 전체길이 360m 의 강재 아치교로 극한 한계상태에 대한 저항을 검토하도록 설계되었다. 각 하중조합에서의 부재력을 구하기 위하여 총 절점 1494 개, 총 요소 1570개의 프레임 요소로 유한요소해석모델을 구성하였다. 강재 아치교의 위험도평가를 위하여 Table 1과 같이 유한요소 응력해석결과로부터 요소파괴가 가능한 위험단면을 결정하였다.

표 1 Observed points with failure modes of the target bridge

검토위치	파괴사건	단면제원
P1, P2	거더의 휨파괴	
P3, P4	거더의 전단파괴	
P5, P6	아치리브의 좌굴과 휨파괴	

### 3.1.2 신뢰성 분석시 사용되는 무작위 변량과 확률분포

신뢰성에 기초하여 각 붕괴시나리오의 발생확률을 평가하기 위해서는 선행적으로 각 확률 변수의 표준편차나 C.O.V(Covariance of Variation)와 같은 불확실값의 정보가 필요하다. 이러한 불확실값의 결정은 공학적인 관점에서 붕괴 시나리오의 신뢰성을 평가하는데 없어서는 안되는 구성요소이다. 정확한 신뢰성 해석을 위해서 확률분포 불확실값의 추정은 합리적으로 이루어져야 하며 그러기 위해서는 통상 실험이나 시뮬레이션에 의한 방법이 사용되고 있다. 표 2는 아치교의 위험도를 평가하는데 사용되는 무작위 변량의 확률분포 특성값을 나타낸다.

표 2 대상교량의 신뢰성평가를 위한 확률변수의 통계적 특성값

확률변수			평균비	C.O.V	확률분포	참고문헌
아치 리브	저항모멘트	$M_R$	1.12	0.135	Log normal	Tabsh-Nowak [1994] <sup>3)</sup>
	외력모멘트	$M_S$	1.05	0.100	Log normal	Nowak [1999] <sup>4)</sup>
거더	강재의 탄성계수	$E_S$	1.00	0.060	log normal	Tabsh-Nowak [1994] <sup>3)</sup>
	저항모멘트	$M_R$	1.08	0.12	Log normal	Tabsh-Nowak [1994] <sup>3)</sup>
	저항 전단력	$S_R$	1.08	0.12	Log normal	Nowak [1999] <sup>4)</sup>
	외력 휨 모멘트	$M_S$	1.05	0.100	Normal	Nowak [1999] <sup>4)</sup>
	외력 전단력	$M_S$	1.05	0.100	Normal	Nowak [1999] <sup>4)</sup>
		$S_S$				

## 3.2. 구조시스템 신뢰성평가

### 3.2.1 시스템 구성

대상 아치교에서 거더와 거더는 직렬저항시스템으로 구성되고 거더와 아치의 연결은 병렬저항시스템으로 모델링할 수 있다. 식 (1)의 하한계 파괴확률과 같이 완전상관관계로 구성된 병렬연결을 적용하면 보수적인 평가로써, 병렬저항구조에서 상대적으로 작은 파괴확률을 보여주는 거더를 고려하지 않으면 보다 빠른 시간에 시스템의 파괴확률을 구할 수 있다. 구조해석결과에서 하중경우별 응답값을 확인한 후 검토가 필요한 하중을 결정하였다. 본 신뢰성분석에서 적용한 저항시스템의 구성을 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다. 이 경우 입력 확률변수는 통계학적 독립변수로 가정하며 요소간의 상관계수는 0으로 가정하였다.

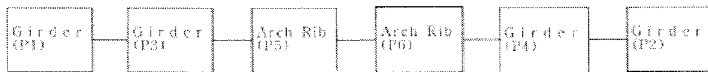


그림 1 거더와 아치리브를 직렬연결로 모델링한 시스템모델

중요한 파괴모드 시나리오는 요소의 파괴확률을 고려하여 다음과 같이 선정된 경우에 대하여 아치교의 시스템 신뢰성 분석을 수행하였다.

- 가. Criterion A : 아치리브 2곳과 거더의 결합에 의한 것 중 파괴확률이 높은 것
- 나. Criterion B : 아치리브 1곳과 거더의 결합에 의한 것 중 파괴확률이 높은 것
- 다. Criterion C : 부모멘트 2개소 중 1개소의 파괴확률이 높은 것

파괴확률의 계산은 통계적 독립관계의 요소들로 가정한 상한계 파괴확률과 완전상관관계의 요소들로 가정한: 하한계에 의해서 파괴확률의 상하한계 구간설정이 다음과 같이 결정된다.3)

$$\max_i \{P[F_i = 1]\} \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P[F_i = 1]) \quad (1)$$

붕괴모드 시나리오에서 구성된 세가지 붕괴모드들에서 최대 파괴확률과 두 번째로 위험한 붕괴모드조합은 표 1과 같이, 각각 정모멘트 휨파괴 및 전단 위험단면 병렬연결구조와 아치리브 위험단면의 병렬연결구조로 평가되었다. 신뢰성 해석을 적용한 교량의 확률적 위험도 분석결과는 아치리브 및 거더의 요소 및 구조시스템 별 신뢰성지수가 4이상(안전성=100-파괴확률0.00317%= 99.9%)으로 충분한 안전도를 확보함을 알 수 있다.

표 3 . 가정된 파괴모드에 대한 시스템파괴에 대한 신뢰성 지수 및 파괴확률

구분	신뢰성지수	파괴확률
거더요소의 위험도분석	$5.582 \leq \beta_{sys} \leq 6.676$	$9.68E-12 \leq P_f)_{sys} \leq 1.23E-11$
아치리브의 위험도분석	$6.458 \leq \beta_{sys} \leq 6.459$	$5.305E-11 \leq P_f)_{sys} \leq 5.310E-11$

### 3.2.2 시스템 붕괴모드조합

체계신뢰성평가를 통해서 전체구조물의 파괴확률을 정의할 수 있지만 붕괴모드의 조합이나 순서 등은 알 수가 없다. 그러므로 중요한 구조요소의 파괴를 독립적사건으로 취급하고 연쇄적 또는 동시 발생가능한 조건부 파괴확률을 구해서 체계신뢰성이 제시할 수 없는 붕괴모드를 예측하고 시스템의 붕괴를 일으키는 요소파괴의 조합을 얻을 수 있다.

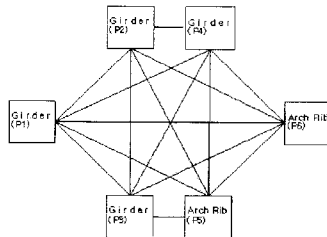


그림 2. 거더와 아치리브의 요소파괴의 조합에 의한 시스템의 붕괴모드조합모델

붕괴모드를 정확히 아는 경우에 소성힌지의 생성과 모멘트재분배등을 통한 파괴의 해석은 보다 정확한 예측을 가능하게 할 것이다. 사건수분석도에서는 순서가 정해지는 경우이므로 순열(Permutation)로 경우의 수가 정해진다. 또한 붕괴의 순서는 활하중, 풍하중, 환경하중과 구조재료의 변동성을 고려하면 파괴확률이 큰 위치에서 시작하지 않을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 조합(Combination)에 의한 붕괴모드 예측을 통해서 독립된 파괴사건이 순서에 무관하게 조합하여 조건적으로 발생하는 모든 경우를 고려하였다. 각각의 요소 파괴가 진행된다면 전체 교량시스템의 파괴를 불러올 것이다. 요소파괴의 사건의 모든 경우를 조합해보면 총 조합의 수는 그림2, 표 4와 같이 63 가지 경우가 발생가능하다.

표 4. 요소별 붕괴모드조합의 시스템 파괴확률의 상하한계

Index	과피시나리오						시나리오의 발생확률	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	$P_{Tmax}$	$P_{Tmax}$
1	1	0	0	0	0	0	1.19E-08	1.19E-08
2	0	1	0	0	0	0	2.62E-12	2.62E-12
3	0	0	1	0	0	0	1.03E-24	1.03E-24
4	0	0	0	1	0	0	1.03E-24	1.03E-24
5	0	0	0	0	1	0	5.30E-11	5.30E-11
6	0	0	0	0	0	1	1.03E-14	1.03E-14
7	1	1	0	0	0	0	3.11E-20	1.19E-08
8	1	0	1	0	0	0	1.23E-32	1.19E-08
9	1	0	0	1	0	0	1.23E-32	1.19E-08
10	1	0	0	0	1	0	6.31E-19	1.19E-08
11	1	0	0	0	0	1	1.23E-22	1.19E-08
12	0	1	1	0	0	0	2.70E-36	2.62E-12
13	0	1	0	1	0	0	2.70E-36	2.62E-12
14	0	1	0	0	1	0	1.39E-22	5.30E-11
15	0	1	0	0	0	1	2.70E-26	2.62E-12
16	0	0	1	1	0	0	1.07E-48	1.03E-24
17	0	0	1	0	1	0	5.48E-38	5.30E-11
18	0	0	1	0	0	1	1.07E-38	1.03E-14
19	0	0	0	1	1	0	5.48E-35	5.30E-11
20	0	0	0	1	0	1	1.07E-38	1.03E-14
21	0	0	0	0	1	1	5.48E-25	5.30E-11
22	1	1	1	0	0	0	3.21E-41	1.19E-08
정확								
60	1	1	0	1	1	1	1.79E-08	1.19E-08
61	1	0	1	1	1	1	6.94E-81	1.19E-08
62	0	1	1	1	1	1	1.53E-84	5.30E-11
63	1	1	1	1	1	1	1.82E-92	1.19E-08

\* 1: 해당 요소의 파괴사건이 발생하는 경우 \*\* 0: 해당 요소의 파괴사건이 발생하지 않는 경우

위에서 검토된 붕괴모드 조합에 의한 요소간 완전상관관계를 고려한 상한계 파괴확률과 완전독립상관관계를 고려한 하한계 파괴확률을 이용하여, 두 개요소의 파괴에 의해서 교량시스템이 붕괴한다고 가정하고 체계신뢰성과 붕괴모드조합의 경우를 비교하면 다음 표5와 같다.

표 5. 체계신뢰성과 요소별 붕괴모드조합의 시스템 파괴확률의 상하한계비교

	1.07E-48	1.00E-39	1.01E-09	1.41E-10	6.41E-12	1.39E-22	1.00E-12	3.44E-20	5.44E-23	1.03E-14	1.00E-38		
System A													
System B													
Mode 8	1.19E-08		1.63E-11		6.41E-12							1.23E-32	
Mode 9	1.19E-08		5.31E-11									1.23E-32	
Mode 10	1.19E-08					1.03E-19							
Mode 11	1.19E-08						1.03E-24						
Mode 12						2.42E-12		1.03E-21					1.79E-34
Mode 13						2.42E-12							1.79E-34
Mode 14					3.30E-11			1.39E-22					
Mode 15						1.42E-22				2.70E-24			
Mode 16									1.53E-24				1.07E-48
Mode 17						3.30E-11					1.48E-33		
Mode 18							1.82E-14						1.07E-38
Mode 19					3.30E-11						1.48E-33		
Mode 20						3.30E-11							1.07E-38
Mode 21									1.48E-33				

거더요소의 휨 요소파괴 또는 전단 요소파괴의 붕괴모드조합 (붕괴모드 7-20)에서 최소 파괴확률값은 붕괴모드조합 16번으로 1.07x10<sup>-48</sup>으로 체계신뢰성에서 계산된 9.68x10<sup>-12</sup>보다 완전독립사건으로써 가정되었으므로 안전한 값을 보여주지만 이때 최대 가능 파괴확률값은 완전상관관계로 가정된 1.19x10<sup>-8</sup>으로 체계신뢰성에서 계산된 1.23x10<sup>-11</sup>보다 큰 값을 보여주어 체계신뢰성에서 가정된 붕괴모드의 경우보다 위험한 파괴의 조합이 가능함을 보여준다.

아치리브와의 파괴조합(붕괴모드 10, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21)에서도 최소 파괴확률값은 붕괴모드조합 20번으로 1.07x10<sup>-38</sup>으로 체계신뢰성에서 계산된 5.30x10<sup>-11</sup> 보다 완전독립사건으로써 안전한 값을 보여주지만 이때의 최대로 가능한 파괴확률값은 완전상관관계로 가정된 1.19x10<sup>-8</sup>로 체계신뢰성에서 계산된 5.31x10<sup>-11</sup>보다 큰 값을 보여주어서 체계신뢰성에서 가정된

붕괴모드의 경우보다 위험한 파괴의 조합이 가능함을 보여준다.

이러한 붕괴시나리오의 발생확률은 체계신뢰성 평가의 경우, 완전비상관(독립) 사건으로 가정된 두 사건 (거더의 휨 또는 전단파괴)의 경우 외에 두가지 사건의 동시발생하여 교량시스템이 붕괴할 수도 있음을 알 수 있다. 파괴모드 조합에 의해서 찾아진 파괴모드들은 체계신뢰성 해석에서 고려되지 않았던 조합을 포함함으로써, 체계신뢰성에서 검토된, 직병렬연결로 가정된 모델의 파괴 형태와는 다르다. 그러나 예를 들면 제조회사별 재료의 (제조일자, 재료의 원료, 제작상태 등) 특성치 등 요소들의 상관관계에 의해서 동시발생 (완전상관)이 가능한 파괴모드의 조합이 될 수 있다고 판단된다.

### 3. 결론

1. 복잡한 구조물의 유한요소해석 응답값으로부터 계산된 요소신뢰성 지수와 파괴확률은 미분항 및 작은 파괴확률의 계산상 FOSM 과 MCS의 적용이 어려워지므로, 선택된 무작위 변량만의 함수인 한계상태방정식을 음함수로 구성하는 응답면기법을 적용하여 해석하였다.

2. 체계신뢰성 해석에서는 모든 경로와 단면에 대한 해석을 할 수 없으므로 유한요소구조해석결과와 기존의 아치교 사고사례 등을 통해서 밝혀진 중요한 위험경로 및 위험단면의 파괴를 일으키는 사건으로 한정하였다. 교량시스템의 체계신뢰성을 평가하여 상관관계의 변동에 따른 시스템붕괴에 대한 발생확률의 상하한계를 결정하였다. 시스템의 요소간 저항연결구조는 요소파괴의 순서와 전체강성의 감소정도에 따라서 결정하였다. 3. 체계신뢰성에서 검토되지 않는 다른 요소간의 상관관계를 검토하기위해서 가정된 붕괴순서와 다른 거동을 보일 경우에 대해서는 통계적으로 독립된 요소들의 파괴와 그 모든 붕괴모드 조합경우에 대해서 검토하였다. 붕괴모드조합의 검토 결과 거더와의 파괴조합과 아치리브와의 파괴조합에서 체계신뢰성보다 위험한 상한계 시스템 파괴확률과 안전한 하한계 파괴확률이 발견되었다.

### 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2006년도 건설기술기반구축사업(과제번호 : 06첨단융합-E01)의 지원으로 이루어졌습니다

### 참고문헌

- 이성로, 배용귀 (2004) 2축 응력하의 콘크리트 구조물의 신뢰성해석 및 민감도해석, **대한토목학회논문집**, 24(34), pp 631-637
- Box, G.E.P., and Wilson K.B.(1951) On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, *Journal of Royal Statistical Society*, Series B13, pp.1-45
- Bucher, C.G., Bourgund, U.(1987) Efficient Use of Response Surface Methods, Report No.9-87, *Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria*
- Nowak A. S., Collins K. R. (2000) Reliability of Structures, *McGraw-Hill, London*
- Nowak, A.S., Yamani, A.S. and Tabsh, S.W. (1994) Probabilistic Models for Resistance of Concrete Bridge Girders, *ACI Structural Journal*, 91(3), pp. 269-276.
- Nowak, A.S. (1999) Report 386 Calibration of LRFD Bridge Design Code, Transportation Research Board National Academy Press, pp. 150-161.