

# 상시 계측 데이터를 이용한 신뢰성에 기초한 판형 철도교의 내하력 평가법

Methodology for Reliability-based Assessment of Capacity-Rating  
of Plate Girder Railroad Bridges using Ambient Measurement Data

조효남<sup>1)</sup>

Cho, Hyo Nam

최현호<sup>2)</sup>

Choi, Hyun Ho

이상윤<sup>3)</sup>

Lee, Sang Yoon

선종완<sup>4)</sup>

Sun, Jong Wan

요약 : 현재 까지도 철도교의 내하력 평가는 일반적으로 허용응력 판정법(Working Stress Rating, WSR)에 의해 수행되고 있다. 그러나 WSR 방법은 구조물, 하중 등의 여러 요인에 의한 불확실성을 고려하지 못한다는 단점이 있으며, 이러한 재래적인 내하력 평가법의 불완전성을 해결하기 위하여 신뢰성에 기초한 내하력 평가법의 개발에 대한 여러 연구가 수행되어오고 있다. 한편, 최근에는 실용적인 내하력 평가방법이라 할 수 있는 등가내하력 평가법이 제안되었다. 보다 효율적인 등가내하력 평가를 위한 가장 중요한 요소는 무엇보다 한계상태 함수에 적용되는 확률변수(저항 및 하중 관련 변량)에 대한 불확실성이 합리적이고 실제적으로 추정되어야 한다는 것이다. 특히 활하중에 대한 불확실성은 다른 확률변수보다도 중요하게 다루어 져야 보다 신뢰도 있는 해석이 된다.

본 연구에서는 하중에 대한 불확실성의 합리적인 적용을 위해, 교량의 상시 계측 데이터로부터 추정한 하중관련 불확실성을 보다 합리적으로 적용할 수 있는 한계상태모형을 이용하여 등가내하력 평가법을 개선하였으며, 기존의 내하력 평가법들과의 비교를 통하여 개선된 등가내하력 평가방법에 대한 적용성을 검증하였다.

ABSTRACT : Today, the Working Stress Rating (WSR) is being widely used for the capacity-rating and the safety assessment of railroad steel bridges. Since it cannot incorporate the uncertainties, several studies have been carried out in order to get over the incompleteness of the conventional capacity-rating and safety assessment.

A system reliability-based equivalent capacity-rating method, which can evaluate the capacity of existing bridges, has been recently proposed. For more efficient reliability analysis, probabilistic parameters of the random variables in the limit-state models should be reasonably evaluated. Especially, uncertainties for live load effects must be realistically included.

In this study, an improved limit-state model was used for the system reliability-based equivalent strength method. This model can incorporate the probabilistic parameters obtained from ambient measurement data. To demonstrate the applicability of the improved system reliability-based equivalent capacity rating method, this was applied to the existing steel plate girder bridge for comparison with the conventional capacity-rating and safety assessment.

핵심 용어 : 체계 신뢰성, 내하력, 내하율, 철도교, 등가내하력

KEYWORDS : reliability, system reliability, capacity-rating, rating, railroad bridge, equivalent strength

## 1. 서 론

우리나라에 존재하는 2500여 개소의 철도교 중에서 강철도

교는 약 65%인 1696 개소를 차지하고 있으며, 이 중 50년 이상의 공용기간이 경과된 강철도교가 차지하는 비율은 약 50%정도에 이른다(경갑수, 2002). 이러한 철도교는 오랜 공

본 논문에 대한 토의를 2003년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

- 1) 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사  
(Tel. 031-400-5141, Fax. 031-400-5660, E-mail: ryfid@hanyang.ac.kr.)
- 2) 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 박사과정(prdre@hanyang.ac.kr)
- 3) 정희원, 한국건설기술연구원 연구원(sylee@kict.re.kr)
- 4) 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 석사과정(powersun77@ihanyang.ac.kr)

용기간에 걸친 노후화에 따라 안전상의 문제점이 나타남으로써 유지관리를 위한 교량의 안전도 및 내하력 평가의 중요성이 대두되고 있다. 또한, 철도교는 단 한 번의 사고에 의해서도 수많은 인명피해가 발생할 수 있는 특성이 있으므로 철도교에 대한 합리적이고 실제적인 내하력 평가를 위한 연구는 매우 중요하다 할 수 있다.

현재 철도교의 내하력 평가는, 실제 교량의 노후손상도를 반영할 수 없고 교량의 상태를 반영하기 위한 여러 보정계수의 합리적인 추정이 어렵다는 단점이 있음에도 불구하고, 허용응력 설계법에 근거한 재래적인 내하력 판정법(WSR)에 의해 이루어지고 있다. 이에 재하시험에 의한 교량의 실 응답비 및 실측 충격계수만을 명시적으로 포함시켜 개선시킨 내하력 판정법이 제안되었지만, 이 역시 이동하중에 대한 충격계수의 합리적인 추정이 어렵고 교량에 존재하는 저항 및 하중에 대한 불확실성을 고려할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 이러한 불확실성을 고려하기 위한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되어 신뢰성에 기초한 국내 실정에 맞는 하중저항계수 내하력(Load and Resistance Factor Rating, LRFR) 평가규준(조효남, 1990)이 제안되었으며, 최근에는 보다 실용적인 내하력 평가법이라 할 수 있는 등가내하력 평가방법(조효남, 1997)이 제안되었다.

신뢰성에 기초한 등가내하력 평가방법에 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있는 것은 무엇보다 신뢰성 해석이라 할 수 있으며, 합리적인 신뢰성 해석을 위해서는 한계상태 함수에 적용되는 확률변수(저항 및 하중 관련 변량)의 불확실량을 합리적이고 실제적으로 추정하여야 한다. 확률변수들은 재료적 특성의 추정, 구조응답의 계산, 제작 및 시공, 충격계수와 같은 여러 계수들의 추정 등에 따르는 많은 종류의 불확실량을 포함하게 된다. 이와 같이 많은 불확실량들을 포함한다는 것은, 확률변수에 포함된 불확실량의 종류만큼 실제 구조물의 거동을 제대로 예측하기 어렵다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 따라서 보다 합리적이고 실제적인 신뢰성 해석을 위해서는 최소한의 불확실량들이 포함되도록 해야 하며, 신뢰성 해석에 포함된 불확실량들의 추정 또한 합리적으로 이루어져야 한다. 특히 신뢰성 해석의 결과는 활하중관련 확률변수에 가장 민감하므로 활하중관련 불확실량의 추정은 매우 중요하게 다루어져야 한다.

따라서 본 논문에서는 보다 합리적이고 적합한 신뢰성 해석을 위해서 최소한의 불확실량을 포함하도록 한계상태 모형을 개선하였으며, 활하중관련 불확실량의 합리적이고 실제적인 추정을 위해 상시 계측 데이터의 회귀분석을 통해 불확실량을 직접 추정하도록 함으로써 기존의 등가내하력 평가법을 개선하여, 재하시험 없이도 내하력 평가가 가능한 등가내하력 평가법을 제안하였다. 또한, WSR, LRFR 및

기존의 등가내하력 평가법 등의 기존의 내하력 평가법들과의 비교를 통하여 개선된 등가내하력 평가방법에 대한 적용성을 검증하였다.

## 2. 교량의 한계상태모형

### 2.1 기존 한계상태모형

기존에 고속철도 교량에 적용하였던 등가내하력 평가법에 관한 연구(조효남, 1997)로부터 기존의 등가내하력 평가법에 적용되는 구조부재의 특정파괴모드에 대한 한계상태모형을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = R - (S_D + S_L) \quad (1)$$

여기서,  $R$  : 구조저항

$S_D, S_L$  : 사하중 및 활하중에 의한 하중효과

$g(\cdot)$  : 특정 파괴모드에 대한 한계상태를 나타내는 함수

구조저항  $R$ 과 하중효과  $S_D, S_L$ 은 다음과 같은 일반식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} R &= R_n \cdot D_F \cdot N_R \\ S_D &= C_D \cdot D_n \cdot N_D \\ S_L &= C_L \cdot L_n \cdot K_s \cdot (1+i) \cdot N_L \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $R_n$  : 무손상부재의 추정공칭저항  
(휩모멘트 또는 전단력)

$D_F$  : 노후손상계수

$N_R$  :  $R_n, D_F$ 의 추정에 관련된 불확실량변수

$C_D, C_L$  : 각각 사하중과 활하중에 대한 휨모멘트 및 전단력의 영향계수

$D_n, L_n$  : 각각 공칭사하중 및 공칭활하중

$K_s$  : 응력응답비(계산치/실측치)

$i$  : 충격계수

$N_D, N_L$  :  $C_D, C_L$ 을 추정하는데 있어서의 불확실량 및 실제하중효과에 대한 편기를 조정하기 위한 보정계수

위 식에서  $N_R$ 은  $F \cdot M \cdot F \cdot D$ 로 표현할 수 있으며,  $P, M, F, D$ 는 각각 저항의 추정 및 해석모형, 재료강도, 제작 또는 시공, 노후손상계수의 추정에 대한 불확실량을 나타내는 변수이다. 또한  $N_D, N_L$ 은 각각  $P_D M_D, P_L P_K M_L$ 로 표현할 수 있으며,  $P_D, P_L$ 은 각각 사하중과 활하중을 작용외력으로 변환시키는 해석상의 불확실량을 나타내는 변수이고,  $P_K$ 는 실 응답비( $K_s$ ) 및 충격계수( $i$ )의 추정에 따른 불확실량을 나타내

는 변수이며,  $M_D$ ,  $M_L$ 은 공칭사하중과 공칭활하중에 대한 실 사하중 및 실 활하중의 불확실 정도를 나타내는 변수이다.

## 2.2 개선된 한계상태모형

기존의 한계상태모형은 저항 및 하중관련 변량에 해당하는 모멘트 또는 전단력의 추정에 따른 해석상의 불확실량 ( $P$ ,  $P_D$ ,  $P_L$ ), 제작 또는 시공에 따른 불확실량( $F$ ) 및 실 활하중의 효과를 고려하기 위한 실 응답비( $K_s$ ) 및 충격계수( $i$ )의 추정에 따른 불확실량( $P_K$ )등의 많은 불확실량을 포함하고 있다. 특히, 실 활하중의 효과를 고려하기 위한 실 응답비 ( $K_s$ ) 및 충격계수( $i$ )는 그 값의 정확한 추정이 어렵기 때문에 그 불확실성은 매우 크다고 할 수 있으며, 이와 같은 불확실량의 추가는 활하중관련 변량에 대한 불확실성을 더욱 증가시키는 요인이 된다.

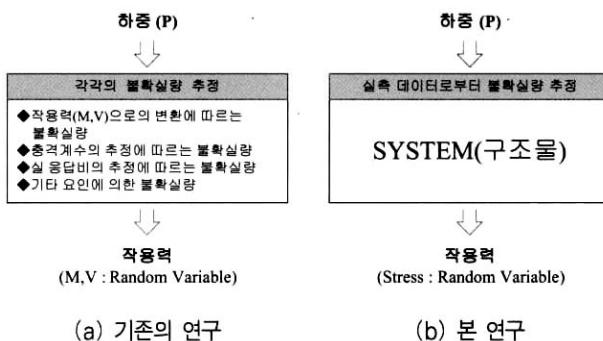


그림 1. 하중관련 확률변수의 추정

즉, 신뢰성 해석에 있어서 이러한 추가적인 해석 및 추정으로 인하여 불확실성이 증가한다는 것은 그 만큼 실제의 현상과 점점 더 멀어진다는 것을 의미하므로 대상 구조물에 대한 신뢰성 해석을 보다 합리적으로 수행하기 위해서는 불확실성을 늘려가는 추정 및 해석은 가능한 배제하여야 한다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 상시 계측 데이터로부터 실 활하중 효과를 직접 추정함으로써 실 응답비( $K_s$ ) 및 충격계수( $i$ )의 추정을 배제하도록 하였으며, 응력수준에서의 한계상태 함수를 구성하여 기존의 연구에서 한계상태의 기준으로 사용했던 하중효과 즉 모멘트 및 전단력의 추정을 배제함으로써 추가적인 해석에 따르는 불확실량을 줄이도록 하였다.

따라서 본 연구에서는 기존의 저항 및 하중 모형으로부터 해석상의 불확실량, 응답비 및 충격계수의 추정에 따르는 불확실량 등을 배제하여 식 (3)과 같이 저항 및 하중모형을 나타낼 수 있다.

$$R = R_n \cdot D_F \cdot MD \quad (3)$$

$$S = D_n \cdot M_D + L_n \cdot M_L$$

여기서,	$R_n$	: 실 공칭 재료강도
	$D_F$	: 노후손상계수
	$MD$	: 재료강도 및 노후손상계수의 추정에 따른 불확실량을 내포하는 변량
	$D_n, L_n$	: 공칭 사하중 및 공칭 활하중에 의한 하중효과(응력)
	$M_D, M_L$	: 실 사하중 및 실 활하중의 불확실량을 내포하는 변량

또한 상시 계측 데이터로부터 직접 추정한 응력응답의 평균은 교량을 통행하는 실 활하중에 의한 효과의 평균이며, 변동계수는 교량이 포함하고 있는 모든 불확실량을 포함하여 나타는 값이라 할 수 있다. 즉, 상시 계측 데이터로부터 추정한 응답의 분포는 신뢰성 해석을 위한 평균 활하중 효과 ( $S_L = L_n \cdot M_L$ )로 적용할 수 있다. 따라서 식 (3)은 다시 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$R = R_n \cdot D_F \cdot MD \quad (4)$$

$$S = D_n \cdot M_D + S_L$$

또한, 신뢰성 해석을 위한 응력수준의 한계상태 함수는 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

- 인장 플랜지의 항복

$$g(\cdot) = f_{yield} \cdot D_F \cdot MD - f_L \cdot M_L - f_D \cdot M_D \quad (5)$$

- 압축 플랜지의 좌굴

$$g(\cdot) = f_{cr} \cdot D_F \cdot MD - f_L \cdot M_L - f_D \cdot M_D \quad (6)$$

여기서,  $f_{yield}$  : 공칭인장응력

$f_{cr}$  : 공칭임계응력(AISC, 1999)

$f_L, f_D$  : 활하중, 사하중에 의한 응력

본 연구에서는 판형교의 요소 신뢰성 해석을 위해 인장 플랜지의 항복과 압축플랜지에서의 좌굴에 대한 한계상태를 고려하였으며, 전단은 판형교에서는 비지배적인 파괴모드이므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 신뢰성해석에 적용되는 활하중의 불확실량을 기존의 통계자료에 근거하여 적용하는 것은 특정 교량만이 가지고 있는 활하중분포의 특성을 반영하지 못하여 적합하지 않은 결과를 줄 가능성성이 있으므로, 특정 구조물에 보다 적합한 신뢰성 해석을 위해서는 활하중의 불확실량

을 특정 교량으로부터 얻은 상시계측데이터를 바탕으로 추정하여야 한다.

또한 응력수준의 한계상태를 이용하여, 휨 또는 전단수준의 한계상태에서 포함하고 있는 추가적인 해석에 따른 불확실성을 배제하도록 하였다.

### 3. 상시 계측 및 데이터의 회귀분석

개선된 등가내하력평가를 위해서는 교량을 통과하는 열차의 축 하중, 열차가 1회 통과 하였을 경우 발생하는 최대 응력응답 및 열차에 의해 발생하는 가속도 데이터 등에 대한 상시 계측이 이루어져야 하며, 상시 계측에 의해 나타난 최대 응력응답은 상대적으로 매우 큰 중량을 가지고 있는 기관차에 의해 발생하므로 계측 데이터는 기관차의 하중과 최대 응력응답으로 정리 될 수 있다.

또한, 철도교에는 다양한 종류의 기관차들이 통행하고 내하력 평가를 위해서는 설계하중이 기준이 되어야 하므로, 열차하중과 응력응답에 대한 회귀분석을 위해서는 등가 설계하중으로의 변환이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 교량을 통행하는 기관차의 형태를 크게 PMC 기관과 디젤 기관으로 구분하였으며, 계측 데이터가 동적인 응답임을 고려하여 식 (7)로부터 주행 속도에 따른 변환 계수  $m$ 을 추정하였다. 식 (7)로부터 추정한 변환계수의 평균 및 변동계수는 표 1과 같다.

$$m = \frac{\text{설계하중에 의한 응력}}{\text{열차(기관차)하중에 의한 응력}} \quad (7)$$

표 1. 하중 변환계수

기관차	교량 I (L18)		교량 II (L-22)		교량 III (L-22)	
	평균	변동계수	평균	변동계수	평균	변동계수
디젤	1.015	0.046	1.475	0.031	1.259	0.042
PMC	1.499	0.030	2.186	0.024	1.865	0.024

\*L-18, L-22 : 각 교량의 설계하중

열차하중( $x$ )에 대한 응력( $Y$ )의 조건부 확률분포를 추정하기 위해서 분산이 비정수인 선형 회귀분석(Ang, 1975)을 실

시하였다. 회귀직선에 대한 조건부 분산은 독립변수의 함수일 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Var(Y|x) = \sigma^2 g^2(x) \quad (8)$$

여기서,  $g(x)$ 는 미리 정한 함수이며  $\sigma$ 는 미지의 상수이다. 또한, 회귀분석 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(Y|x) = a + bx \quad (9)$$

위의 회귀분석 식을 구함에 있어서 분산이 큰 영역에 있는 자료점보다 분산이 작은 영역에 있는 자료점에 더 큰 비중을 두는 것이 합리적이므로 다음과 같이 분산의 크기에 반비례하는 비중을 부여할 수 있다.

$$w_i = \frac{1}{Var(Y|x)} = \frac{1}{\sigma^2 g^2(x)} \quad (10)$$

결국, 최소자승법으로부터 회귀분석 추정 변수 및 표준편차 ( $s_{Y/x}$ )는 다음과 같이 구해진다.

$$a = \frac{\sum w_i y_i - b \sum w_i x_i}{\sum w_i} \quad (11)$$

$$b = \frac{\sum w_i (\sum w_i y_i) - (\sum w_i y_i)(\sum w_i x_i)}{\sum w_i (\sum w_i x_i^2) - (\sum w_i x_i)^2} \quad (12)$$

$$s^2 = \frac{\sum w_i (y_i - a - bx_i)^2}{n-2} \quad (13)$$

$$s_{Y/x} = sg(x) \quad (14)$$

본 연구에서는 대상교량의 좌·우측 두 거더의 상·하부 플랜지에 대한 열차하중 및 발생응력 데이터로부터 회귀분석을 시행하여 열차하중에 따른 평균 발생응력, 표준편차 및 변동계수를 표 2와 같이 구하였다.

표 2. 회귀 분석 결과

부재	교량 I			교량 II			교량 III		
	평균 발생응력	표준편차	변동계수	평균 발생응력	표준편차	변동계수	평균 발생응력	표준편차	변동계수
좌측 상부 플랜지	2.286x	0.966x	0.422	1.779x	0.483x	0.272	1.574x	0.446x	0.283
좌측 하부 플랜지	2.575x	0.118x	0.434	1.928x	0.603x	0.313	1.684x	0.508x	0.302
우측 상부 플랜지	3.067x	1.232x	0.402	2.150x	0.565x	0.263	1.659x	0.343x	0.207
우측 하부 플랜지	3.138x	1.210x	0.386	2.289x	0.624x	0.273	1.842x	0.399x	0.217

\* x : 열차하중(등가 설계하중)

#### 4. 통계적 불확실량

기설교량의 신뢰성 해석에 사용되는 불확실량에는 구조안전도에 영향을 끼칠 수 있는 모든 것들을 포함해야하며 표본자료와 통계적 해석 변동량뿐만 아니라 추정오차 또는 모델링오차, 불확실한 정보로 인한 오차등도 포함된다. 본 연구에서는 기존의 문헌(Nowak, 1999)을 근거로 하여 다음 표 3과 같이 불확실량을 적용하였다. 노후손상계수의 경우 아직까지도 정확한 추정이 어려우며, 통계자료 또한 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 추정된 노후손상계수의 불확실성이 클 것이라 가정하여 0.1~0.3의 범위의 변동계수를 적용하여 민감도 해석을 수행하여 그 영향을 살펴보도록 하였다.

표 3. 저항 및 사하중 관련 불확실량 변수

	공칭비	변동계수
재료강도( $M$ )	1.095	0.075
저항 노후손상계수( $D$ )	1.0	0.1 ~ 0.3 (0.2)
$MD$	1.095	0.125 ~ 0.309 (0.214)
사하중	1.03	0.08

\*( ) : 평균

또한, 활하중관련 불확실량은 상시 계측 데이터의 회귀분석에 의한 확률 모형으로부터 적용하였다.

#### 5. 등가내하력 평가법

등가내하력 평가법은 임의의 두 개 이상의 평가하중에 대한 신뢰성지수  $\beta$ 를 수치해석에 의해 구하여 FOSM형태의 적합곡선을 구하게 되면, 이 곡선으로부터 유지관리를 위한 목표신뢰성지수  $\beta_0$ 에 대응하는 등가내하력  $P_r$ 을 곧바로 구할 수 있는 실용적인 방법이다(조효남, 1997).

체계신뢰성지수  $\beta_s$ 는  $\ln-\ln$ 모델의 FOSM형태인 식 (15)의 형태로 개념적으로 표현할 수 있다.

$$\beta \cong \frac{\ln(\bar{R}_s/\bar{S}_s)}{\sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{S_s}^2}} \quad (15)$$

여기서,  $\bar{R}_s, \bar{S}_s$  : 각각 시스템 평균저항 및 평균하중효과  
 $\Omega_{R_s}^2, \Omega_{S_s}^2$  : 각각 시스템 저항 및 하중의 변동계수

위 식에서,  $\bar{S}_s = \bar{D}_s + \bar{L}_s$ 로 표현할 수 있으며, 이는 다시  $\bar{S}_s = \bar{D}_s + b_s \cdot P$ 로 나타낼 수 있다. 여기서,  $\bar{D}_s, \bar{L}_s$ 는 각각 평균 사하중 및 활하중 효과이고,  $b_s$ 는 앞 절의 회귀분석으로

부터 구한 열차하중에 대한 응력의 영향계수를 시스템수준 개념의 상수로 나타낸 것이며,  $P$ 는 열차하중을 나타낸다. 따라서 식 (15)은 다시 식 (16)으로 표현될 수 있다.

$$\beta_s \cong \frac{\ln(\bar{R}_s/(\bar{D}_s + b_s \cdot P))}{\sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{S_s}^2}} \quad (16)$$

위 식 (16)으로부터 시스템수준의 등가내하력  $P_r$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_r &\cong \frac{\bar{R}_s}{b_s} \cdot \exp(-\beta_0 \cdot \Omega_s) - \frac{\bar{D}_s}{b_s} \\ &\cong Z \cdot \exp(-\beta_0 \cdot \Omega_s) - C \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,  $\Omega_s$ 는  $\sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{S_s}^2}$ 로 표현되는 시스템 불확실량을 개념적으로 내포하고 있는 변수이고,  $P_r$ 에 대한 FOSM형태의 적합곡선식인 식 (17)의 미지의 변수는  $Z, \Omega_s, C$ 이다. 열차하중에 대한 체계신뢰성해석의 결과로부터 미지수  $Z, \Omega_s, C$ 를 구함으로써 그림 2와 같은 적합곡선을 추정할 수 있으며, 적합곡선으로부터 목표신뢰성수준에 해당하는 활하중, 즉 등가내하력을 손쉽게 구할 수 있다.

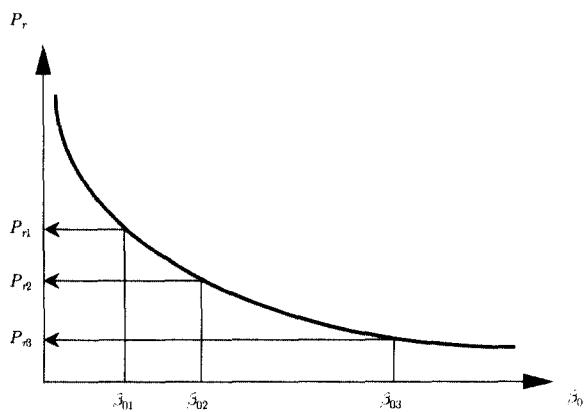


그림 2 신뢰성 지수 vs 내하력 관계곡선

교량에 대한 등가내하력 판정을 위해서는 목표 안전수준이 제시되어야 하며, 내하력 판정규준의 안전수준은 목표 신뢰성 지수  $\beta_0$ 에 의해 결정되기 때문에 신뢰성에 기초한 내하력 판정규준을 제시할 때 합리적이고 적절한 목표 신뢰성지수의 선택이 필요하다. 본 연구에서는 일반적인 교량의 공용간 안전수준인  $\beta_0 = 3.0$ 을 목표 안전수준으로 사용하였다.

이상의 내용으로부터 본 연구에서 제안하는 개선된 내하력 평가법의 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

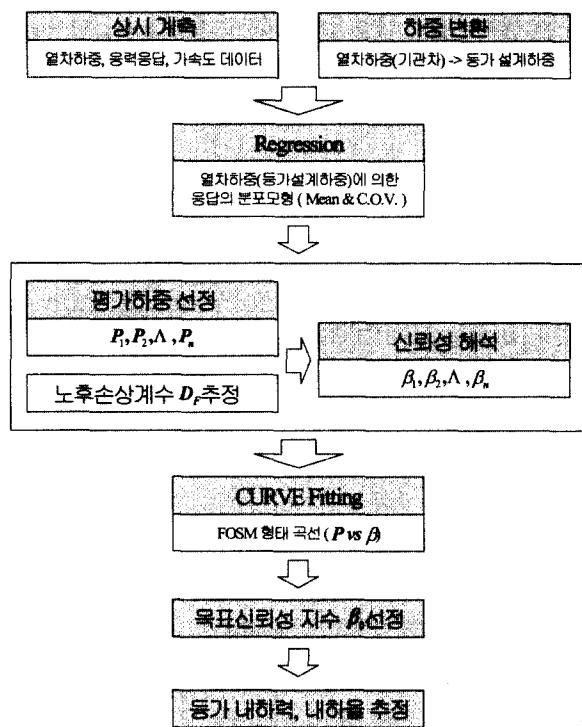


그림 3. 개선된 등가내하력 평가 흐름도

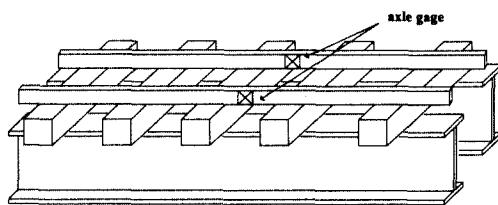


그림 4. 축중 측정 게이지 위치

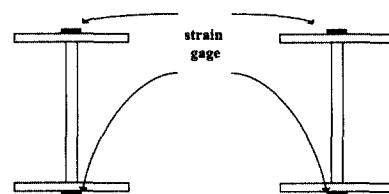


그림 5. 변형률 게이지 위치

### 6.1. 노후손상계수 $D_F$

본 연구에서는 노후손상계수를 추정하기 위해 식 (18)과 같은 근사적인 방법을 적용하였다.

$$D_F = \frac{K_D}{K_i} = \frac{w_D^2}{w_i^2} \quad (18)$$

여기서,  $K_D$  : 손상구조물의 강성도

$K_i$  : 무손상구조물의 강성도

$w_D$  : 손상구조물의 기본 고유진동수

$w_i$  : 무손상구조물의 기본 고유진동수

## 6. 적용 예 및 고찰

개선된 등가내하력 평가법의 적용성을 검증하기 위하여 계측이 실시된 교량을 선정하여 내하력 평가를 실시하였다. 적용교량은 교량 I, 교량 II, 교량 III를 선정하였다. 각 교량의 제원은 표 4와 같으며, 열차하중 및 응력 계측을 위한 게이지의 위치는 그림 4, 5와 같다.

표 4. 교량 제원

교량	형식	지간	곡률반경	강재종류	설계하중
교량 I	단순교	9.44m	직선교	SW41	LS-18
교량 II	단순교	12.90m	800m	SW41	LS-22
교량 III	단순교	9.40m	1200m	SW41	LS-22

손상구조물의 고유진동수는 각 교량에서 측정된 여러 개의 가속도 데이터의 자유진동 부분에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 실시하여, 분석 결과 내에서 중복이 되며 지배적인 경향을 나타나는 진동수를 손상구조물의 기본고유진동수로 추정하였으며, 무손상구조물에 대한 기본고유진동수는 구조물에 대한 고유치해석을 통해 추정하였다.

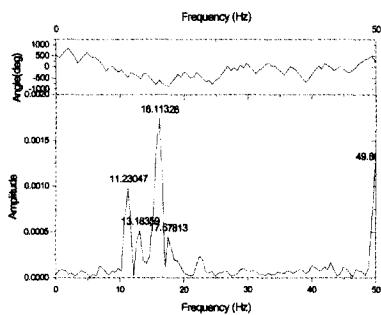


그림 6. 손상 구조물의 고유진동수 (교량 I)

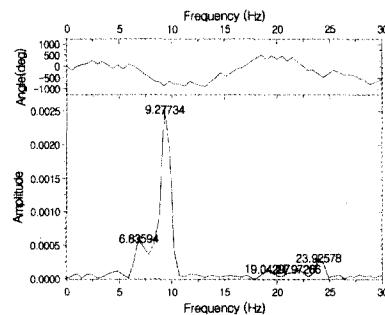


그림 7. 손상 구조물의 고유진동수 (교량 II)

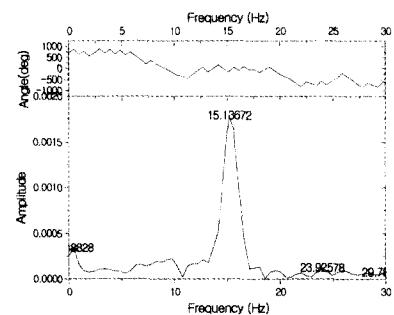


그림 8. 손상 구조물의 고유진동수 (교량 III)

가속도 성분의 자유진동부분에 대한 FFT분석을 실시한 결과는 그림 6, 7, 8과 같으며, 무손상구조물의 기본고유진동수와 손상구조물의 기본고유진동수로부터 식 (18)을 이용하여 노후손상계수  $D_F$ 을 표 5와 같이 추정하였다.

표 5. 고유진동수 및 노후손상계수

교량명	손상구조물	무손상구조물	노후손상계수 $D_F$
교량 I	16.113 Hz	18.069 Hz	0.795
교량 II	9.277 Hz	12.086 Hz	0.589
교량 III	15.137 Hz	18.258 Hz	0.687

무손상구조물에 대한 고유치 해석의 타당성을 검토하기 위해 구조해석으로부터 구한 처짐의 시간이력과 계측에 의한 실구조물의 처짐의 시간이력을 비교·검토하였다. 구조해석과 계측에 의한 시간이력은 그림 10, 11, 12와 같으며, 이 결과로부터 고유치해석을 위한 구조모델은 타당하다고 할 수 있다.

## 6.2. 신뢰성 해석

대상교량은 SWS41강을 사용한 교량이므로 거더의 공칭 인장응력 및 압축응력은  $4100 \text{ kg/cm}^2$ 으로 사용하였으며, 사하중에 의한 응력은 구조해석의 결과로부터 표 6과 같이 추정하였다.

표 6. 사하중에 의한 응력

부재	교량 I	교량 II	교량 III
좌측 상부 플랜지	29.934	41.498	26.784
좌측 하부 플랜지	45.886	57.010	40.361
우측 상부 플랜지	31.472	39.463	25.782
우측 하부 플랜지	46.911	52.004	39.741

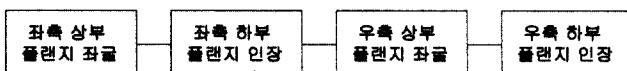


그림 9. 체계 신뢰성 해석 모형

표 7. 요소 및 체계 신뢰성지수

열차하중 (ton)	교량 I					교량 II					교량 III					
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600	
요소	좌측상부 플랜지	3.87	3.33	2.83	2.41	2.05	3.66	3.14	2.63	2.15	1.71	3.99	3.63	3.25	2.88	2.52
신뢰성	좌측하부 플랜지	3.75	3.15	2.64	2.21	1.85	3.81	3.36	2.89	2.46	2.07	4.07	3.75	3.41	3.07	2.74
지수	우측상부 플랜지	3.54	2.88	2.32	1.87	1.48	3.46	2.84	2.25	1.72	1.25	3.98	3.63	3.28	2.92	2.57
	우측하부 플랜지	3.57	2.93	2.38	1.92	1.53	3.68	3.17	2.67	2.19	1.76	4.03	3.71	3.39	3.06	2.74
체계	신뢰성 지수	3.30	2.59	1.97	1.44	0.97	3.31	2.67	2.05	1.47	0.93	3.77	3.38	2.98	2.57	2.17

판형교는 두 개의 거더로 이루어진 직렬 시스템이며, 각 거더 또한 두 개의 파괴모드로 이루어진 직렬 시스템이므로, 교량의 체계 신뢰성 모형은 그림 9와 같이 네 개의 요소로 이루어진 직렬 시스템으로 구성하였다. 또한, 요소간의 상관계수는 신뢰성 해석용 프로그램(Estes, 1997)에서 고려되었다.

등가내하력 평가를 위한 FOSM 형태의 적합곡선의 추정을 위해서는 임의의 평가하중을 선정해야 하며, 본 논문에서는 각 교량에 대해 열차하중이 200, 300, 400, 500, 600 ton인 경우를 선정하여 신뢰성 해석을 수행하도록 하였다.

한계상태모형과 저항 및 사하중의 불확실량을 앞에서 기술한 바와 같이 적용하고, 실측 데이터의 회귀분석을 통하여 구한 활하중관련 불확실량을 바탕으로 신뢰성 해석을 수행하였다. 교량별 각 해석 점에 대한 신뢰성 해석 결과는 표 7과 같다.

## 6.3. 등가내하력 평가

표 7로부터 그림 13, 14, 15와 같이 체계신뢰성 지수와 열차하중과의 상관관계를 지수함수 형태의 적합곡선으로 나타낼 수 있으며, 그림 13, 14, 15의 적합곡선으로부터 구조물의 공

용간 목표 신뢰성지수  $\beta = 3.0$ 에 해당하는 등가내하력을 구할 수 있다. 기존의 내하력 평가법과의 비교를 위해 개선된 등가내하력 평가법 및 기존의 내하력 평가법에 의한 결과를 표 8, 9에 나타내었다.

표 8. 교량별 내하력

	내하력(ton)		
	교량 I (L-18)	교량 II (L-22)	교량 III (L-22)
기존 등가내하력 평가	427	234	309
WSR	299	203	257
LRFR (SRL)	354	244	304
LRFR (MOR)	463	320	398
개선된 등가내하력 평가	236	212	389

표 9. 교량별 내하율

	내하율		
	교량 I	교량 II	교량 III
기존 등가내하력 평가	3.31	1.48	1.96
WSR	2.32	1.28	1.63
LRFR (SRL)	2.74	1.54	1.92
LRFR (MOR)	3.59	2.03	2.52
개선된 등가내하력 평가	1.83	1.55	2.46

표 8, 9 및 그림 16을 분석해 보면 개선된 등가내하력 평가법은 기존의 등가내하력 평가법과 비슷한 결과를 주는 것도 있지만 다른 결과를 보이는 것도 나타났다. 즉, 표 9 및 그림 16에서 알 수 있듯이 교량 II의 경우 개선된 등가내하력 평가법과 기존의 내하력 평가법이 유사한 경향의 결과를 나타내는

반면, 교량 I 및 교량 III의 경우에선 전혀 다른 경향을 나타낸다는 것을 확인 할 수 있다.

개선된 등가내하력 평가법이 기존 등가내하력과 차이를 보이는 이유는 변동계수의 적용에서 차이가 있기 때문이다. 기존 등가내하력평가 방법에서는 활하중 변동계수를 0.3으로 가정

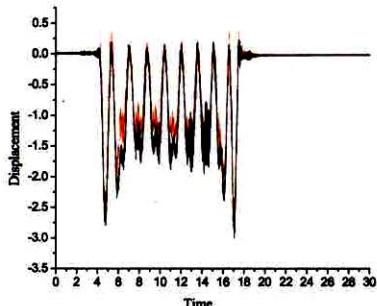


그림 10. 교량 I Time History

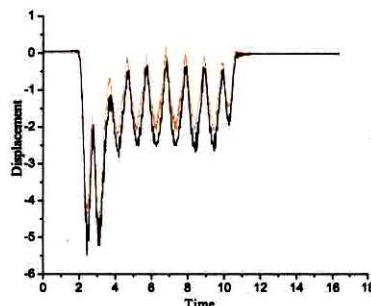


그림 11. 교량 II Time History

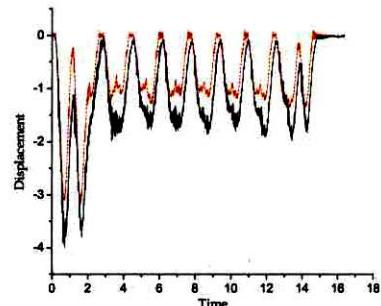


그림 12. 교량 III Time History

\* — 계측에 의한 실구조물의 처짐의 시간이력  
······ 구조해석으로부터 구한 처짐의 시간이력

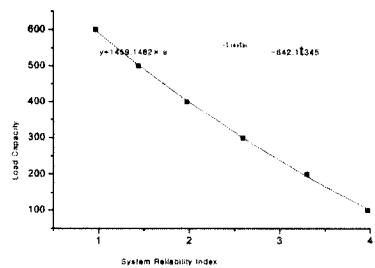


그림 13. FOSM 적합곡선 (교량 I)

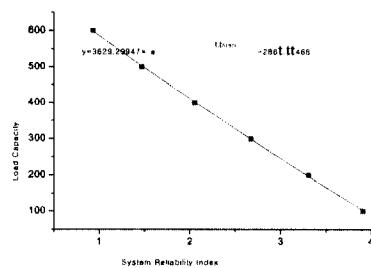


그림 14. FOSM 적합곡선 (교량 II)

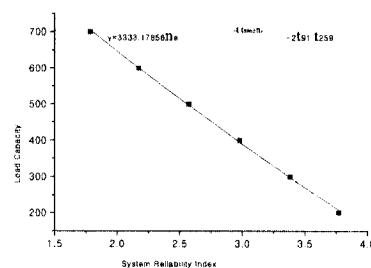


그림 15. FOSM 적합곡선 (교량 III)

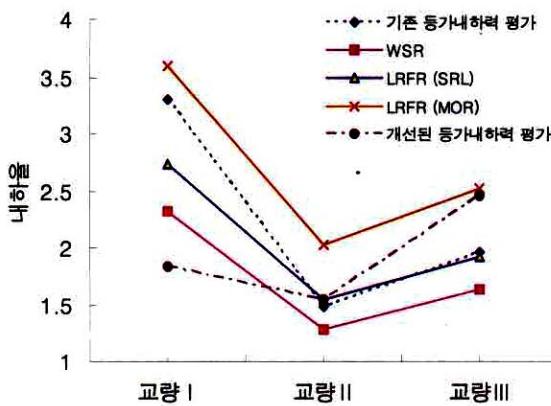


그림 16. 내하력 평가법에 따른 내하율

하여 적용된 결과이며 개선된 등가내하력평가 방법에서는 활

하중 변동계수를 0.2~0.4로 사용하였기 때문이다. 여기서 기존 등가내하력평가 방법에서는 활하중 변동계수를 0.3으로 적용한 것은 일반적으로 적용되는 값이며 본 논문에서 적용한 0.2~0.4는 대상교량의 특수성을 고려하여 실측 데이터에 기초하여 통계적으로 추정된 값을 사용한 것이기 때문에 보다 더 합리적이라고 판단된다.

따라서 이러한 결과는 개선된 등가내하력 방법이 교량의 상시 계측 데이터로부터 하중관련 분포모형을 직접 추정함으로써 대상 교량만이 가지고 있는 거동의 특성 및 확률적 특성을 반영한 결과라 할 수 있다. 즉, 신뢰성에 기초한 기존의 내하력 평가법들은 하중관련 확률변수의 확률분포모형을 기존의 통계자료로부터 추정하기 때문에 대상 교량만이 가지고 있는 특성이 합리적으로 반영되지 못한 결과를 준다고 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서 제안한 개선된 등가내하력 평가법은 상시 계측 데이터로부터 추정한 확률변수의 확률분포모형을 이용함으로써 대상교량에 보다 실제적인 결과를 줄 수 있는 효과적인 내하력 평가법이라 할 수 있다.

한편, 이 결과는 노후손상계수의 변동계수를 0.2로 가정하였을 경우의 결과이며, 변동계수에 따른 민감도 변화는 다음절에 자세히 분석하였다.

#### 6.4 민감도 해석

내하력 평가를 위해서는 우선적으로 노후손상도의 추정이 이루어져야 한다. 하지만, 노후손상도의 추정에 있어서 지금까지 많은 연구가 진행되어 오고 있음에도 불구하고 여전히 정확한 손상도의 추정은 어려운 실정이다. 본 연구에서도 역시 노후손상도를 근사적인 식에 의해 추정하였으므로 그 값에 대한 신뢰도는 보장할 수 없다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 노후손상도의 추정치와 변동계수에 대한 민감도 해석을 수행하여 그 영향을 살펴보았다.

먼저, 노후손상계수의 추정치의 영향을 평가하기 위해 상하 10%의 변화를 주어 내하력 평가를 수행하였으며, 변동계수의 영향을 평가하기 위해 0.1~0.3의 범위를 두어 내하력 평가를 수행하였다. 민감도 해석을 위해 수행한 개선된 등가내하력 평가 결과는 표 10, 11과 같다.

표 10. 노후손상계수 추정치의 변화에 따른 내하율

$D_F$	교량 I	교량 II	교량 III
10%	2.03	1.72	2.73
0%	1.83	1.55	2.46
-10%	1.64	1.38	2.22

표 11. 노후손상계수의 변동계수 변화에 따른 내하율

C.O.V.	교량 I	교량 II	교량 III
0.1	2.43	2.38	3.83
0.15	2.25	2.09	3.36
0.2	1.83	1.55	2.46
0.25	1.11	0.83	1.35
0.3	0.12	0.01	0.25

#### 7. 결 론

본 연구에서는 하중에 대한 불확실성의 합리적인 적용을 위해, 교량의 상시 계측 데이터로부터 추정한 하중관련 불확실성을 보다 합리적으로 적용할 수 있는 한계상태모형을 이용하여 등가내하력 평가법을 개선하였으며, 기존의 내하력 평가법들과의 비교를 통하여 개선된 등가내하력 평가방법에 대한 적용

성을 검증하였다.

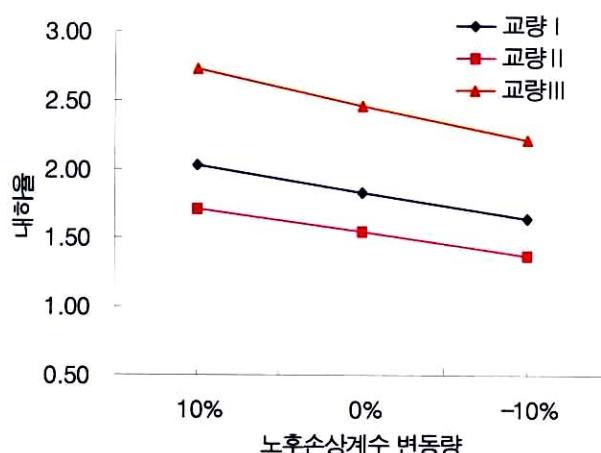


그림 17. 노후손상계수 추정치의 변화에 따른 내하율

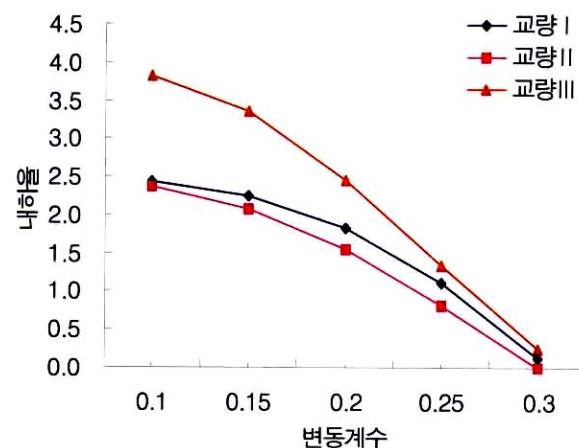


그림 18. 노후손상계수의 변동계수 변화에 따른 내하율

개선된 등가내하력 평가법은 기존의 신뢰성에 기초한 내하력 평가법(LRFR)에 비해 손쉽게 내하력을 판정할 수 있는 방법이며, 실제 구조물에 적용한 결과로부터 기존의 내하력 평가법에 의한 결과와 비교하여 합리적인 내하력 평가방법이라고 할 수 있다. 또한, 대상 구조물에 발생하는 응답의 확률분포를 기존의 통계자료로부터 일률적으로 적용하지 않고, 해당 구조물의 실측 데이터로부터 직접 추정하여 적용함으로써 기존의 등가내하력 평가법에 비해 구조물에 보다 적합한 결과를 준다고 할 수 있다.

또한, 본 연구에서 제안한 개선된 등가내하력 평가법은 상시 계측 데이터만으로도 체계적이고 합리적으로 교량의 내하력을 평가할 수 있는 방법으로, 철도교의 경우와 같이 재하시험을 위한 차량의 통제가 어려운 경우에 매우 실용적으로 적용될 수 있는 방법이라 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

경갑수, 이준석, 최일윤, 홍성욱(2002), 국내 강철도교의 열화 손상 사례분석, 2002년도 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.32-40

조효남, 서종원(1990), 신뢰성 방법에 기초한 기설 강판형교의 안정도 및 내하력 평가에 관한 연구, 한국강구조공학회 논문집, 한국강구조학회, 제2권, 제2호, pp.146-154

조효남, 곽계환, 이승재(1997), 신뢰성에 기초한 고속철도 교량의 안전도 및 내하력 평가, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제10권, 제3호, pp.133-143

조효남(1989), 체계신뢰성 방법에 기초한 도로교 설계 규준 개발 및 기설교량의 신뢰성 평가, 연구보고서, 한국과학재단

AISC(1999), *LRFD Specifications for Structural Steel Buildings December 27, 1999* pp.12

Ang, Alfredo H-S. and Tang, Wilson H. (1975), *Probability Concepts in Engineering Planning and*

*Design Vol 1*, John Wiley & Sons

Ang, Alfredo H-S. and Tang, Wilson H. (1975), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design Vol II*, John Wiley & Sons

Estes, Allen C.(1997), *A System Reliability Approach To The Lifetime Optimization Of Inspection And Repair Of Highway Bridges*, Ph.D. Dissertation, University of Colorado, Boulder, Colorado.

Nowak, Andrzej s.(1999), *Report 386 Calibration of LRFD Bridge Design Code*, Transportation Research Board, National Academy Press.

Tohotoft-Cristensen, P. and Murotsu, Y.(1986), *Application of Structural Systems Reliability Theory*, Springer-Verlag, Berlin.

(접수일자 : 2002. 9. 9 / 심사일 2002. 9. 28 /  
심사완료일 2003. 4. 4)