

## 한계상태설계법에 의한 기존 강박스거더교의 내하력 환산

노동오<sup>1</sup>, 경갑수<sup>2\*</sup>, 박진은<sup>3</sup>

# A Conversion of Load Carrying Capacity for Existing Steel Box Girder Bridge Based on Limit State Design Method

Dong-Oh Noh<sup>1</sup>, Kab-Soo Kyung<sup>2\*</sup>, Jin-Eun Park<sup>3</sup>

**Abstract:** Bridge structures are a socially important infrastructure and safety management of bridges during the public service period is important. Steel box girder bridges, which account for a large percentage of road bridges, have been designed by allowable stress design method(ASD) and load carrying capacity have been evaluated using ASD. Although design specification has recently been changed to limit state design method(LSD), in most cases, ASD is still used for load carrying capacity evaluation. In this study, the two design methods were used to compare the results of a load rating factor evaluation on a number of bridges, and we are going to find out how to convert the existing rating factor by ASD into rating factor by LSD. The results of this study are expected to can be used as a basis for determining the need for reinforcement and evaluating load carrying capacity by LSD in bridge maintenance

**Keywords:** Allowable Stress Design, Limit State Design, Load Carrying Capacity, Rating Factor, Steel Box Girder Bridge

## 1. 서 론

교량 시설물은 사회적, 경제적 측면에서 중요도가 높은 기반시설물로서 건설 후 공용 수명동안 안전한 사용이 이루어질 수 있도록 관리되어야 하며, 이러한 연유로 교량의 각종 성능평가는 매우 중요하다고 할 수 있다.

성능평가는 안전성능, 내구성능, 사용성능으로 대별될 수 있으며, 안전성능 중 구조 안전성능에 해당되는 내하력 평가는 차량 등의 작용 활하중에 대한 교량의 저항능력을 평가하는 것을 의미한다.

교량의 유지관리를 위하여 실시하는 정밀안전진단 또는 성능평가시에는 구조해석에 의하여 작용외력에 대한 구조물의 이론적 여유도를 평가하는 기본 내하력 평가, 그리고 각종 조사, 시험 및 정·동적 재하시험에서 실측한 변형률, 변위, 진동 특성을 기본 내하력 평가 결과에 반영한 공용 내하력 평가를 실시할 수 있다. 단, 실제 교량의 교통량, 접근성 등의 사용환

경을 고려하여 재하시험을 실시하지 못하는 경우에는 기본 내하력만으로 안전성을 평가하기도 한다.

이러한 내하력 평가는 교량의 유지관리 체계에서 안전성을 평가하는 중요한 분야로서 분석 및 평가기법의 정확성, 합리성 및 객관성이 필요하며, 결과의 신뢰성이 확보되어야 한다.

현재 국내에서 적용하고 있는 내하력 평가기법은 안전율에 기반을 둔 일종의 결정론적 평가기법이며, 종래의 설계방법에 따라 강구조물은 허용응력설계법(ASD), 철근콘크리트 구조물은 강도설계법(USD)을 근간으로 하고 있으며, 프리스트레스트 구조물은 두 가지 방법을 혼용하고 있다.

내하력 평가 방법은 건설기술의 발전과 시대에 따른 구조물의 설계방법의 발전에 따라 변화할 수 있으며, 근래에 국내의 각종 설계기준은 점차 신뢰도 기반의 한계상태설계법(LSD)으로 변화되는 추세이다. 특히 도로교량의 경우 “도로교설계기준”이 2012년에 개정된 이후 신규설계에서는 LSD를 사용할 것을 제시하고 있다. 그러나 내하력 평가 분야에서는 평가를 실시하는 실무 기술자가 비교적 최근에 도입된 신뢰도 기반의 LSD를 이용한 내하력 평가에 충분히 익숙하지 않은 것과, 공용기간이 20~30년 이상 경과한 기존 교량의 설계도서 보존상태가 좋지 않아 LSD로 평가하기 위한 충분한 자료를 확보하기 곤란한 경우 등으로 인하여 기존 교량의 내하력 평가는 아직도 ASD와 USD를 근간으로 하는 종래의 방법을 일반적으로 사용하는 실정이다.

<sup>1</sup>정회원, 씨티씨 주식회사 이사

<sup>2</sup>정회원, 한국해양대학교 건설공학과 교수

<sup>3</sup>정회원, 한국해양대학교 LINC+사업단 연구교수

\*Corresponding author: kyungks@kmou.or.kr

Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

과거에도 다양한 설계방법에 의한 내하력 평가기법에 대하여 비교 및 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며, 한국도로공사(2013)는 교량의 외관상태 및 각종 시험결과를 반영한 신뢰도 기반의 내하력을 평가하는 기법을 연구하여, 추후 정밀 안전진단에서 이를 참고하여 내하력을 평가할 수 있도록 지침을 제안하였다. Lee(2015)는 내하력 평가방법의 다양한 개선방안 중 종래의 방법과 LSD에 의한 내하율을 비교하여 두 결과의 개략적인 비율을 제시하였다.

이와 같이 신뢰도 기반의 설계방법인 LSD를 이용한 내하력 평가에 대한 연구는 지속되고 있으나, 종래의 방법과 LSD에 의한 결과의 상관관계를 교량의 유지관리에 직접 적용하기에는 다소 부족한 부분이 있을 것으로 예상된다.

따라서 이 연구에서는 기존 연구결과를 분석하고, 교량의 유지관리 차원에서 “시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(이하 시특별법)”에서 1, 2종 시설물로 규정하는 교량시설물 중 강박스 거더교를 대상으로 다수의 샘플 교량에 대하여 종래의 ASD에 의한 평가 결과와 LSD에 의한 평가 결과를 비교하였다. 이로부터 LSD에 의한 내하력 평가를 별도로 수행하지 않더라도 종래의 내하력을 LSD의 평가방법에 의한 내하력으로 환산할 수 있는 합리적인 방법을 모색하고자 하였다.

## 2. 내하력 평가

### 2.1 내하력 평가 방법

#### 2.1.1 평가방법 일반사항

현재 국내에서는 시특별법에 기초한 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(MLTM & KISTEC, 2017)’에서 ASD와 USD에 의한 공용내하력 평가 방법을 각각 제시하고 있으며, 현재까지는 LSD에 의한 방법은 별도로 제시되지 않은 상태이다. 그러나, 활하중에 대한 저항강도의 여유도를 평가하는 내하력 평가의 기본 개념은 동일하므로 LSD에 의한 평가방법은 USD에 의한 방법과 동일한 개념으로 적용할 수 있으며, AASHTO의 LRFR도 같은 개념이다.

또한 이 연구는 설계방법의 변화에 따른 내하력 환산방법의 모색이 주목적이므로 이론적 여유도인 기본내하율(R.F)을 각 설계방법에 따라 평가하여 비교하고자 하였다.

#### 2.1.2 허용응력법에 의한 기본내하율 평가

ASD에 의한 기본내하율 산정방법은 식(1)과 같다.

$$\text{기본내하율(R.F)} = \frac{f_a - f_d}{f_i(1+i)} \quad (1)$$

여기서,  $f_a$  : 허용응력

$f_d$  : 고정하중에 의한 응력

$f_i$  : 활하중에 의한 응력

$i$  : 도로교설계기준의 설계 충격계수

ASD로 내하력을 평가시 기본내하율(R.F)은 활하중을 제외한 모든 영구하중이 작용하는 상태에서 허용응력까지의 여유 응력과 활하중에 의한 응력의 비(比)를 의미한다. 이 경우 활하중을 제외한 모든 하중에는 대표적으로 고정하중이 있으며, 이 외에 지점침하, 크리프, 건조수축 및 온도하중 등을 고려할 수 있다.

그러나 설계기준에서 크리프, 건조수축 등의 부하중 고려 시에는 허용응력을 소정의 비율만큼 증가시켜 검토하도록 제안되어 있기에 다수의 하중종류를 감안하는 것이 반드시 응력 여유도를 감소시키는 것은 아니며, 오히려 고정하중 및 활하중 등 주하중만 작용하는 상태에서는 허용응력의 활중을 고려하지 않으므로, 이 연구에 활용한 교량의 내하력 평가 자료에서도 주하중만으로 검토한 경우가 대부분이었다.

#### 2.1.3 한계상태법에 의한 기본내하율 평가

LSD에 의한 기본내하율 산정방법은 AASHTO의 LRFR에 따라 식(2)와 같이 적용한다.

$$\text{기본내하율(R.F)} = \frac{C - \gamma_{DC}DC - \gamma_{DW}DW \pm \gamma_P P}{\gamma_{LL}(LL + IM)} \quad (2)$$

여기서, C : 저항능력

DC, DW : 고정하중

P : 고정하중을 제외한 영구하중

LL + IM : 활하중(동적 영향 고려)

$\gamma_{DC}, \gamma_{DW}, \gamma_P, \gamma_{LL}$  : 하중 계수

LSD로 평가시에 기본내하율은 활하중을 제외한 모든 영구하중이 작용하는 상태에서 부재 저항강도의 여유도와 활하중에 의한 하중강도의 비(比)를 의미한다.

설계기준에서는 여러 가지 한계상태를 제시하고 있으며, 각 한계상태의 하중조합에 따라 하중에 고려되는 하중계수가 다르게 적용된다. 이에 이 연구에서는 각 한계상태조합에서 고정하중과 활하중의 효과가 크게 반영되어 최소의 내하율을 산정할 수 있는 극한한계상태 I 과 사용한계상태 II를 적용하여 내하력을 평가하고자 하였다.

사용한계상태 평가는 각 하중에 의한 응력을 이용하여 평가하므로 평가방법의 개념은 허용응력법과 다르지만 방법적으로는 큰 차이가 없다.

그러나 극한한계상태의 평가는 평가를 실시하는 단면의 저항상태에 따라 정모멘트부와 부모멘트부로 구분하여 실시한다. 또한 정모멘트부의 경우 단면의 형상, 단면비 및 연성도 등의 조건에 따라 조밀단면과 비조밀단면으로 구분된다.

휨을 받을 때 플랜지나 복부판에 국부좌굴이 발생하지 않고 완전소성상태에 도달한다고 가정하는 조밀단면은 단면의 소성모멘트와 항복모멘트가 저항강도를 결정하게 된다. 그렇지 않은 비조밀단면은 플랜지의 휨강도가 저항강도를 결정하게 된다. 따라서 이러한 극한한계상태의 평가방법은 사용한 계상태 평가와 달리 기존의 허용응력법과는 의미나 방법이 확연히 대별된다고 볼 수 있다.

## 2.2 내하율 평가

### 2.2.1 기본가정

#### 1) 한계상태에서의 하중보정계수

LSD에서는 하중효과에 하중보정계수를 식(3), (4)와 같이 고려한다.

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq R_r \quad (3)$$

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_i \geq 0.95 \quad (4)$$

식(4)에서  $\eta_D$ ,  $\eta_R$ ,  $\eta_i$ 는 각각 연성도, 여유성, 중요도 계수이다. 종래의 ASD에서는 실제 작용하중을 고려하여 별도의 하중보정계수가 없으므로 본 연구에서는 ASD와의 동일한 조건을 갖추기 위하여 통상적 설계수준, 통상적 여유수준 및 일반교량으로 가정하여 세가지 하중보정계수를 모두 1.0으로 적용한다.

#### 2) 한계상태에서의 하중조합

설계기준에서 제시하는 여러 가지 한계상태 중에서 고정하중 및 활하중의 효과가 크게 반영되어 최소의 내하율을 산정할 수 있는 다음의 두 가지 하중조합을 적용한다.

$$\text{극한한계 I} : 1.25DC + 1.50DW + 1.8(LL + IM) \quad (5)$$

$$\text{사용한계 II} : 1.00DC + 1.00DW + 1.3(LL + IM) \quad (6)$$

여기서, DC : 고정하중(자중, 방호벽 등)

DW : 고정하중(포장 등)

LL + IM : 활하중 (동적영향고려)

#### 3) 합성후 고정하중의 구분

강거더의 슬래브 합성 후 작용하는 고정하중인 방호벽, 포장 등의 하중에 대하여 종래의 설계 또는 내하력 평가시에 이들 하중을 별도로 구분할 필요가 없었으나, LSD에서는 이를

구분하고 있으며 적용하는 하중계수도 상이하다.

따라서 이 연구에 활용한 교량의 설계 및 내하력평가 자료에서 자중을 제외한 합성후 고정하중을 차선 수 별로 분석한 결과, 기존 자료의 합성 후 고정하중을 DC와 DW로 구분하기 위한 비율은 Table 1과 같이 적용하였다.

**Table 1** Application of Dead Load Ratio

Dead Load After Composition	Approximate Ratio of Dead Load			Application of Ratio
	2 Lanes	3 Lanes	4 Lanes	
DC	55%	50%	45%	50%
DW	45%	50%	55%	50%

#### 4) 곡선교 및 조밀단면의 구분

현행 설계기준에서는 정모멘트부 단면의 조밀성, 단면비, 연성도 등을 검토하여 조밀단면을 구분하도록 되어 있으며, 이를 만족하더라도 곡선교의 경우 비조밀단면으로 검토하여야 한다. 또한 곡선교 최대경간장의 내부 중심각이 12°이하이면 곡률에 의한 응답이 미미하여 직선교로 간주하여 정적해석을 할 수 있는 것으로 제시하고 있다. 따라서 곡률반경이 커서 이러한 조건을 만족하는 곡선교는 직선교로 간주하여 조밀단면 여부를 검토하고자 한다.

#### 5) 종방향 리브의 단면강성 기여도 적용

강박스 거더 내부에 부착되는 종방향 리브는 상,하 플랜지의 좌굴방지 보강재 역할도 있으나, 다른 보강재 또는 2차부재와 달리 플랜지와 동일한 고강도 강재를 사용하며, 단면의 중립축으로부터 이격거리가 커서 단면강성의 기여도가 크다. ASD에서도 이러한 연유로 응력검토시 종방향 리브를 포함한 단면강성을 적용하므로, LSD로 검토시에도 정모멘트부 소성모멘트 산정 및 부모멘트부 응력산정을 위한 단면강성 산정시 종방향 리브의 강성을 고려하도록 한다.

#### 6) 부모멘트부 콘크리트 바닥판의 유효성

ASD에서는 부모멘트를 받는 슬래브에 발생하는 모든 인장력을 철근이 다 받을 수 있고, 소정의 주장을 등을 만족하면 응력검토시 부모멘트부 콘크리트 바닥판을 유효한 것으로 간주할 수 있는 설계기준이 있다. 그러나 실제 설계에서는 부재력산정을 위한 거더 강성 계산시에는 부모멘트부 바닥판을 고려하지만 응력산정을 위한 거더 강성 계산시에는 바닥판을 고려하지 않고 내부 철근만 유효한 것으로 설계를 하고 있다. 또한 이 연구에 활용한 교량의 내하력 평가 자료를 분석하면 평가자의 판단에 따라 바닥판의 유효성 고려 여부가 상이한 실정이다.

LSD에서는 활하중에 의한 응력 피로범주, 영구처짐 검토

시에는 소정의 조건을 만족하면 바닥판을 유효한 것으로 볼 수 있지만, 횡강도 검토시에는 바닥판을 무시하고 철근만 유효한 것으로 검토한다.

따라서 이 연구에서도 2가지 평가방법의 일관성 있는 비교를 위하여 부모멘트부 횡강도 및 응력검토를 위한 단면강성 산정시 바닥판은 유효하지 않은 것으로 가정한다.

### 2.2.2 분석대상 교량의 개요

이 연구에서 샘플로 분석한 교량은 모두 강박스거더교로서, ASD로 설계되어 1980년부터 2014년 사이에 준공되었으며, 현재까지 공용되고 있는 총 20개의 교량을 대상으로 하였다. 대상 교량의 간략한 제원은 Table 2에 나타내었다.

대상 교량은 모두 연속교이며 1~5개의 거더로 구성되었다. 각 교량의 구조해석 결과, 부재력이 크게 발생하는 거더의 단면을 발췌하여 정모멘트부 및 부모멘트부에서 각 1~4개의 단면을 검토하였으며, 이 연구에 적용한 검토단면의 수는 Table 3에 수록하였다.

**Table 2** Status of Sample Bridges

Div,	Span Length of Bridge [m]	Num. of Girder [EA]	Width of Bridge [m]	Comp. Year
Br.01	2@50+60+2@50=260	3	20.5	2001
Br.02	50+60+70=180	2	13.0	2001
Br.03	49+3@50+35=234	3	20.0	1997
Br.04	32.5+40+48+40+32.5=193	2	16.0	1991
Br.05	2@50=100	4	23.5	1998
Br.06	2@42.5+2@60=205	4	25.0	1999
Br.07	2@57.5+2@60=235	4	25.0	1999
Br.08	2@45.3=90.6	5	26.75	1980
Br.09	63+70+63=196	2	10.9	2012
Br.10	63+70+63=196	2	10.4	2012
Br.11	3@70=210	3	19.3	2012
Br.12	2@50=100	3	17.9	2012
Br.13	54.5+55+54.5=164	1	7.9	2012
Br.14	45+65+45=155	2	11.9	2014
Br.15	39+45+37=121	2	7.9	2014
Br.16	56+35+62+50+45=248	2	9.3	2001
Br.17	45+3@50+45=240	2	12.1	1998
Br.18	45+3@60+70+60+50=405	4	23.0	2006
Br.19	31+3@41+62.5+48.5=265	1	7.5	2006
Br.20	50+60+2@45+2@50+45=345	1	7.5	2006

**Table 3** Number of Analysis Sections

Div,	(+)Moment Section	(-)Moment Section	Sum.
Number of Section	51	42	93

**Table 4** Results of Rating Factor Evaluation of Sample Bridges

Div,	R.F of (+)Moment Section		R.F of (-)Moment Section	
	ASD	LSD	ASD	LSD
Br.01	3.070~3.796	4.725~5.321	3.204~4.259	3.659~4.548
Br.02	3.808~9.551	5.626~10.883	4.497~6.175	5.253~6.524
Br.03	4.203~4.772	5.665~6.601	2.746~4.148	3.219~4.598
Br.04	2.220~2.832	3.210~3.605	1.231~1.812	1.556~2.156
Br.05	3.073~3.100	4.595~4.610	2.043~2.110	2.703~2.826
Br.06	2.149~2.264	3.352~3.474	1.536~1.562	2.193~2.288
Br.07	1.984~2.089	2.049~2.491	2.049~2.491	2.877~3.379
Br.08	3.419~3.703	1.227~1.656	1.227~1.656	2.066~2.272
Br.09	1.754~2.412	2.902~3.224	1.930	2.382
Br.10	1.805~2.463	3.015~3.330	1.739	2.183
Br.11	1.875~3.925	3.475~4.827	1.845	2.345
Br.12	2.764	4.251	2.068	2.654
Br.13	1.873~3.777	3.273~4.629	2.047	2.557
Br.14	1.535~3.827	2.455~5.230	2.228~3.102	2.724~3.616
Br.15	2.375~3.189	3.406~4.147	2.973	3.346
Br.16	2.273~3.750	3.462~4.585	1.979~2.424	2.416~2.792
Br.17	2.363~3.098	3.581~4.149	1.319~1.688	1.852~2.105
Br.18	2.325~3.932	3.678~5.882	1.623~2.275	2.161~2.961
Br.19	2.980~5.790	5.517~7.967	4.031~7.785	5.603~8.449
Br.20	1.655~2.079	2.740~3.026	2.677~2.755	3.121~3.290

### 2.2.3 내하율(R.F) 평가 결과

대상 교량의 각 검토단면에 대하여 ASD 및 LSD로 내하율을 산정하되, 정모멘트부 단면은 모두 조밀단면의 조건을 만족하는 것을 확인하였고, 각 단면의 내하율 산정결과를 정리하여 Table 4에 수록하였다.

## 3. 내하력 환산

### 3.1 정모멘트부 내하율

검토대상 교량에서 총 51개의 정모멘트부 단면에 대하여 내하율을 산정하였으며 결과를 정리하여 Table 5에 수록하였다. 정모멘트부 단면을 ASD로 평가한 내하율의 평균은 3.094, LSD의 내하율의 평균은 4.438로 나타났으며 약 1.435배의 내하율 증가가 발생하는 것으로 나타났다.

**Table 5** Rating Factor of (+)Moment Sections

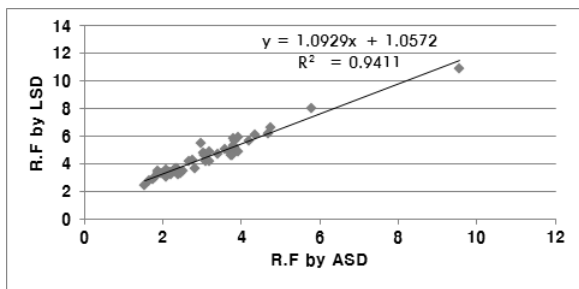
Div.	Average	Minimum	Maximum
ASD	3.094	1.535	9.551
LSD	4.438	2.455	10.883
Ratio (LSD/ASD)	1.435	1.139	1.853

이러한 증가는 재료의 허용응력으로 안전성을 확보하는 ASD보다 저항계수 및 강도감소계수가 적용되더라도 재료의 강도로 저항강도를 산정하는 LSD가 동일한 하중에 대하여 더 높은 여유도를 확보할 수 있음을 의미한다.

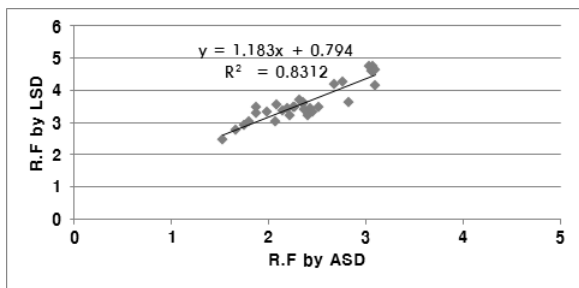
단, 검토한 단면들 중 ASD에 의한 최소내하율은 1.535이며, 이를 LSD로 평가시 내하율은 2.455로 산정되어 약 1.6배의 비율을 보이지만 2가지 평가방법의 결과에서 가장 작은 차이를 나타낸 단면에서의 내하율 비율은 1.139로 나타났다. 즉, 기존의 ASD로 내하율을 평가한 단면을 LSD로 재평가를 한다면 평균적으로 1.435배 정도 내하율이 증가할 수 있지만 1.139배 정도 증가하는 단면도 있을 수 있다는 것을 의미한다.

일반적으로 교량의 안전한 관리를 위하여 교량의 내하력은 최저내하력을 기준으로 평가를 실시한다. Table 4의 결과를 참조하면 ASD 기준으로 총 20개의 샘플 교량 중 17개 교량의 최저내하율이 평균값 3.094이하로 나타났으며, 단면의 수로는 51개 단면 중 31개 단면이 평균값 이하로 분석되었다. 따라서 이들 결과를 토대로 회귀분석을 실시하되 전체 단면의 내하율로 회귀분석한 결과와 평균값 이하의 내하율을 이용하여 회귀분석한 결과를 Fig.1에 나타내었다.

ASD에 의한 내하율과 LSD에 의한 내하율의 상관관계를 회귀분석에 의해 1차 함수로 표현하였으며, 전체 51개의 단면을 이용한 경우 LSD에 의한 내하율은 ASD의 내하율과 약 94%의 종속성이 있고, 평균내하율 이하의 31개 단면을 이용한 경우 약 83%의 종속성이 있는 것으로 나타났다.



(a) Using Total R.F



(b) Using Below Average R.F

Fig. 1 Regression Analysis of (+)Moment Sections

### 3.2 부모멘트부 내하율

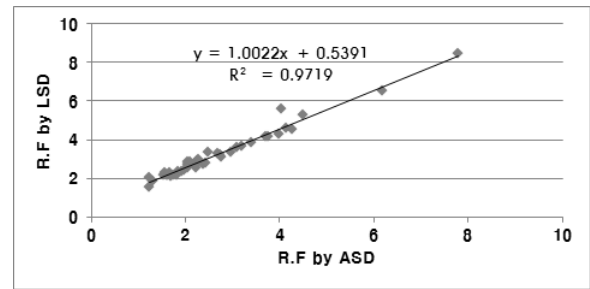
부모멘트부는 총 42개의 단면에 대하여 내하율을 산정하였으며 결과를 정리하여 Table 6에 수록하였다. 부모멘트부 단면의 경우에는 ASD에 의한 내하율 평균은 2.681, LSD의 평균은 3.226으로 약 1.203배의 내하력 증가를 나타내었다. 2가지 방법의 내하율 비(比)에서 가장 작은 값은 1.057로 나타나 2가지 평가결과가 거의 유사하게 나타날 수도 있다는 것을 확인하였다.

정모멘트부와 동일한 방법으로 총 42개의 부모멘트부 단면으로 회귀분석한 결과와 안전측의 관리를 위한 평균값 이하의 내하율이 산정된 27개 단면으로 회귀분석한 결과를 Fig.2에 나타내었다.

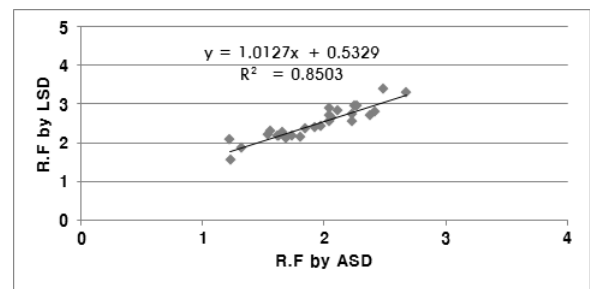
전체 42개의 단면을 이용한 경우 LSD의 내하율은 ASD에 의한 내하율과 약 97%의 종속성이 있으며, 평균내하율 이하의 27개 단면을 이용한 분석에서는 약 85%의 종속성이 있는 것으로 나타났다. 또한 2가지 관계식에서 모든 변수의 신뢰성이 99%이상의 유의한 값으로 확인되었다.

Table 6 Rating Factor of (-)Moment Sections

Div.	Average	Minimum	Maximum
ASD	2.681	1.227	7.785
LSD	3.226	1.556	8.449
Ratio (LSD/ASD)	1.203	1.057	1.684



(a) Using Total R.F



(b) Using Below Average R.F

Fig. 2 Regression Analysis of (-)Moment Sections

### 3.3 내하력 환산

#### 3.3.1 환산식을 이용한 내하력 환산

회귀분석시 ASD의 내하율에 대한 LSD의 내하율은 전체 단면을 이용한 경우에 종속성이 더 높으나 실제 교량의 내하력은 최소 내하율을 이용하므로 평균값이하의 회귀분석 결과를 환산에 적용하는 것이 더 타당한 것으로 판단되어 다음과 같은 환산식을 제안한다.

$$\text{정모멘트부} : R.F_{LSD} = 1.18 \times R.F_{ASD} + 0.79 \quad (7)$$

$$\text{부모멘트부} : R.F_{LSD} = 1.01 \times R.F_{ASD} + 0.53 \quad (8)$$

$$\text{기본내하력}_{LSD} = R.F_{LSD} \times \text{설계하중}(DB, DL24) \quad (9)$$

식(7), (8)은 내하율을 기준으로 제안한 식이며 기본 내하력은 내하율과 설계하중의 곱으로 산정되므로 식(9)와 같이 LSD에 의한 내하력을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.3.2 환산비율을 이용한 내하력 환산

회귀분석을 통한 환산식은 분석시 사용한 데이터의 범주를 벗어날 경우 오차가 발생할 수 있다. 특히, 환산식을 1차 함수로 표현함에 따른 상수의 영향으로 환산할 내하율( $R.F_{ASD}$ )이 분석에 사용한 최소 내하율보다 작으며, 1.0 부근에 가까운 값 또는 1.0 이하의 값일수록 더 큰 오차의 발생과 함께 내하율이 과대평가될 우려가 있다. 따라서 이러한 경우에는 Table 5, Table 6에 정리한 내하율의 평균 비율을 식(10)의 환산비율 $R_R$ 에 적용하되 정모멘트부는 1.4이하, 부모멘트부는 1.2이하의  $R_R$  값을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

$$\text{기본내하력}_{LSD} = R_R \times \text{기본내하력}_{ASD} \quad (10)$$

Lee (2015)의 연구에서도 2가지 설계방법에 의한 내하율의 비율이 약 1.4배 정도로 제시된 바 있으며, 본 연구에서 제시하는 환산비율과 유사성이 있으므로 제시한 환산비율 $R_R$ 을 적용하는 것도 간략한 내하력 환산에 적용 가능한 것으로 판단된다.

#### 3.3.3 결과의 검증

구조적으로 안전성을 확보하고 있는 교량은 설계단계의 안전율에서 포함된 여유도가 있으므로 본 연구에서 검토한 20개의 교량을 포함하여 대부분의 일반교량이 최저내하율 1.2~1.5 이상일 것으로 예상된다. 이는 본 연구에서 분석한 데이터 범주에 포함되므로 내하율 환산식인 식(7), (8)을 이용한 방법으로 내하율 산정결과를 정리하여 Table 7에 수록하였다.

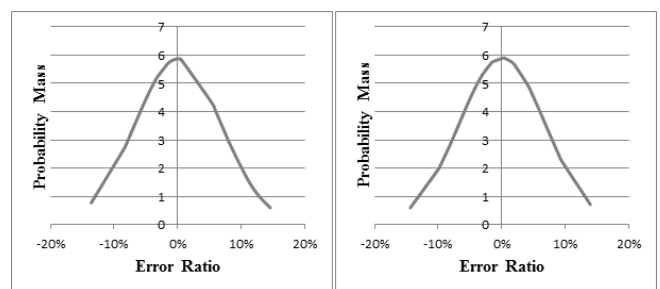
회귀분석에 사용한 정모멘트부 31개 단면, 부모멘트부 27개 단면의 ASD에 의한 내하율( $R.F_{ASD}$ )을 환산식에 적용하여

**Table 7** Verification of Conversion Formula

	Div.	(+) M Sections	(-) M Sections
(1)	$R.F_{ASD}$	1.535 ~ 3.100	1.227 ~ 2.677
(2)	$R.F_{LSD}$	2.455 ~ 4.610	2.066 ~ 3.290
(3)	Conversion $R.F_{LSD}$	2.601 ~ 4.448	1.769 ~ 3.234
Error Ratio(%) (= (3)/(2) - 1)		-13.6 ~ +14.6	-14.4 ~ +14.0
Mean of Error Ratio(%)		0.093	0.092
Standard Deviation (%)		6.798	6.760

환산 내하율을 산정하고, 당초 LSD의 내하율( $R.F_{LSD}$ )에 대한 환산 내하율을 비교하였다. 비율오차(Error Ratio)의 범위는 약±14%이내로 나타났으며, 표준편차는 약 6.8%정도로 나타났다. 이들 결과를 정규분포로 나타내면 Fig.3과 같고, LSD에 의하여 직접 내하율을 산정하는 것과 제시한 환산식에 의한 내하율의 비율오차가±10% 이내로 산정될 확률은 정, 부모멘트 모두 약 86%이며, 비율오차가±5% 이내로 산정될 확률은 54%정도 인 것으로 나타났다.

이 연구결과의 객관적인 검증을 위해 샘플로 사용한 20개의 교량의 별도의 2개 교량에 대한 내하력 평가를 실시하고 이 연구의 내하율 환산식을 적용하여 검증하였으며, 검증에 사용한 교량의 정, 부모멘트부에서 각 2개의 단면에 대한 내하율 환산 검증 결과를 Table 8에 수록하였다. 2개 교량의 검증에서 나타난 바와 같이 LSD에 의하여 직접 내하력을 산정한 내하율과 환산식을 이용한 내하율의 오차 비율은 최대 4%



(a) (+)M Sections

(b) (-)M Sections

**Fig. 3** Normal Distribution of Error Ratio

**Table 8** Verification in Application to Other Bridges

	Div.	(+) M Sections	(-) M Sections
Bridge A	$R.F_{ASD}$	2.729 ~ 2.909	3.550 ~ 4.614
	$R.F_{LSD}$	4.081 ~ 4.353	4.115 ~ 5.334
	Conversion $R.F_{LSD}$	4.010 ~ 4.223	4.116 ~ 5.190
	Error Ratio(%)	-1.7 ~ -3.0	0.0 ~ -2.7
Bridge B	$R.F_{ASD}$	2.051 ~ 2.122	2.590 ~ 2.605
	$R.F_{LSD}$	3.179 ~ 3.433	3.050 ~ 3.123
	Conversion $R.F_{LSD}$	3.210 ~ 3.294	3.146 ~ 3.161
	Error Ratio(%)	+1.0 ~ -4.1	3.1 ~ 1.2

이내로 거의 유사하게 나타났고, 오차비율의 정규분포 결과와 종합적으로 판단하면 내하율 환산식은 공학적인 신뢰성을 확보하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 현행 설계기준이 한계상태설계법(LSD)으로 변경됨에 따라 종래의 허용응력법(ASD)으로 산정된 기존 강박스 거더 교량의 내하력을 LSD에 맞추어 환산하는 방법을 모색하고자 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 이 연구과정에서 LSD에 의한 내하력은 ASD에 의한 내하력과 확연한 연관성이 있는 것을 확인하였다. 따라서, 종래의 ASD로 산정된 내하력을 LSD에 의한 내하력으로 환산함에 있어서 내하율 환산식을 이용하는 방법과 각 설계방법 결과의 비율을 내하력 환산에 직접 이용하는 2 가지 방법을 제안하였다.
- 2) 내하율 환산식은 LSD에 의해 직접 내하율을 산정하는 것과 오차범위 10%이내일 확률이 86%정도이며, 임의 교량에 적용한 결과에서도 최대 4% 이내의 오차로 확인되어 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 환산비율의 적용은 정모멘트부와 부모멘트부의 저항강도산정방법이 상이하여 각기 다른 환산비율을 제안하였고, 개략적인 내하력 환산에 유익할 것으로 판단된다.
- 4) 현재 공용 중인 교량 시설물을 관리함에 있어 내하력의 여유가 없거나 성능개선을 위하여 보강여부를 판단하여야 경우, 또는 정밀안전진단이나 성능평가 수행시 현행 설계기준에 맞추어 LSD에 의한 내하력을 확인하고자 하는 경우에도 이 연구 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 이 연구의 결과는 LSD에서 연성도, 여유성, 중요도에 관련된 하중보정계수를 모두 1.0으로 가정하고, 정모멘트부 단면은 조밀단면, 부모멘트부 단면은 콘크리트 바닥판의 효과를 무시한 단면에서 도출된 결과이다. 그러므로 향후 다양한 경우의 적용을 위하여 교량의 실제 상태에 맞추어 각종 하중보정계수의 조정여부와 비조밀 단면 및 인장을 받는 바닥판이 유효한 경우에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### References

Korea Road & Transportation Association (2016), Bridge Design Specification (In Korean).  
 Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), Steel Structure Design Specification (In Korean).  
 Korea Road & Transportation Association (2010), Bridge Design Specification (In Korean).  
 AASHTO (2003), Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance factor Rating (LRFR) of Highway Bridges.  
 NCHRP-National Cooperative Highway Research Program (2001), Manual for Condition Evaluation and Load Rating of Highway Bridges using Load and Resistance Factor Philosophy, Web Document 28 (Project C12-46) : Contractor's Final Report..  
 Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (2017), Detailed Guideline for Safety Inspection and In-Depth Safety Inspection (In Korean).  
 Lee, Yeong Il (2015), An Improved Evaluation Method of Load-Carrying-Capacity for Highway Bridges Based on Field Test Data, Thesis, Korea Maritime and Ocean University, 116-119 (In Korean).  
 Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (1999), Improving for In-Depth Safety Inspection of Bridge and Calculation Method of Load Carrying Capacity, Vol. 2 (In Korean).  
 Korea Expressway Corporation (2013), Development of Reliability-Based Safety Assessment Guideline of Expressway Bridges, 10-12 (In Korean).  
 Busan Metropolitan City (2005-2014), Bridge01-Bridge08, In-Depth Safety Inspection Report. (In Korean).  
 Busan Metropolitan City (2012, 2014), Bridge09-Bridge15 Initial Safety Inspection Report. (In Korean).  
 Seoul Metropolitan Government (2001), Bridge16 Initial Safety Inspection Report, 67-241 (In Korean).  
 Korea Road & Transportation Association (2012), Bridge17 In-Depth Safety Inspection Report, 79-144 (In Korean).  
 Busan Regional Office of Construction Management (2006), Bridge18-Bridge20 Initial Safety Inspection Report, 133-299 (In Korean).

Received : 08/10/2018

Revised : 10/14/2018

Accepted : 10/19/2018

---

**요 지** : 교량 시설물은 사회적으로 중요한 기반 시설물로서 공용기간 동안 안전한 관리가 중요하다. 도로교량의 많은 비율을 차지하고 있는 강박스거더교량의 경우 허용응력설계법으로 설계되고 내하력이 평가되어 왔으나, 최근 한계상태설계법으로 설계기준이 변경되었음에도 불구하고 내하력 평가에서는 아직까지 허용응력법을 대부분 사용하고 있는 실정이다. 이에 이 연구에서는 2 가지 설계 방법을 이용하여 다수의 교량에 대한 내하율 평가 결과를 비교하고, 기존의 허용응력법에 의한 내하력을 한계상태법에 의한 내하력으로 환산하는 방법을 모색하고자 하였다. 이 결과는 추후 교량을 관리함에 있어 보강 필요성 판단 및 한계상태법에 의한 내하력 평가에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 허용응력설계법, 한계상태설계법, 내하력, 내하율, 강박스거더교

---