

# LSD에 기초한 강박스거더교 내하율 평가의 신뢰성 및 적용성 검토

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

<sup>1</sup>공학박사, 씨티씨(주), <sup>2</sup>교수, 한국해양대학교, 건설공학과, <sup>3</sup>연구교수, 한국해양대학교, 산학협력선도대학사업단

## A Study on Reliability and Applicability of Rating Factor Evaluation for Steel Box Girder Bridge Based on Limit State Design

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

<sup>1</sup>Ph.D of Engineering, CTC Co., Ltd., Busan, 48732, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

<sup>3</sup>Research Professor, Leaders in INdustry-university Cooperation+, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

**Abstract** - In this study, a conversion method is proposed using the correlation between the rating factor by ASD(allowable strength design) and the rating factor by LSD(limit state design). then the reliability and applicability of the conversion method are verified using 32 bridges. In addition, the effect of the improvement applied to the rating factor evaluation is confirmed by comparing it with the deflection improvement ratio based on the load test. The results of this study are expected to be helpful for the conversion of rating factors from ASD to LSD, and the maintenance of bridges in use.

**Keywords** - Steel box girder, Limit state design, Improved rating factor, Load carrying capacity, Rating factor conversion

### 1. 서론

한계상태설계법에 기반한 내하력 평가에 대해서는 미국의 경우 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) LRFD(load and resistance factor design)를 기본 설계법으로 하는 신뢰도 기반의 내하력 평가방법인 LRFR(load and resistance factor rating)을 2003년도부터 공식 적용하고 있다. 이와 관련하여 국내의 경우에도 Han and Yang<sup>[9]</sup>은 각 내하율 평가방법을 비교하여 하중계수설계법(LFD, load factor design)과 하중저항계수설계법(LRFD)은 허용응력설계법(ASD, allowable strength design)에 비해 24% 이상 내하율이 향상되는 것을 확인하였고, Lim<sup>[4]</sup>은 단일 교량에 대한 한계상태설계법과 LRFR에 의한 내하

율을 비교하였으며, 한국도로공사 도로교통연구원(Korean Express Corporation Research Institute[KECRI]<sup>[3]</sup>)은 신뢰도 기반의 교량 안전성 평가 지침을 제안하는 등 관련 연구가 수행되고 있다. 그러나, 실제 교량의 거동에 근접하는 내하력 평가에서 이를 공식적으로 적용하기 위해서는 다양한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Noh *et al.*<sup>[1]</sup>의 선행연구에서는 교량의 거동을 실측한 재하시험에 근거하여 기존 내하력 평가에서의 구조해석 및 내하력 평가에서의 문제점을 제시하고 개선사항으로 다음의 내용을 제시하였다.

구조해석에서는 상부 슬래브 바닥판 전체 폭의 유효성 고려 및 일체형 난간의 합성효과 고려, 그리고 콘크리트 재령에 따른 강도증대 및 탄성계수 변화의 적용을 제시하였다.

그리고 내하력 평가단계도 상부 바닥판과 일체형 난간의 효과를 고려한 합성거더의 단면 특성치 산정과 콘크리트의 탄성계수 변화의 적용을 제안하였다.

Noh *et al.*<sup>[2]</sup>의 선행연구에서는 32개의 강박스거더교량에 대하여 Noh *et al.*<sup>[1]</sup>이 제시한 내하력 평가 단계에서의 문제점과 개선사항을 적용할 수 있는 신뢰도 기반의 설계방법인 한계상태설계법(limit state design, 이하 LSD)에 기초한 내

Note.-Discussion open until October 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 09, 2020; revised February 01, 2021; approved on February 01, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-51-410-4464 Fax. +82-51-410-4460

E-mail. kyungks@kmou.ac.kr

하중 평가방법을 제안하였으며, 또한 기존의 허용응력설계법(이하 ASD)과 현행 LSD에 의한 내하중을 비교하여 ASD로 평가한 내하중과 LSD에 의한 내하중의 상호관계를 도출하였다.

이 연구에서는 선행한 2가지 연구<sup>[1],[2]</sup>에서 32개 교량의 각 내하중 평가결과에서 도출된 ASD와 LSD에 의한 내하중 상호관계로부터, ASD로 설계되고 공용 중인 강합성거더교를 관리함에 있어 설계하중에 대한 내하중의 여유가 충분하지 않거나 성능개선을 위해 보강여부를 판단하여야 하는 경우, 또는 현행 도로교설계기준에 따라 LSD에 의한 내하중을 확인하고자 하는 경우에 활용할 수 있는 내하중 환산방법을 제시하고자 한다.

또한, ASD에서 LSD로의 내하중 환산방법에 대한 검증을 통해 신뢰성 확인 및 적용성을 검토하고, 더불어 선행연구(Noh *et al.*<sup>[1]</sup>)에서 제안한 인장을 받는 상부바닥판 및 일체형 방호벽 유효성, 콘크리트 탄성계수의 변화와 같은 개선사항의 적용효과도 검증하고자 한다.

## 2. ASD에서 LSD로의 내하중 환산 방법

### 2.1 내하중 환산 방법 및 대상 교량

이 연구에서는 선행연구<sup>[2]</sup>에서 수행된 LSD에 의한 내하중 평가 자료를 활용하여 내하중 환산 방법 및 신뢰성을 검증하였다. 그 내용을 간단히 정리하면 다음과 같다.

ASD를 이용하여 내하중이 평가된 32개 교량의 154개 단면에 대해 LSD에 의한 식 (1)을 이용하여 내하중(RF)을 재평가하되, 개선사항의 적용여부에 따라 2가지 방법으로 평가하였다. 개선사항을 적용하지 않은 설계기준에 근거한 평가방법을 ‘개선 전 LSD에 의한 내하중 평가(이하 LSD\_1)’로 정의하고 개선사항을 적용한 평가방법을 ‘개선된 LSD에 의한 내하중 평가(이하 LSD\_2)’로 정의하였다.

$$RF = \frac{\phi_A R_r - \gamma_{DC} DC - \gamma_{DW} DW \pm \gamma_P P}{\gamma_{AL} \gamma_L (LL + IM)} \quad (1)$$

2가지 평가방법은 내하중 평가 단계에서 차이점을 두었으며 평가방법의 적용 및 차이점은 Table 1에, 그리고 연구에 활용한 교량의 개요를 Table 2에 나타내었다. Table 1에 대한 상세내용과 식 (1)에서의 계수 등에 대한 내용은 선행연구(Noh *et al.*<sup>[2]</sup>)를 참조하기 바란다.

**Table 1.** Evaluation method applied in this study

Item	ASD	LSD_1		LSD_2	
		Ultimate I	Service II	Ultimate I	Service II
Slab under tension	N.C	N.C	N.C	N.C	C
Modulus of elasticity of concrete	D.S	D.S	D.S	Aging considerations	
Effect of integrated barrier	N.C	$\eta_D = 1.0$ $\eta_R = 1.0$ $\gamma_{AL} = 1.0$	N.C	$\eta_D = 0.95$ $\eta_R = 0.95$ $\gamma_{AL} = 0.90$	N.C

Ultimate I: ultimate limit state I, Service II: service limit state II, N.C or C: no consideration or consideration, D.S: design strength,  $\eta_D$ : load modify factor relating to ductility,  $\eta_R$ : load modify factor relating to redundancy,  $\eta_{AL}$ : evaluation live load factor

### 2.2 내하중 환산 방법

선행연구<sup>[2]</sup>에서 수행된 ASD와 LSD의 내하중 상관관계로부터 회귀분석에 의한 ASD에서 LSD로의 내하중 환산식을 정리하여 Table 3에 제시하였으며, 환산식의 적합성(결정계수)을 Table 4에 나타내었다.

Table 3에서 상수항이 0이 아닌 1차 함수의 선형 환산식(linear equation)은 상수의 영향으로 환산할 ASD에 의한 내하중( $RF_{ASD}$ )이 분석에서 사용된 32개 교량, 154개 단면의 최소 내하중인 1.227(Table 5 참조)보다 작고 0에 가까운 값일수록 오차가 커지고 LSD로 환산된 내하중( $RF_{LSD}$ )이 과대 평가될 우려가 있다. 반면, 상수항이 0인 비례식(proportional equation)의 경우에는  $RF_{ASD}$ 가 클수록 환산된  $RF_{LSD}$ 의 오차도 크다. 이러한 경향은 내하중의 상관관계를 분석한 선행연구<sup>[2]</sup>에서도 동일하게 확인할 수 있다.

2차 함수의 경우에도 1차 함수와 같이 상수항의 여부에 따라 2가지 식을 제안할 수 있겠으나, 상수항의 여부에 큰 영향을 받지 않고 2가지 식의 값과 계수 등의 차이가 근소한 것으로 확인되어 Table 3에서는 작은 값의 내하중 환산에도 적용할 수 있는 상수항이 0인 2차 함수 형태의 환산식(quadratic equation)을 제시하였다.

제시한 3가지 환산식의 장·단점은 있겠으나,  $RF_{ASD}$ 에 대하여 LSD\_1 및 LSD\_2로 평가한 내하중인  $RF_{LSD}$ 의 적합성을 정리한 결과는 Table 4와 같다. 상수항이 있는 1차 선형식을 적용하는 경우가 적합성이 평균 97%로 가장 높게 나타났으므로, 내하중 환산식에 의한  $RF_{LSD}$  환산결과의 신뢰도가 높을 것으로 예상된다.

**Table 2.** Status of sample bridges

Id.	Span configuration (m)	No. of girders (EA)	Width (m)	No. of lanes	Completion year	Analysis sections (EA)			Remark
						(+) moment	(-) moment	Sum	
Br.01	56+35+62+50+45 = 248	2	9.3	2	2001	4	4	8	-
Br.02	57+39+48+48 = 192	1	5.8	1	2001	4	3	7	One girder curved bridge
Br.03	49+3@50+35 = 234	3	20.0	4	1997	4	4	8	-
Br.04	2@50+60+2@50 = 260	3	20.5	4	2001	4	4	8	-
Br.05	50+60+70 = 180	2	13.0	2	2001	3	2	5	-
Br.06	63+70+63 = 196	2	10.9	2	2012	2	1	3	-
Br.07	63+70+63 = 196	2	10.4	2	2012	2	1	3	-
Br.08	3@70 = 210	3	19.3	3	2012	2	1	3	-
Br.09	2@50 = 100	3	17.9	4	2012	1	1	2	-
Br.10	54.5+55+54.5 = 164	1	7.9	1	2012	2	1	3	One girder
Br.11	32.5+40+48+40+32.5 = 193	2	16.0	4	1991	3	2	5	-
Br.12	45+65+45 = 155	2	11.9	3	2014	4	2	6	-
Br.13	39+45+37 = 121	2	7.9	2	2014	2	1	3	-
Br.14	3@40 = 120	2	7.9	2	2014	2	1	3	Curved bridge
Br.15	55+60+2@55 = 230	2	8.0	1	2006	4	3	7	Curved bridge
Br.16	45+3@60+70+60+50 = 405	4	23.0	5	2006	4	4	8	-
Br.17	31+3@41+62.5+48.5 = 265	1	7.5	1	2006	2	2	4	One girder
Br.18	50+60+2@45+2@50+45 = 345	1	7.5	1	2006	2	2	4	One girder
Br.19	2@50 = 100	4	23.5	6	1998	2	2	4	-
Br.20	2@42.5+2@60 = 205	4	25.0	6	1999	2	2	4	-
Br.21	2@57.5+2@60 = 235	4	25.0	6	1999	2	2	4	-
Br.22	2@45.3 = 90.6	5	26.8	6	1980	2	2	4	U-shape girder
Br.23	45+3@50+45 = 240	2	12.1	2	1998	2	2	4	-
Br.24	30+62 = 92	3	14.8	2	2003	3	3	6	-
Br.25	2@50 = 100	2	12.1	2	2003	2	2	4	-
Br.26	40+50+40 = 130	2	12.6	2	2003	1	1	2	-
Br.27	3@50+40+35 = 225	1	9.0	1	2003	2	2	4	One girder
Br.28	50+60+70+60+50 = 290	1	9.0	1	2003	2	2	4	One girder
Br.29	3@50+2@60+4@50 = 470	2	16.5	2	2003	2	2	4	-
Br.30	3@50+60+50 = 260	2	16.5	2	2003	2	2	4	-
Br.31	55+2@70+55 = 250	3	16.5	4	2006	4	4	8	-
Br.32	55+2@60+55 = 230	3	16.5	4	2006	4	4	8	-
Total						83	71	154	-

**Table 3.** Equation for conversion of rating factor

Item		Conversion equation			
		Linear equation	Proportional equation	Quadratic equation	
LSD_1	(+)M	Compact section	$RF_{LSD} = 1.080RF_{ASD} + 1.078$	$RF_{LSD} = 1.381RF_{ASD}$	$RF_{LSD} = -0.0565(RF_{ASD})^2 + 1.628RF_{ASD}$
		Non-compact section	$RF_{LSD} = 0.895RF_{ASD} + 0.550$	$RF_{LSD} = 1.049RF_{ASD}$	$RF_{LSD} = -0.0281(RF_{ASD})^2 + 1.171RF_{ASD}$
	(-)M	$RF_{LSD} = 0.966RF_{ASD} + 0.594$	$RF_{LSD} = 1.140RF_{ASD}$	$RF_{LSD} = -0.0354(RF_{ASD})^2 + 1.290RF_{ASD}$	
LSD_2	(+)M	Compact section	$RF_{LSD} = 1.203RF_{ASD} + 1.086$	$RF_{LSD} = 1.507RF_{ASD}$	$RF_{LSD} = -0.0582(RF_{ASD})^2 + 1.761RF_{ASD}$
		Non-compact section	$RF_{LSD} = 1.050RF_{ASD} + 0.766$	$RF_{LSD} = 1.264RF_{ASD}$	$RF_{LSD} = -0.0390(RF_{ASD})^2 + 1.434RF_{ASD}$
	(-)M	$RF_{LSD} = 1.141RF_{ASD} + 0.808$	$RF_{LSD} = 1.377RF_{ASD}$	$RF_{LSD} = -0.0481(RF_{ASD})^2 + 1.581RF_{ASD}$	

**Table 4.** A measure of how well conversion equation fits RFs

Item			Coefficient of determination (%)		
			Linear eq.	Proportional eq.	Quadratic eq.
LSD_1	(+M)	Comp. **	94.6	85.9	93.9
		Non-comp. **	97.8	94.4	97.3
	(-M)		97.3	93.5	96.7
LSD_2	(+M)	Comp.	98.6	91.2	98.2
		Non-comp.	96.9	92.1	96.3
	(-M)		96.5	91.5	95.7
Average			97.0	91.4	96.4

\*Proportional eq.: linear eq. without constant term

\*\*Comp.: compact section

\*\*\*Non-comp.: non-compact section

Lee<sup>[5]</sup>는 국내 도로 현황 분석을 참조하면 강합성 박스거더교는 공용년수 20년 이하가 90% 이상이고, 현재 공용되고 있는 대부분의 강합성 박스거더교는 상태등급 B등급 이상의 양호한 상태인 것으로 보고하였다. 그러므로 공용년수 20년 이하의 강합성 박스거더교의  $RF_{ASD}$ 는 이 연구에서 수집한 32개 교량의 최소 내하율인 약 1.2 이상의 내하율을 대부분 확보하고 있을 것으로 예상된다.

이러한 환경에서 독립변수인  $RF_{ASD}$ 의 값을 대입하여 계산된  $RF_{LSD}$ 는 상수항이 0이 아닌 1차 함수 선형식이 가장 높은 신뢰도의 환산결과를 제공할 것으로 판단된다. 다만, 공용기간이 증대되어 안전등급과 상태등급이 저하되고, 내하율이 1.2보다 충분히 작을 정도로 감소가 예상되는 경우에는 상수에 의한 오차를 감안하여 상수항이 없는 환산 비례식을 사용하는 것도 바람직할 것이다.

또한, 내하율  $RF_{ASD}$ 와  $RF_{LSD}$ 의 상관관계를 이용한 2가지 1차 함수 환산식에서의 교차점을 계산하면, LSD\_1과 LSD\_2에 관계없이 환산식의 교차점은  $RF_{ASD}$ 가 약 3.4 - 3.6의 값으로 산정된다. 예를 들어, 독립변수인  $RF_{ASD}$ 의 값을 크기에 따라 순차적으로 환산식에 대입하여 정리하면, LSD\_1의 조밀 단면에 대한 선형식 및 비례식에서의 교차점이 되는  $RF_{ASD}$ 는 3.6이다.

Table 3의 상수항이 0인 비례식은 독립변수인  $RF_{ASD}$  값을 대입하여 계산된  $RF_{LSD}$ 가  $RF_{ASD}$ 의 값이 커질수록 오차가 커질 가능성도 있다.

그러나 교차점인 3.4 - 3.6 정도의  $RF_{ASD}$  값은 선행연구<sup>[2]</sup>에서 기술한 것과 같이 이 연구의 분석에 사용한 샘플 교량 32개의 평균 내하율인 정모멘트 단면의 3.037, 부모멘트 단면의 2.832보다 큰 값이다.

따라서 일반적으로 교량의 안전성은 최저 내하율을 적용하여 평가한다는 점을 고려한다면, 교차점 이하의 범주에서 내하율 환산은 Table 3에서의 비례식이 선형식보다 다소의 오차가 포함되더라도 훨씬 직관적이고 간편한 환산을 제공할 수도 있다.

Table 3의 2차 함수 환산식은 Table 4에 나타난 것과 같이 1차 선형식과 유사한 높은 적합성을 가지며, 샘플 교량의 내하율 96%가 해당되어 교량 내하율의 일반적인 범주로 간주할 수 있는 내하율 5.0 이하의 범위에서는 2가지 1차 함수식과 달리 내하율  $RF_{ASD}$ 의 값과 상수항에 따른 오차를 특별히 감안하지 않고 적용할 수 있다.

다만, Table 3에 제시한 2차 함수 환산식에서는 계수의 영향으로  $RF_{ASD}$ 의 값이 커짐에 따른  $RF_{LSD}$ 의 상승폭은 2차 함수의 특성 때문에 점차 감소하게 된다. 그러므로 2차 함수 환산식은  $RF_{ASD}$ 가 8.0 이상 큰 내하율의 환산에서는 적용하지 않는 것이 바람직하다.

### 3. ASD에서 LSD로의 내하율 환산의 검증

#### 3.1 LSD\_1에 의한 내하력 환산의 검증

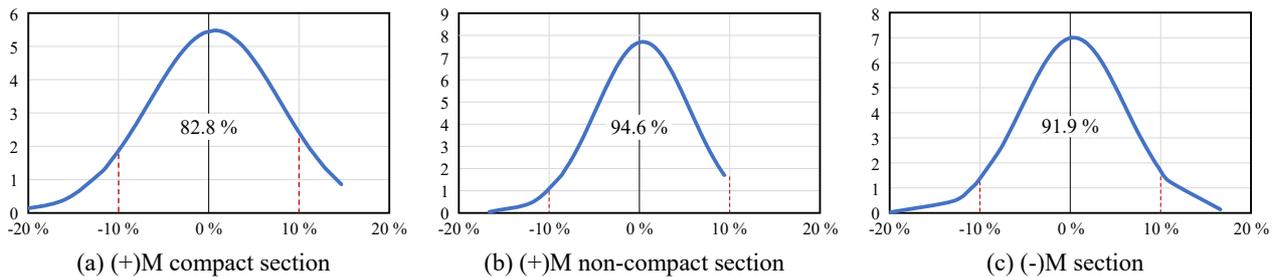
##### 3.1.1 환산식의 검증

Table 1에 나타난 개선 전 LSD에 의한 내하력 평가방법 (LSD\_1)에 대하여 이 연구에서 제안한 내하율 환산식을 검증하고자 한다. 샘플로 활용한 32개 교량의 총 154개 단면에서 정모멘트부(+M) 83개 단면, 부모멘트부(-M) 71개 단면의 내하율  $RF_{ASD}$ 를 Table 3의 LSD\_1에 대한 9가지 환산식에 적용하여 환산 내하율(converted  $RF_{LSD}$ )을 산정하였다. 그리고 선행연구<sup>[2]</sup>에서 LSD\_1에 의해 직접 계산된 내하율(calculated  $RF_{LSD}$ )를 참값으로 간주하여 각 환산식에 의한 환산  $RF_{LSD}$ 와 비교한 결과를 Table 5에 나타내었다. 또한 Fig. 1에는 1차 함수 선형 환산식에 대한 오차비율의 정규분포도의 일례를 나타내었다.

Table 5로부터 Table 3에서 제시한 상수항이 0이 아닌 1차 선형식으로 환산한 각 평가단면 위치에서의 환산  $RF_{LSD}$ 는 선행연구<sup>[2]</sup>에서 LSD\_1 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 보다 약 0.4% - 0.7% 정도 크게 산정되는 경향이 있으며, 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 82.8% - 94.6%로 나타나 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 오차 비율  $\pm 5\%$  이내로 환산될 확률은 50.6% - 66.4%로 나타나 신뢰성이 저하하는 경향을 나타내었다.

**Table 5.** Verification of conversion by each equation of LSD\_1

Item		Equation	Section type		
			(+)M compact section	(+)M non-compact section	(-)M section
①	Calculated $RF_{ASD}$	-	1.441 - 9.551	1.441 - 9.551	1.227 - 8.095
②	Calculated $RF_{LSD}$	-	2.332 - 10.884	1.675 - 8.944	1.530 - 7.942
③	Converted $RF_{LSD}$	Linear	2.632 - 11.391	1.840 - 9.098	1.779 - 8.442
		Proportional	1.990 - 13.190	1.512 - 10.019	1.399 - 9.228
		Quadratic	2.299 - 10.395	1.629 - 8.621	1.530 - 8.123
Percent error (= (③ - ②) / ②, %)		Linear	-22.3 - 14.7	-16.6 - 9.4	-19.9 - 16.6
		Proportional	-25.2 - 21.2	-18.6 - 12.9	-31.6 - 16.2
		Quadratic	-21.3 - 15.6	-15.6 - 10.4	-25.2 - 10.7
Average of percent error (%)		Linear	0.677	0.381	0.562
		Proportional	-5.658	-4.099	-5.016
		Quadratic	-0.898	-0.925	-1.115
Standard deviation of percent error (%)		Linear	7.286	5.179	5.701
		Proportional	10.436	7.438	8.634
		Quadratic	8.214	5.900	6.919
Probability of percent error within $\pm 10\%$ (%)		Linear	82.8	94.6	91.9
		Proportional	59.5	75.7	67.7
		Quadratic	77.4	90.6	84.6
Probability of percent error within $\pm 5\%$ (%)		Linear	50.6	66.4	61.7
		Proportional	32.1	43.8	37.6
		Quadratic	45.5	59.7	52.4



**Fig. 1.** Normal distribution of error ratio by linear equation of LSD\_1 (example)

한편, Table 5로부터 Table 3에서 제시한 상수항이 0인 1차 비례식으로 환산한 각 평가단면 위치에서의 환산  $RF_{LSD}$  는 LSD\_1 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$  보다 약 4% - 6% 정도 작게 산정되는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 59.5% - 75.7%로 나타났다. 이로부터 상수항이 0인 1차 비례식에 의한  $RF_{LSD}$ 는 상수항이 있는 1차 선형식에 비하여 신뢰성이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Table 4에서 환산  $RF_{LSD}$  산정을 위한 1차 비례식의 적합성(결정계수)이 다소 낮았던 것과 환산식의 상수를 0으로 설정함에 따른 환산 내하력의 저평가가 원인으로 판단된다.

그리고 Table 5로부터 Table 3에서 제시한 2차 함수식으로 환산한  $RF_{LSD}$ 는 LSD\_1 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$  보다 약 1% 정도 작게 산정되는 경향이 있으나, 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 77.4% - 90.6%로 나타나 상수항이 0인 1차 비례식에 비해 높은 신뢰성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

이상과 같이 3가지 환산식에 대한 검증 결과에서 1차 함수 환산식 중 상수항이 0이 아닌 선형식에 의한 환산이 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 82.8% - 94.6%로 가장 높게 나타나며, 상대적으로 오차가 작고 신뢰성이 높은 결과를 제공하는 것으로 나타났다.

3.1.2 타 교량에의 적용을 통한 검증

앞에서 논의한  $RF_{LSD}$  환산식을 산정하는데 사용한 샘플 교량 32개 외에 별도의 2개 교량에 대하여 LSD\_1 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 와 환산한  $RF_{LSD}$ 를 비교하여 ASD에서 LSD로의 내하율 환산식의 적용성을 검증하고자 하였다.

Table 6에는 검증에 사용한 2개 교량의 간략한 제원 특성을 나타내었다.

대상 교량의 정모멘트부와 부모멘트부에서 각 2개의 단면을 선정하여 총 8개 단면에 대해 ASD와 LSD\_1에 의한 내하율을 산정하였으며, 제안한 3가지 형식의 환산식을 이용한 환산 내하율과 비교하여 Table 7에 정리하였다.

Table 7에 정리한 Bridge A의 경우 1차 선형식과 2차 함수식을 이용한 환산 내하율(converted  $RF_{LSD}$ )은 LSD\_1 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 와 오차비율 약 5% 이내로 비교적 유사하게 평가되었으며, 1차 비례식에 의한 환산 내하율은 다른 환산식보다 상대적으로 큰 약 8% 이내의 오차를 나타내는 것으로 확인되었다.

Bridge B의 경우에도 1차 선형식과 2차 함수식을 이용한 환산 내하율이 LSD\_1 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 와 오차비율 약 7% 이내에서 비교적 유사하게 평가되었으며, 1차 비례식에 의한 환산 내하율은 다른 환산식보다 큰 약 12%의 오차가 나타나는 것으로 확인되었다.

이러한 결과는  $RF_{LSD}$  환산식의 검증에서 확인한 것과 같이 오차  $\pm 10\%$  이내의 오차확률이 가장 큰 상수항이 0인 1차 비례식의 환산  $RF_{LSD}$ 가 실제 다른 교량의 적용에서도 오차가 가장 크게 나타나며, 3가지 식 중에서 상대적으로 신뢰도가 낮은 결과를 제공한다고 볼 수 있다.

이로부터 상수항이 0인 1차 비례식의 환산  $RF_{LSD}$  결과는 2개 교량의 적용사례에서 오차가 약 10% 정도의 수준이므로 상대적으로 높은 신뢰도를 확보한다고 할 수 없다. 그러나 Table 7에 나타난 것과 같이 환산  $RF_{LSD}$ 가 LSD 방법으로 직접 계산한  $RF_{LSD}$ 보다 작게 평가되어 안전측으로 환산된다는 점과 단순 비례로 환산 내하율을 직관적으로 쉽게 산정할 수 있다는 점은 여전히 활용도가 있을 수 있다.

Table 6. Status of sample bridges for verification

Id.	Span configuration (m)	No. of girders (EA)	Width (m)	Completion year	Remark
Br.A	56+75+55 = 186	3	18.0	2001	-
Br.B	59+58+50 = 167	1	5.8	2001	One girder curved bridge

Table 7. Verification of conversion by each equation of LSD\_1 for sample bridges

Item	Equation	Section type			
		(+)M compact section	(+)M non-compact section	(-)M section	
Bridge A	① Calculated $RF_{ASD}$	-	2.729 - 2.909	2.729 - 2.909	3.550 - 4.614
	② Calculated $RF_{LSD}$	-	4.081 - 4.353	3.011 - 3.212	4.115 - 5.334
	③ Converted $RF_{LSD}$	Linear	4.023 - 4.218	2.992 - 3.154	4.023 - 5.051
		Proportional	3.769 - 4.017	2.863 - 3.052	4.047 - 5.260
		Quadratic	4.022 - 4.258	2.986 - 3.169	4.133 - 5.198
	Percent error (= (③ - ②) / ②, %)	Linear	-3.1 - -1.4	-1.8 - -0.6	-5.3 - -2.2
		Proportional	-7.7	-5.0 - -4.9	-1.7 - -1.4
Quadratic		-2.2 - -1.4	-1.3 - -0.8	-2.5 - 0.4	
Bridge B	① Calculated $RF_{ASD}$	-	2.724 - 2.830	2.724 - 2.830	2.802 - 2.926
	② Calculated $RF_{LSD}$	-	4.158 - 4.423	3.011 - 3.212	3.414 - 3.491
	③ Converted $RF_{LSD}$	Linear	4.018 - 4.132	2.988 - 3.154	3.301 - 3.421
		Proportional	3.762 - 3.908	2.857 - 2.969	3.194 - 3.336
		Quadratic	4.015 - 4.155	2.981 - 3.089	3.337 - 3.471
	Percent error (= (③ - ②) / ②, %)	Linear	-6.6 - -3.4	-1.3 - -0.8	-3.3 - -2.0
		Proportional	-11.6 - -9.5	-5.1 - -4.9	-6.4 - -4.5
Quadratic		-6.1 - -3.4	-1.1 - -1.0	-2.3 - -0.6	

이상의 검증으로부터 1차 선형식과 2차 함수식의 환산 내하율 평가결과는 오차  $\pm 10\%$  이내의 정확도가 비교적 높았고, 실제 2개 교량의 적용사례에서도 모두  $10\%$  미만의 오차를 보이고 있으므로 공학적으로 만족할 만한 환산결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 LSD\_2에 의한 내하력 환산의 검증

#### 3.2.1 환산식의 검증

Table 1에 나타난 개선사항을 반영한 내하력 평가방법 (LSD\_2)에 대해서도 이 연구에서 제안한 내하율 환산식을

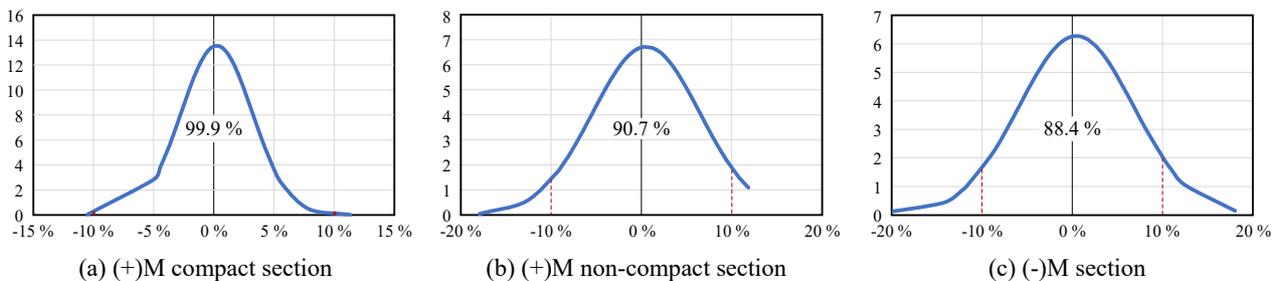
검증하고자 한다. 샘플로 활용한 32개 교량의 정모멘트부 83개 단면, 부모멘트부 71개 단면을 검증에 활용하였다.

ASD에 의한 내하율  $RF_{ASD}$ 를 Table 3의 LSD\_2에 대한 각 환산식에 적용하여 환산 내하율(converted  $RF_{LSD}$ )을 산정하고, 선행연구<sup>[2]</sup>에서 LSD\_2에 의해 직접 계산된 내하율  $RF_{LSD}$ 를 참값으로 간주하여 비교한 결과를 Table 8에 나타내었다. 그리고 Fig. 2에는 1차 함수 선형 환산식에 대한 오차비율의 정규분포도의 일례를 나타내었다.

Table 8로부터 Table 3에서 제시한 상수항이 0이 아닌 1차 선형식으로 환산한 각 평가단면 위치에서의 환산  $RF_{LSD}$ 는 선행연구<sup>[2]</sup>에서 LSD\_2 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$

**Table 8.** Verification of conversion by each equation of LSD\_2

Item		Equation	Section type		
			(+)M compact section	(+)M non-compact section	(-)M section
①	Calculated $RF_{ASD}$	-	1.441 - 9.551	1.441 - 9.551	1.227 - 8.095
②	Calculated $RF_{LSD}$	-	2.532 - 12.003	2.053 - 10.577	1.874 - 9.415
③	Converted $RF_{LSD}$	Linear	2.820 - 12.576	2.279 - 10.795	2.208 - 10.044
		Proportional	2.172 - 14.393	1.821 - 12.072	1.690 - 11.147
		Quadratic	2.417 - 11.510	1.985 - 10.138	1.867 - 9.646
Percent error (= (③ - ②) / ②, %)		Linear	-10.5 - 11.4	-18.0 - 11.8	-22.1 - 18.1
		Proportional	-25.5 - 20.2	-20.7 - 15.2	-34.5 - 18.4
		Quadratic	-12.0 - 7.4	-17.3 - 12.2	-27.6 - 12.4
Average of percent error (%)		Linear	0.260	0.496	0.457
		Proportional	-5.650	-4.625	-5.444
		Quadratic	-1.156	-0.970	-1.201
Standard deviation of percent error (%)		Linear	2.946	5.937	6.353
		Proportional	7.689	8.500	9.571
		Quadratic	4.308	6.764	7.683
Probability of percent error within $\pm 10\%$ (%)		Linear	99.9	90.7	88.4
		Proportional	69.3	69.4	62.7
		Quadratic	97.5	85.7	80.2
Probability of percent error within $\pm 5\%$ (%)		Linear	90.9	59.9	56.8
		Proportional	38.3	38.9	34.2
		Quadratic	73.7	53.6	48.0



**Fig. 2.** Normal distribution of error ratio by linear equation of LSD\_2 (example)

와 오차 비율의 평균이 0.5% 이내로 작으며, 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 88.4% - 99.9%로 나타나 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 그러나 오차 비율  $\pm 5\%$  이내로 환산될 확률은 56.8% - 90.9%로 나타나 신뢰성이 저하하는 경향을 나타내었다.

한편, Table 8로부터 Table 3에서 제시한 상수항이 0인 1차 비례식으로 환산한 각 평가단면 위치에서의 환산  $RF_{LSD}$ 는 LSD\_2 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 보다 약 5% 정도 작게 산정되는 경향이 있으며, 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 62.7% - 69.4%로 나타났다. 이로부터 상수항이 0인 1차 비례식에 의한 환산  $RF_{LSD}$ 는 상수항이 있는 1차 선형식에 비하여 신뢰성이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 LSD\_1에서와 같이 Table 4에 나타난 각 환산식의 적합성에서 1차 비례식의 상대적으로 낮은 결정계수와 환산식의 상수를 0으로 설정함에 따른 환산 내하력의 저평가가 원인으로 판단된다.

그리고 Table 8로부터 Table 3에서 제시한 2차 함수식으로 환산한  $RF_{LSD}$ 는 LSD\_2 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 보다 약 1% 정도 작게 산정되는 경향이 있으나, 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 80.2% - 97.5%로 나타나 상수항이 0인 1차 비례식에 비해 높은 신뢰성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

이상과 같이 3가지 환산식에 대한 검증 결과에서 1차 함수 환산식 중 상수항이 0이 아닌 1차 선형식에 의한 환산이 오차 비율  $\pm 10\%$  이내로 환산될 확률이 88.4% - 99.9%로 가장 높게 나타나며, 상대적으로 오차가 작고 신뢰성이 높은 결과를 제공하는 것으로 나타났다.

### 3.2.2 타 교량에의 적용을 통한 검증

LSD\_1의 검증에서와 같이 환산식을 산정하는데 사용한 32개 교량 외에 Table 6의 2개 교량에 대하여 LSD\_2 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 와 환산  $RF_{LSD}$ 를 비교하여 ASD에서 LSD로의 환산식의 적용성을 검증하였다.

대상 교량의 정모멘트부와 부모멘트부에서 각 2개의 단면을 선정하여 총 8개 단면에 대해 ASD와 LSD\_2에 의한 내하율을 산정하였으며, 제안한 3가지 형식의 환산식을 이용한 환산 내하율과 비교하여 Table 9에 정리하였다.

Table 9에 정리한 Bridge A의 경우 1차 선형식과 2차 함수식을 이용한 환산 내하율(converted  $RF_{LSD}$ )은 LSD\_2 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 와 오차비율 약 6% 이내로 비교적 오차가 작은 것으로 평가되었으며, 1차 비례식에 의한 환산 내하율은 다른 환산식보다 상대적으로 높은 오차를 나타내는 것으로 확인되었다.

Bridge B의 경우에도 1차 함수식과 2차 함수식을 이용한

**Table 9.** Verification of conversion by each equation of LSD\_2 for sample bridges

Item		Equation	Section type			
			(+)M compact section	(+)M non-compact section	(-)M section	
Bridge A	①	Calculated $RF_{ASD}$	-	2.729 - 2.909	2.729 - 2.909	3.550 - 4.614
	②	Calculated $RF_{LSD}$	-	4.423 - 4.702	3.659 - 3.897	4.984 - 6.452
	③	Converted $RF_{LSD}$	Linear	4.369 - 4.586	3.631 - 3.820	4.859 - 6.073
			Proportional	4.113 - 4.384	3.449 - 3.677	4.888 - 6.353
			Quadratic	4.372 - 4.630	3.623 - 3.841	5.006 - 6.271
	Percent error (= (③ - ②) / ②, %)	Linear	-2.5 - -1.2	-2.0 - -0.8	-5.9 - 2.5	
		Proportional	-7.0 - -6.8	-5.7 - -5.6	-1.9 - -1.5	
Quadratic		-1.5 - -1.1	-1.4 - -1.0	-2.5 - 0.4		
Bridge B	①	Calculated $RF_{ASD}$	-	2.724 - 2.830	2.724 - 2.830	2.802 - 2.926
	②	Calculated $RF_{LSD}$	-	4.506 - 4.792	3.666 - 3.919	4.158 - 4.241
	③	Converted $RF_{LSD}$	Linear	4.363 - 4.490	3.626 - 3.738	4.005 - 4.147
			Proportional	4.105 - 4.265	3.443 - 3.577	3.858 - 4.029
			Quadratic	4.365 - 4.518	3.617 - 3.746	4.052 - 4.214
	Percent error (= (③ - ②) / ②, %)	Linear	-6.3 - -3.2	-4.6 - -1.1	-3.7 - -2.2	
		Proportional	-11.0 - -8.9	-8.7 - -6.1	-7.2 - -5.0	
Quadratic		-5.7 - -3.1	-4.4 - -1.3	-2.5 - -0.6		

환산 내하율이 LSD\_2 방법에 의해 직접 계산된  $RF_{LSD}$ 와 오차비율 약 6% 이내에서 비교적 유사하게 평가되었으며, 1차 비례식에 의한 환산 내하율은 다른 환산식보다 큰 약 11%의 오차가 나타나는 것으로 확인되었다.

이러한 결과는  $RF_{LSD}$  환산식의 검증에서 확인한 바와 같이 오차  $\pm 10\%$  이내의 오차확률이 가장 큰 상수항이 0인 1차 비례식의 환산  $RF_{LSD}$ 가 실제 다른 교량의 적용에서도 오차가 가장 크게 나타나며, 3가지 식 중에서 상대적으로 신뢰도가 낮은 결과를 제공한다고 볼 수 있다.

LSD\_1에서와 같이 개선을 반영한 LSD\_2에서도 상수항이 0인 1차 비례식의 환산  $RF_{LSD}$  결과는 2개 교량의 적용사례에서 오차가 약 10% 정도 수준이므로 높은 신뢰도를 확보한다고 할 수 없다. 그러나 Table 9에 나타난 것과 같이 내하율 약 3.0 이하 범주에서는 환산  $RF_{LSD}$ 가 LSD\_2에 의해 직접 계산한 내하율보다 작게 평가되어 안전측으로 환산된다는 점과 단순 비례로 환산 내하율을 직관적으로 쉽게 산정할 수 있다는 점은 여전히 활용도가 있을 수 있다.

이상의 검증으로부터 1차 선형식과 2차 함수식의 환산 내하율 평가결과는 오차  $\pm 10\%$  이내의 확률이 상대적으로 높고, 실제 2개 교량의 적용사례에서도 모두 10% 미만의 오차를 보이고 있다. 따라서 LSD\_2의 환산식도 공학적으로 만족할 만한 환산결과를 제공할 것으로 판단된다.

### 3.3 개선사항의 검증

이 절에서는 LSD를 이용한 내하력 평가방법인 개선 전 LSD\_1과 개선된 LSD\_2의 결과를 비교하고 개선사항의 효과를 정리하여 Table 10에 나타내었다.

Table 10에서는 특별한 손상이 없는 일반적인 교량의 ASD에 의한 내하율  $RF_{ASD}$ 가 1.0 - 7.0 사이에 있다고 가정하여 해당 범위 안에서 LSD\_1 및 LSD\_2에 의한 내하율의 변화를 산정하고  $RF_{ASD}$ 에 대한 각각의 환산비율을 나타내었다. 그리고 개선사항 적용의 효과를 확인하기 위하여 각 환산비율간의 상대비율인  $R_{IMPROV}$ 를 제시하였다.

또한 산정된 각 비율의 변화경향을 Figs. 3-5에 나타내었다. 내하력 환산식에 대한 검증은 앞에서 실시하였으므로 상대적으로 신뢰도가 높은 1차 선형식과 2차 함수 환산식을 이용하여  $RF_{LSD}$ 를 산정하고 비교하였다. 그 결과, 정모멘트부 단면과 부모멘트부 단면에 관계없이  $RF_{ASD}$ 가 1.0에서 7.0으로 증가함에 따라 1차 선형식은 포물선 형태의 환산비율을 나타내며, 2차 환산식은 직선형태의 환산비율을 나타내었다. 그리고 2가지 모두  $RF_{ASD}$ 가 증가할수록 환산비율은 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4의 정모멘트부 비조밀단면의 경우에는 개선 전 LSD\_1로 평가할 경우,  $RF_{ASD}$ 가 약 5 이상의 영역에서는 환산율이 1.0 이하로 저하되는 것으로 나타났다. 이는 LSD로 평가한 내하력이 ASD의 내하력보다 반드시 크게 평가되는 것만은 아니라는 것을 의미한다. 이는 선행연구(Noh *et al.*<sup>[2]</sup>)에서 기술한 것과 같이 비조밀단면을 LSD의 극한한계상태로 평가하는 경우, 단면의 저항성능을 허용용력이 아닌 재료의 항복강도로 적용하더라도 하중계수에 의한 설계응력의 증가효과가 더 크게 작용하여 LSD에 의한 내하율이 ASD에 의한 내하율보다 감소되기 때문이다.

한편, 1차 선형식에 의한 포물선 형태의 환산비율과 2차 함수에 의한 직선형태의 환산비율을 비교하면, LSD\_2에 의한 환산비율이 항상 LSD\_1의 환산비율보다 높은 위치에

**Table 10.** Improved ratio in each section by LSD

Item	(+M compact section		(+M non-compact section		(-)M section	
	Function conversion formula					
	Linear equation	Quadratic equation	Linear equation	Quadratic equation	Linear equation	Quadratic equation
$RF_{ASD}$	1.0 - 7.0					
$RF_{LSD_1}$	2.158 - 8.638	1.572 - 8.627	1.445 - 6.815	1.143 - 6.820	1.560 - 7.356	1.255 - 7.295
$RF_{LSD_2}$	2.289 - 9.507	1.733 - 9.685	1.816 - 8.116	1.375 - 7.987	1.949 - 8.795	1.533 - 8.710
$R_1 = RF_{LSD_1}/RF_{ASD}$	2.158 - 1.234	1.572 - 1.233	1.445 - 0.974	1.143 - 0.974	1.560 - 1.051	1.255 - 1.042
$R_2 = RF_{LSD_2}/RF_{ASD}$	2.289 - 1.358	1.733 - 1.384	1.816 - 1.159	1.375 - 1.141	1.949 - 1.26	1.533 - 1.244
$R_{IMPROV} = R_2/R_1$	1.061 - 1.101	1.103 - 1.123	1.257 - 1.191	1.203 - 1.171	1.249 - 1.196	1.222 - 1.194
Average $R_{IMPROV}$	1.089	1.112	1.208	1.188	1.210	1.209

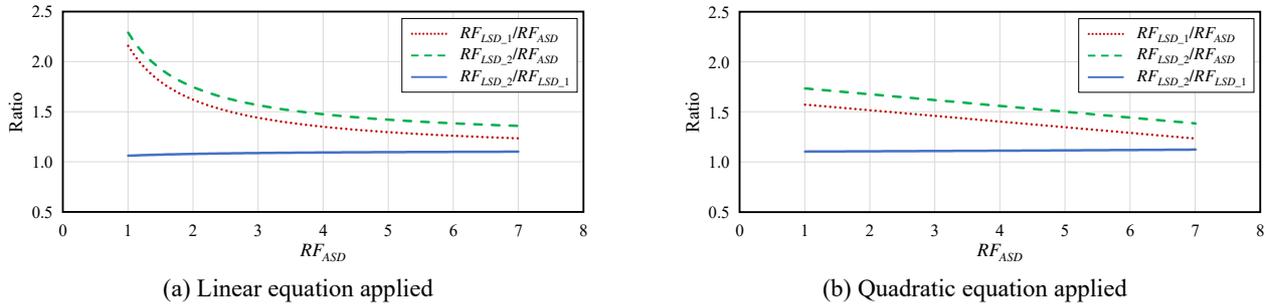


Fig. 3. Improved ratio in (+)moment compact section

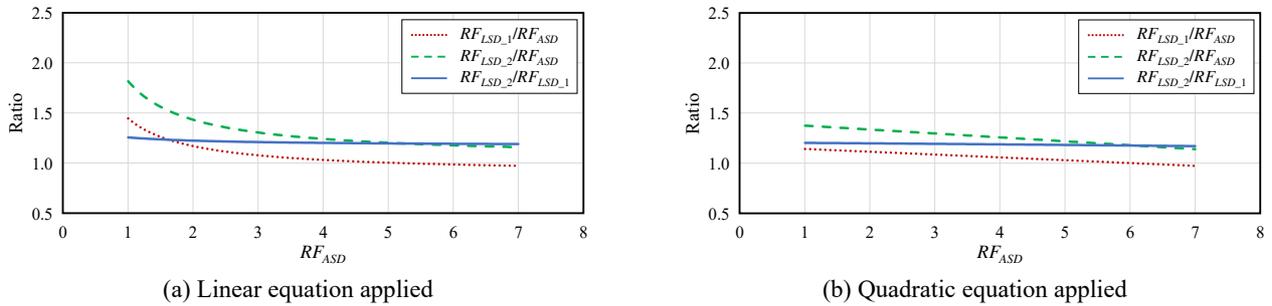


Fig. 4. Improved ratio in (+)moment non-compact section

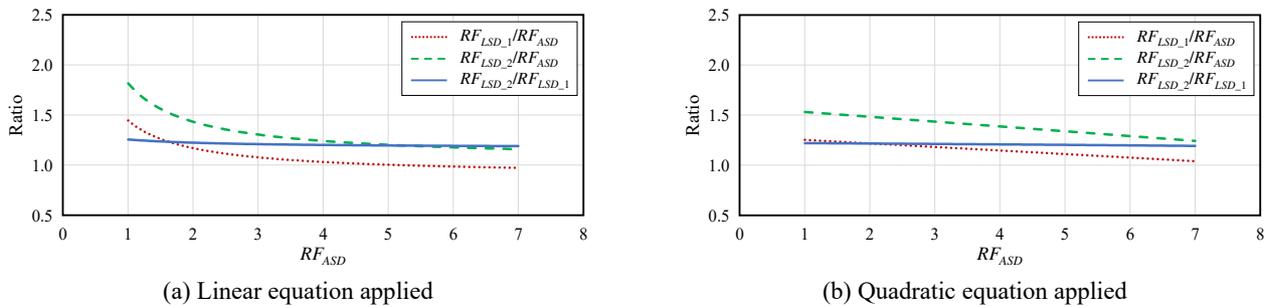


Fig. 5. Improved ratio in (-)moment section

있으며, 또한 상호 간격이 거의 동일하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이러한 상호 간격의 차이가 개선사항 반영의 효과이며, LSD\_1과 LSD\_2의 상대비율인  $R_{IMPROV}(= RF_{LSD_2}/RF_{LSD_1})$ 를 통해 확인할 수 있다.

Table 10 및 Figs. 3-5에서 개선효과를 나타내는 비율인  $R_{IMPROV}$ 의 값은  $RF_{ASD}$ 의 변화와는 큰 관계없이 거의 일정한 비율을 나타내고 있는데, 이는 개선효과가  $RF_{ASD}$ 의 크기에는 거의 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

선행연구(Noh *et al.*<sup>[1])에서 재하시험에 근거하여 제안한 인장을 받는 바닥판 및 일체형 난간의 유효성과 콘크리트 탄성계수 등의 개선사항을 구조해석 단계에서 반영한 처짐 개선비율, 그리고 이와 같은 개선사항을 ASD에 의한 내하력 평가에서 응력 및 내하율 산정단계에도 반영한 내하율 개선비율을 비교하여 개선사항의 적용 필요성을 연구한 바 있다.</sup>

이를 참고하여, 동일한 개선사항을 LSD에 의한 내하력 평가에 적용하여 내하율 개선비율을 상호 비교하면 Table 11과 같다.

Table 11에서  $RF_{LSD}$ 의 개선비율은 1차 선형식과 2차 함수 환산식의  $RF_{IMPROV}$  평균값으로 비교하였다. 단면 종류의 구분에 관계없이 허용응력으로 평가하는 ASD의 정모멘트부  $RF_{ASD}$ 는 평균 14.5%의 개선효과가 나타났다. LSD에서는 항복모멘트와 소성모멘트로 저항강도를 산정하는 정모멘트부 조밀단면은 약 10.1%의 개선효과가 있으며, 재료의 항복강도로 평가하는 비조밀단면은 약 19.8%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다.

여기서 조밀단면과 비조밀단면의 개선비율 평균은 약 15%로  $RF_{ASD}$ 의 개선비율인 14.5%와 유사한 것으로 판단할 수도 있다. 그러나 선행연구(Noh *et al.*<sup>[2])에서 나타낸 것</sup>

**Table 11.** Verification of improved ratio

Item	Section			Aver.	Remark	
	(+M		(-)M			
	Comp.	Non-comp.				
Improved ratio	$RF_{LSD}$	1.101	1.198	1.210	1.169	Table 10 (in this study)
	$RF_{ASD}$	1.145		1.239	1.190	Aver. $R_{d1}$ (Noh <i>et al.</i> <sup>[11]</sup> )
	Disp.	1.167			1.167	Aver. $R_d$ (Noh <i>et al.</i> <sup>[11]</sup> )

과 같이 조밀단면의 경우에는 개선사항 적용 전 LSD<sub>1</sub>에서는 파괴 여부에 대한 안전을 검토하는 극한I이 지배한계상태였으나, 개선된 LSD<sub>2</sub>에서는 연성도 및 여유성 고려를 통한 저항강도의 안전성 증가로 인하여 극한I의 내하율이 사용II의 내하율보다 10% 이상 높게 산정되었다. 즉 지배한계상태가 사용II로 변경됨으로써 개선비율이 다소 낮게 산정된 것으로 판단된다.

따라서 조밀단면의 개선비율은 비조밀단면과는 달리 개선사항 적용에 의한 지배한계상태의 변화가 발생하여 개선비율이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 판단하는 것이 타당할 것이다.

그 외 정모멘트부 비조밀단면 및 부모멘트부 단면은 개선사항의 적용 전인 LSD<sub>1</sub>과 적용 후인 LSD<sub>2</sub>에서도 극한I이 지배한계상태이며 이 경우에는 Table 10과 Figs. 4-5에서 나타난 바와 같이 연성도, 여유성의 하중수정계수와 단면 특성치 등을 통한 내하율 개선효과가 약 20% 정도까지 나타날 수 있는 것을 의미한다.

그러므로 조밀단면, 비조밀단면과 같은 단면의 종류, 지배한계상태 등에 따라서 개선비율은 다소 상이할 수 있다. 그러나 선행연구(Noh *et al.*<sup>[11]</sup>) 및 이 연구의 결과를 전체적으로 분석하면 재하시험에 근거하여 인장부 바닥판의 유효성, 일체형 방호벽의 합성효과, 콘크리트 탄성계수의 변화와 같은 개선사항을 감안한 구조해석 모델 수정에 의한 처짐 개선비율이 평균 1.167로 나타났다. 그리고 동일한 개선사항을 ASD 및 LSD에 의한 내하율 산정과정에 적용한 내하율 개선비율이 1.169 - 1.190으로 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 따라서 선행연구(Noh *et al.*<sup>[11]</sup>)에서 제안하고, 이 연구에서 검증한 개선방안 및 적용방법은 합리적이라고 판단할 수 있다.

#### 4. 연구결과의 활용방안

이 연구에서는 ASD와 LSD에 의한 내하율 산정 결과의 높은 상호 연관성으로부터 회귀분석식에 의한 내하율 환산식을 제안하고, 각 환산식에 대한 검증을 실시하였다.

따라서, 기존의 강박스거더교에 대하여 LSD에 의한 별도의 내하력 평가를 실시하지 않더라도 내하율 환산식을 이용하면 ASD로 평가된 내하율을 LSD에 의한 내하율로 환산할 수 있을 것으로 판단되며, 환산된 내하율  $RF_{LSD}$ 를 식 (2)와 같이 적용하여 LSD에 의한 내하력을 근사적으로 산정할 수 있다.

$$\text{내하력}_{LSD} = RF_{LSD} \times \text{설계하중}(DB, DL) \tag{2}$$

여기서, 환산내하율  $RF_{LSD}$  산정시 LSD<sub>1</sub>의 환산식을 사용한다면 식 (2)의 내하력은 설계기준에 의한 기본내하력을 제공할 것이다. 또한 기존 ASD에 의한 내하력 평가에서 적용한 응력보정계수를 대체하여 개선사항을 적용한 LSD<sub>2</sub>의 환산식을 사용한다면 공용내하력에 근접한 결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

다만, LSD<sub>2</sub>에 적용한 개선사항은 이 연구에서 검증한 최소한의 개선사항이므로 실제 교량의 거동에 근접할 수 있는 해석모델의 수정 및 정확한 내하력 평가를 위해서는 재하시험을 실시하여 그 결과를 기초자료로 활용하는 것이 보다 정확한 공용내하력을 제공할 것이다.

#### 5. 결론

한계상태설계법에 기초한 내하력 평가를 위해 내하율 산정 및 개선방법을 제시하고 이를 적용한 32개 강박스거더교를 대상으로 ASD에 의한 내하율을 LSD로 환산하는 방법에 대한 검증을 통해 환산방법의 신뢰성 및 적용성을 검토하였으며, 개선사항의 적용효과를 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) 기존 ASD에 의한 내하율을 1차 선형식 및 2차 함수 형태의 환산식을 이용하여 LSD로 환산한 내하율과 LSD로 직접 산정한 내하율을 비교한 결과, 오차 10% 이내일 확률이 77.4% - 99.9%의 높은 수준으로 분석되었고, 샘플 교량 외 별도의 2개 교량에 대하여 검증한 경우에도 오차 10% 이내의 결과를 나타내어 제시한 환산식은 공학적으로 만족할만한 결과를 제공한다고 판단된다.

- (2) 한계상태설계법을 활용한 LSD\_1과 LSD\_2에서 개선사항의 적용효과에 대한 검증결과, 개선사항이 고려되지 않은 LSD\_1에 비하여 LSD\_2의 개선비율인 1.101 - 1.210은 ASD의 내하율 개선비율 및 구조해석에 의한 처짐 개선비율인 1.145 - 1.239와 유사한 값을 나타내어 이 연구에서 제안한 개선방안 및 적용방법은 합리적인 것을 확인하였다.
- (3) 현재 공용 중인 강박스거더교를 관리함에 있어 설계하중에 대한 내하력의 여유가 충분하지 않거나 성능 개선을 위해 보강여부를 판단하여야 하는 경우, 또는 성능평가 수행시 한계상태설계법에 의한 내하력을 확인하는 경우에도 이 연구의 결과를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 이 연구에서 활용한 교량은 대부분 공용기간 20년이 경과하지 않은 상태등급 B등급 이상의 양호한 교량 이므로 공용년수 증가에 따라 안전성 저하가 발생하거나 내하율 1.0을 만족하지 못하는 경우에 대한 적용은 제한적일 수 있다. 따라서 향후 이러한 교량의 데이터를 수집하여 본 연구의 분석 데이터에 반영시킨다면 보다 신뢰성 높은 내하율 환산식을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌(References)

- [1] Noh, D.O., Kyung, K.S., and You, K.J. (2020) Improvement for Evaluation of Load Carrying Capacity Based on Loading Test of Steel Box Girder Bridge, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.4, pp.213-224 (in Korean).
- [2] Noh, D.O., Kyung, K.S., and Park, J.E. (2021) Evaluation of Rating Factors for Steel Box Girder Bridge Based on Limit State Design, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.2, pp.75-86 (Submitted, in Korean)
- [3] Ahn, S.S. et al. (2013) *Development of Reliability-Based Safety Assessment Guideline of Expressway Bridges*, EXTRI-2013-67-534.9607, Korean Express Corporation Research Institute (Expressway & Transportation Research Institute), Korea, pp.5-14 (in Korean).
- [4] Lim, M.J. (2010) *Safety Evaluation of Existing Bridges by Limited State Design Method*, Master's Thesis, Gachon University, Korea, pp.43-53 (in Korean).
- [5] Lee, Y.I. (2015) *An Improved Evaluation Method of Load-Carrying-Capacity for Highway Bridges Based on Field Test Data*, Ph.D. Dissertation, Korea Maritime and Ocean University, Korea, pp.9-17 (in Korean).
- [6] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Korea (in Korean).
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (2003) *Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway Bridges*, USA.
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and Korea Infrastructure Safety Corporation (2019) *Detail Guidelines for Safety and Maintenance of Infrastructure (Bridges)*, MOLIT and KISC, Korea (in Korean).
- [9] Han, S.C., and Yang, S.I. (2001) A Study on the Comparison of Load-Carrying Capacity by the Rating Methods of Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.13, No.5, pp.477-492 (in Korean).

---

**요 약 :** 이 연구는 ASD에 의한 내하율과 LSD에 의한 내하율의 상관관계를 이용하여 내하율 환산방법을 제안하고, 32개 교량을 이용한 검증을 통해 환산방법의 신뢰성 및 적용성을 검토하였다. 또한 내하율 평가에 적용한 개선사항의 적용효과를 재하시험에 근거한 처짐 개선 비율과 비교하여 검토하였다. 이 연구의 결과는 ASD에서 LSD로의 내하율 환산 및 공용중인 교량의 유지관리 차원에서 도움이 될 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 강박스거더, 한계상태설계법, 개선 내하율, 내하력, 내하율 환산

---