철도교 설계기준 개정 전·후의 설계열차하중에 따른 PSC 교량의 거동 비교

Comparison of the Behavior of PSC Bridges According to Design Train Load before and after Revision of Railway Bridge Design Standard

이주하* · 박정선** · 임광모***

Lee, Joo Ha*, Park, Jung Sun**, and Lim, Kwang Mo***

Abstract

The design load of railway standard was changed due to the revision of railway standard. In the 2013, the design load was applied the KRL-2012. In this study, the numerical analysis was conducted for the railway bridge which was constructed according to previous standard considering both design load of previous and revised standard. In case of HL-25 and LS-22 loads, the result difference of $\pm 3\%$ is shown for moments, stresses and deflections against KSL-2012. In addition, the load bearing capacity was also evaluated. By the comparison previous with revised standard design load, the optimal model of the railway design load was investigated in the design of railway bridge.

Key words : PSC Railway Bridge, Railway Bridge Design Standard, Design Train Load, Allowable Deflection, Optimal Model

요 지

국내철도기준이 개정되면서 설계하중에 대한 부분도 개정되었다. 본 연구에서는 2013년에 KRL-2012하중이 적용됨에 따라 개정되기 전에 설계를 실시한 철도교량에 대하여 개정 전·후의 설계하중별 유한요소해석을 수행하였다. HL-25, LS-22하중의 경우 KSL-2012대비 모멘트, 응력, 처짐에 대하여 $\pm 3\%$ 의 결과값 차이를 보였으며, 허용처짐량은 모두 허용이내인 것으로 나타났다. 이외에 내하력평가도 함께 수행하였다. 기존설계기준과 개정된 설계 열차하중과의 비교를 통해 철도 교량의 설계시 열차하중의 최적 모델을 검토하였다.

핵심용어 : PSC 철도교량, 철도교량 설계기준, 설계열차하중, 허용처짐, 최적 모델

1. 서 론

국내 철도의 설계하중은 일반철도의 L하중 체계와 전동차에 대한 EL하중이 존재하며, 고속철도의 경우 유럽의 LM-71에 기반한 HL-25하중 체계가 존재한다. 고속철도 설계하중 HL-25하중의 경우 유럽에선 화물·여객 혼용선에 적용되고

있는 하중이며, 여객전용선의 경우 하중감소계수를 적용하여 감소된 하중으로 설계를 할 수 있도록 하고 있다. 국내에서도 호남고속철도 설계지침에서는 HL-25하중에 대해 등분포 하중 부분을 감소시켜 적용하고 있다(Kim et al., 2009). 한편 일반철도에서 사용되고 있는 LS-22하중은 1800년대 미국 증기기관차의 하중선도를 모체로 하고 있어 현재 국내

*교신저자, 정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 조교수, 하천환경기술연구소 연구소장(Tel: +82-31-220-2159, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: leejooha@suwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Director, Institute of River Environmental Technology

**계룡건설산업(주) SOC 팀장

SOC Team Manager, Kyeryong Construction co.,ltd.

***수원대학교 토목공학과 박사과정

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

에 운행되고 있는 열차와는 상이한 면이 있다. 표준열차하중이 과대할 경우에는 구조적 안전성 및 향후 수명 등에서 장점을 가지나 건설비용의 증가 등을 수반할 수 있을 것이다 (Kim et al., 2012). 반면 과소할 경우에는 건설비용이 감소되고 구조물의 규모가 작아질 수 있으나 구조적 안전성 및 향후 수명 등에 악영향을 미칠 것이다. 이러한 두 가지 상반요소에 대한 합리적인 결정은 구조물의 안전성 및 경제성 향상과 직결될 것이다(Kim et al., 2010).

본 연구에서는 기존설계기준 HL-25, LS-22하중으로 설계된 가현교 교량의 내하력, 발생모멘트 및 처짐 등의 구조해석을 수행하여 기 설계기준과 개정된 표준열차하중 KRL-2012와의 비교분석을 통해 적정성 및 안전성검토를 수행하였다.

2. 철도설계기준

2.1 설계열차하중 비교

본 연구에서는 표준열차하중으로 2011년 철도설계기준인 HL-25와 LS-22를 사용하여 구조해석을 수행하였다. 시속 200 km/h 이상 고속철도 구조물에 적용되는 HL-25, 시속 200 km/h 이하의 일반철도 구조물의 적용되는 LS-22를 2013년 개정된 표준열차하중인 KRL-2012와 비교·검토하였다.

Fig. 1. Railway Bridge Design Standard

3. 구조해석

3.1 해석교량 제원

원주강륜 1공구 현장 중 가현교 교량을 대상으로 기존철도설계기준과 개정된 표준열차하중을 적용하여 해석을 수행하였다. 대상교량은 경간 25m의 Post Tension이 적용된

PSC거터로서 Table 1과 Fig. 2에 대상교량의 제원과 단면도를 나타내었다.

Table 1. Material Properties

Division	Concrete	Steel	Tendon
Strength	40 MPa	400 MPa	-
Modulus of Elasticity	30,008 MPa	200,000 MPa	
Unit Weight	2.50 t/m ³	-	7.85 t/m ³
Ultimate Strength	-	-	1,900 MPa
Yield Strength	-	-	1,600 MPa

Fig. 2. Cross Section Diagram

3.2 유한요소해석

3.2.1 해석모델링

본 연구에서는 MIDAS Civil을 이용한 유한요소해석이 수행되었다. 거터 및 가로보는 Frame요소를 사용하였으며, 외측거터와 내측거터는 동일한 형식으로 모델링하였다. 경계조건은 대상교량의 받침장치 배치도에 맞게 고정단과 교축방향가동단을 배치하였다. 합성전·후에 대하여 각각 해석을 실시하였으며, 시공단계별 하중을 적용하였다. 합성전과 후의 해석모델을 Figs. 3(a), (b)에 나타내었다.

Fig. 3. Analysis Model

3.2.2 하중산정

고정하중은 대상교량의 제원에 의하여 산정되었으며, 활하중에 대하여 LS-22, HL-25 및 KRL-2012하중을 사용하여 각각 검토하였다.

LS-22하중과 HL-25하중은 철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2011)에서의 표준열차하중으로 적용하였다. KRL-2012하중은 철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2013)에서 개정되어 표준열차하중으로 통합된 하중을 적용하였다. 활하중 재하시 Fig. 3(c)과 같이 상선과 하선 각각에 복선재하를 실시하여 검토하였으며, 하중은 거더의 정중앙에 재하하였다(Paik et al., 2014).

4. 해석결과

4.1 발생모멘트 검토결과

4.1.1 합성전 단면

Table 2와 Fig. 4에 합성전 단면 모멘트 검토결과를 나타내었다. 자중에 대하여 외측 및 내측거더에서 1,642 kN·m가 발생하였으며, 합성전 고정하중에 대하여 외측거더에서 1,847.07 kN·m, 내측거더에서 1,133.8 kN·m가 발생하였다.

Table 2. Before Merge Moment

Division	Girder weight (kN·m)	Dead Load (kN·m)
Outer	1,642.0	1,847.07
Inner		1,133.80

Fig. 4. Moment of Girder Before Merge

4.1.2 합성후 단면

Table 3과 Fig. 5에 합성후 단면 모멘트 검토결과를 나타내었다. 합성후 고정하중에 대하여 외측거더에서 1,797.65 kN·m, 내측거더에서 1,764.53 kN·m가 발생하였다.

Table 3. After Merge Moment

Division	Dead Load (kN·m)
Outer	1,797.65
Inner	1,764.53

Fig. 5. Moment of Girder After Merge

4.1.3 열차하중 종류에 따른 모멘트

설계기준에 따른 열차하중 종류별로 해석을 실시하였다. 철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2013)의 개정된 KRL-2012하중을 기준으로 결과를 비교하였으며, 외측거더의 경우 LS-22하중에 의한 모멘트는 3,433.6 kN·m, HL-25하중에 의한 모멘트는 3,631.6 kN·m, KRL-2012하중에 의한 모멘트는 3,536.9 kN·m로 LS-22 하중에 의한 모멘트는 KRL-2012 하중의 97 %, HL-25하중에 의한 모멘트는 KRL-2012하중의 103 %정도인 것으로 평가되었다.

내측거더의 경우 LS-22하중에 의한 모멘트는 3,870.9 kN·m, HL-25하중에 의한 모멘트는 4,116.4 kN·m, KRL-2012하중에 의한 모멘트는 4,005.9 kN·m로 LS-22하중에 의한 모멘트는 KRL-2012하중의 97 %, HL-25하중에 의한 모멘트는 KRL-2012하중의 103 %정도인 것으로 평가되었다. 열차하중 종류별 모멘트 검토결과를 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다.

Table 4. Moment According to Design Loads

Division	LS-22 (kN·m)	HL-25 (kN·m)	KRL-2012 (kN·m)
Outer	3,433.6	3,631.6	3,536.9
Inner	3,870.9	4,116.4	4,005.9

Fig. 6. Moment of Girder (KRL-2012)

4.2 응력검토결과

모멘트 해석결과를 이용하여 Eq. (1)를 사용해 PSC거더의 휨응력을 산정하였다. 기존설계기준 LS-22하중, HL-25하중과 KSL-2012하중을 적용시켜 설계하중 작용시에서의 응력을 산정하였다. 거더의 응력을 집계하여 PS콘크리트 허용응력과 비교한 결과 거더상·하면 모두 허용응력 이내인 것으로 검토되었다. 대상교량 외측거더와 내측거더의 설계하중하에서의 응력검토결과와 PS콘크리트의 허용응력을 Table 5에 나타내었다.

$$f = \frac{M}{Z} \quad (1)$$

f : PSC거더의 휨응력

M : 표준열차하중에 의한 모멘트

Z : 거더 도심까지의 거리

Table 5. Girder Stress Under Design Loads

Division		Outer	Inner
LS-22 (MPa)	Upper	6.352	5.167
	Lower	1.130	1.799
HL-25 (MPa)	Upper	6.469	5.309
	Lower	0.861	1.467
KRL-2012 (MPa)	Upper	6.413	5.245
	Lower	0.989	1.617
PS Concrete Allowable Stress		$-3.16 < \text{Stress} < 16.0$	

4.3 하중작용 시 처짐검토결과

거더별로 가장 최외측 거더부터 G1, G2, G3, G4, G5로 구분하여 설계하중에 따른 처짐검토결과를 비교하였다. 외

측거더의 경우 LS-22하중에 의한 처짐은 6.138 mm, HL-25하중에 의한 처짐은 6.490 mm, KRL-2012하중에 의한 처짐은 6.325 mm로 나타났다. 기존설계하중과 개정된 표준열차하중을 비교해 보았을 때, LS-22하중에 의한 처짐은 KRL-2012하중의 97 %, HL-25하중에 의한 처짐은 KRL-2012하중의 103 % 정도인 것으로 평가되었다.

내측거더의 경우 LS-22하중에 의한 처짐은 6.863 mm, HL-25하중에 의한 처짐은 7.263 mm, KRL-2012하중에 의한 처짐은 7.077 mm로 LS-22 하중에 의한 처짐은 KRL-2012하중의 97 %, HL-25하중에 의한 처짐은 KRL-2012하중의 103 %정도인 것으로 평가되었다.

철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2013)에 의한 최대연직처짐은 설계속도 $200 \text{ km/h} < V \leq 270 \text{ km/h}$ 의 경우 $L/1,400 = 17.86 \text{ mm}$ 이다. LS-22하중에 의한 처짐은 6.138 mm ~ 6.863 mm로 설계기준의 34 % ~ 38 % 정도였다. HL-25하중에 의한 처짐은 6.490 mm ~ 7.263 mm로 설계기준의 36 % ~ 41 % 정도였다. KRL-2012하중에 의한 처짐은 6.325 mm ~ 7.077 mm로 설계기준의 35 % ~ 40 % 정도였으며, 모두 허용범위를 만족하는 것으로 검토되었다. Table 6과 Fig. 7에 열차하중 모델별 처짐 검토결과를 나타내었다.

Table 6. Deflection of Bridge

Division	LS-22 (mm)	HL-25 (mm)	KRL-2012 (mm)
G1	6.138	6.490	6.325
G2	6.784	7.184	6.999
G3	6.863	7.263	7.077
G4	6.784	7.184	6.999
G5	6.138	6.490	6.325

Fig. 7. Deflection (KRL-2012)

4.4 내하력평가 검토결과

4.4.1 내하력평가 방법

교량의 내하력평가는 대상교량의 부재가 안전하게 지지할 수 있는 활하중 저항능력을 정량적으로 평가하는 방법으로서, 본 연구에서는 열차하중 종류에 따른 발생모멘트, 발생처짐뿐 아니라 교량의 내하력을 평가하여 활하중에 대한 영향

을 판단하고자 하였다.

Eq. (2)에 따라서 내하율(RF)을 산정한 후 설계활하중에 내하율을 곱하여 기본내하력을 구한 뒤 내하력에 대하여 평가하였다.

$$RF = \frac{f_a - f_d}{f_i(1+i)} \quad (2)$$

RF: 내하율

f_a : 허용응력

f_d : 설계고정하중에 의한 응력

f_i : 설계활하중에 의한 응력

i : 계산충격계수

4.4.2 하중별 내하력 평가

내하력 평가에 앞서 설계고정하중 및 설계활하중에 대한 응력을 휨응력 공식을 하용하여 응력을 구한뒤 내하율을 산정하였다. 계산충격계수 표준시방서에 제시되어있는 충격계수가 적용되었다. 평가결과는 모멘트 해석결과와 같았다. 내하력산정과 내하력평가를 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Evaluation of Load-Carrying Capacity

Design Load	Division	RF
LS-22	Outer	1.919
LS-22	Inner	1.946
HL-25	Outer	1.815
HL-25	Inner	1.830
KRL-2012	Outer	1.863
KRL-2012	Inner	1.881

5. 결 론

본 연구에서는 최근 개정된 철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2013) 이전에 설계를 실시한 철도교량에 대하여 철도설계기준의 표준열차하중 종류별 교량의 거동을 유한요소해석을 실시하여 분석하였으며, 각각의 하중별로 발생모멘트, 발생처짐 등의 결과값을 비교·분석하였다. 본 연구에 적용한 열차하중은 최근 개정된 철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2013) 이전의 시속 200 km/h 이하의 표준열차하중인 LS-22하중과, Eurocode를 기반으로 한 시속 200 km/h 이상의 표준열차하중인 HL-25하중 및 최근 개정된 기준의 하중인 KRL-2012하중을 적용하였다. 본 연구의 결과로 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 각 하중별 거더에 발생하는 모멘트 해석결과, LS-22하중은 KRL-2012하중의 약 97 %, HL-25하중은 KRL-2012

하중의 약 103 %정도의 모멘트가 발생하는 것으로 분석되었다.

- (2) 각 하중별 거더에 발생하는 처짐 해석결과, LS-22하중은 KRL-2012하중의 약 97 %, HL-25하중은 KRL-2012하중의 약 103 %정도의 모멘트가 발생하는 것으로 분석되었다.
- (3) 발생처짐 분석결과, 철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2013)의 허용처짐량의 LS-22하중은 34 % ~ 38%, HL-25하중은 36 % ~ 41 %, KRL-2012하중은 35 % ~ 40 %정도였으며, 모두 허용이내인 것으로 분석되었다.
- (4) 활하중에 대한 여유도를 평가하는 내하력 평가 결과, 모멘트 해석결과와 마찬가지로 KRL-2012하중을 기준으로 LS-22하중은 KRL-2012하중의 103 %, HL-25하중은 KRL-2012하중의 97 % 정도인 것으로 분석되었다.

향후 국내실정에 적합한 표준열차하중 산정에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Kim, S.H., Kim, S.I., and Park, Y.G. (2012) The Effects of the Design Load Changes to Existing Structure. *Proceedings of 2012 Autumn Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp. 1607-1613.
- Kim, S.I., Kim, H.M., Jo, S.I., and Lee, M.S. (2009) A Deterministic Approach for Deciding Design Load of Railway. *Proceedings of 2009 Autumn Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp. 1844-1852.
- Kim, S.I., Kim, H.M., and Lee, M.S. (2010) A Deterministic Investigation for Establishing Design Load of Railway Bridges. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 3, pp. 290-297.
- Korea Rail Network Authority (2011) Design Standards for Railway Structures and Commentary.
- Korea Rail Network Authority (2013) Design Standards for Railway Structures and Commentary.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009) The standard and Regulations on Railway Construction.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012) Railway Construction Project Implementation Guidelines.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013) Specification for Railroad Construction Standards.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2014) Based on Provisions Relating to the Construction of The Railway.

Paik, I.Y., Yoon, T.Y., and Park, S.M. (2014) Comparison of Live Load Moment Due to Standard Train Model

of Railway Bridge Design Standard. *Proceedings of 2014 Spring Conference & Annual Meeting of The Korean Society for Railway*, pp. 522-525.

<i>Received</i>	■	October 20, 2017
<i>Revised</i>	■	October 24, 2017
<i>Accepted</i>	■	December 7, 2017