

케이블 지지 교량을 예제로 한
고속철도 및 일반철도의 설계 차이점 분석

**The Design Comparison of High-Speed & Common Railway Bridge
with the Example of a Cable Supported Bridge**

김성일*

Kim, Sung-Il

변형균**

Byun, Hyung-Gyun

ABSTRACT

Traffic safety and vibration serviceability of a railway bridge set a limitation to the application of long-span cable supported bridges even though the design trend of the bridge becomes longer and lighter. In the case of high speed railway, it becomes more severe for the high speed of the train and resonance of the structure. Therefore, the cable supported bridge does not exist in Korea high speed railway until now. On the other hand, in recent, Italia, Japan and China do design and construct the long-span cable supported bridges for high speed railway recently with overcoming of traffic safety and passenger comforts. In the present study, prior to analysis of traffic safety and passenger comforts, a extradosed bridge for common railway is re-designed for high speed railway. The difference of member forces and displacements by design live load, the difference of impact coefficient and variable stresses of cables are investigated.

1. 서론

장경간 교량인 케이블 지지 형태의 교량은 교량의 장경간화와 경량화라는 세계적인 추세에도 불구하고 철도 고유의 필수 조건인 주행안전성과 승차감 확보 측면에서 적용이 제한되고 있는 실정이다. 고속철도 교량의 경우에는 열차의 고속주행으로 인한 공진문제와 더불어 더욱 적용이 어려우며, 국내의 경우 현재 적용이 전무한 상황이다. 반면, 이탈리아, 일본, 중국 등에서는 이러한 문제의 해결을 통하여 고속철도 노선에 케이블 지지 교량을 적용을 시작하고 있다. 이탈리아의 PO-river 교량은 주경간 192m의 사장교로서 설계속도 360km/h로 설계되었으며, 현재 300km/h까지의 시험운행을 마친 상태이다. 중국의 경우 주경간 504m의 세계 최장 사장교가 건설되고 있으며, 화물열차 및 고속열차가 혼용 운행될 예정이다. 케이블 교량이 가장 많이 적용된 일본은 7개의 사장교와 Extradosed교가 신간선 상에 운용되거나 현재 건설 중이며, 엄격한 주행안전성 및 승차감에 대한 사전 분석 하에 적용되고 있다.

현재, 국내 철도교량 설계기준은 일반철도와 고속철도가 상이하며, 일반철도 교량은 미국 AREMA 기준에 근거한 기준을 준용하고 있으며, 고속철도 교량은 Eurocode 등에 근거한 기준을 적용하고 있다. 본 논문에서는 케이블지지 장대교량의 주행안전성 및 승차감 분석에 앞서, 국내 일반철도에 적용된 Extradosed 교량을 고속철도 표준열차하중 및 충격계수 등에 맞추어 적용할 경우의 차이점에 대한 분석을 수행하였다. 동일 교량에 대한 표준열차하중에 의한 단면력 및 처짐 발생 차이, 충격계수의 상이함에 대한 분석을 수행하였으며, 케이블의 변동응력 발생도 분석하였다.

+ 김성일, 정희원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원

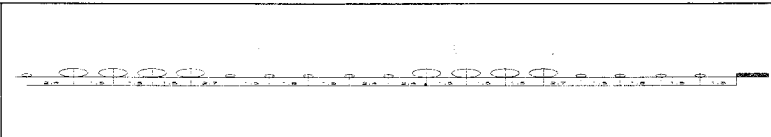
E-mail : sikim@krti.re.kr

TEL : (031)460-5354 FAX : (031)460-5359

* 변형균, (정)비회원, (주)BNS엔지니어링, 전무

2. 설계하중 및 충격계수

일반철도에 대한 설계기준인 “철도설계기준 (철도교편) 2004”는 미국의 AREMA 기준에 근거하고 있으며, 표준열차하중은 그림 1과 같은 LS 하중체계를 적용하고 있다. 반면, “호남고속철도 설계지침 (2007)”은 Eurocode에 주로 근거한 기준이 적용되고 있으며, 유럽의 LM71하중에 대하여 등분포하중을 75%만 적용한 여객전용선 HL25하중을 적용하고 있다.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--|----|----|----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----|----|----|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| 축하중 |  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 차축 등급 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 등분포 하중 |
| LS-18 | 9 | 18 | 18 | 18 | 18 | 12 | 12 | 12 | 12 | 9 | 18 | 18 | 18 | 18 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 6 t/m |
| LS-22 | 11 | 22 | 22 | 22 | 22 | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | 11 | 22 | 22 | 22 | 22 | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{44}{3}$ | $\frac{22}{3}$ | t/m |


| | | |
|-------|---|-------|
| 축하중 | S 하중  | |
| 번호 | 1 | 2 |
| LS-18 | 22 | 22 |
| LS-22 | 242/9 | 242/9 |

그림 1. 일반철도 LS 하중체계

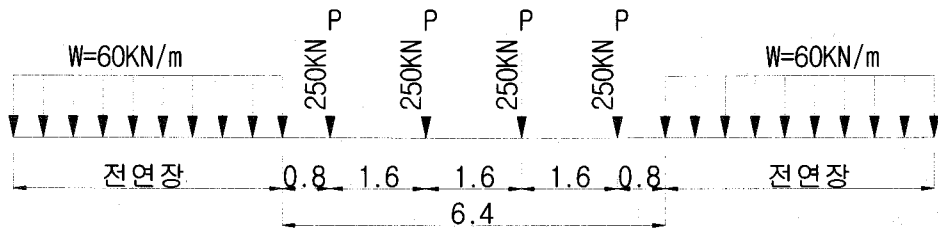


그림 2. 고속철도 여객전용 HL25 하중

충격계수의 경우는 다음과 같다. 일반철도 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트교의 경우, 다음과 같은 값을 사용하도록 규정되어 있다.

$$L \leq 18m : i (\%) = 45 - L^2 / 45$$

$$L > 18m : i (\%) = 24 + 240 / (L - 0.6)$$

또한, 강교 및 강합성의 경우, 다음과 같이 규정되어 있다.

$$L \leq 24m : i = 50 - L^2 / 48$$

$$L > 24m : i = 180 / (L - 9) + 26$$

Eurocode(EN1991-2)에서는 다음과 같이 충격계수를 정의하고 있으며, 호남고속철도 설계지침은 이 중 잘 유지관리된 궤도에 대한 식을 준용하고 있다. 경간 특성길이에 대해 Eurocode에서는 교량의 형식

등에 따라 변동사항이 있으나, 기본적인 교량에서는 아래 식이 그대로 적용된다.

$$\Phi_2 = \frac{1.44}{\sqrt{L_\Phi - 0.2}} + 0.82 \text{ (For carefully maintained track, } 1.0 \leq \Phi_2 \leq 1.67\text{)}$$

$$\Phi_3 = \frac{2.16}{\sqrt{L_\Phi - 0.2}} + 0.73 \text{ (For track with standard maintenance, } 1.0 \leq \Phi_3 \leq 2.0\text{)}$$

위의 일반철도와 고속철도의 충격계수를 경간에 따라 도시해보면 예상외로, 그림 3과 같이 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

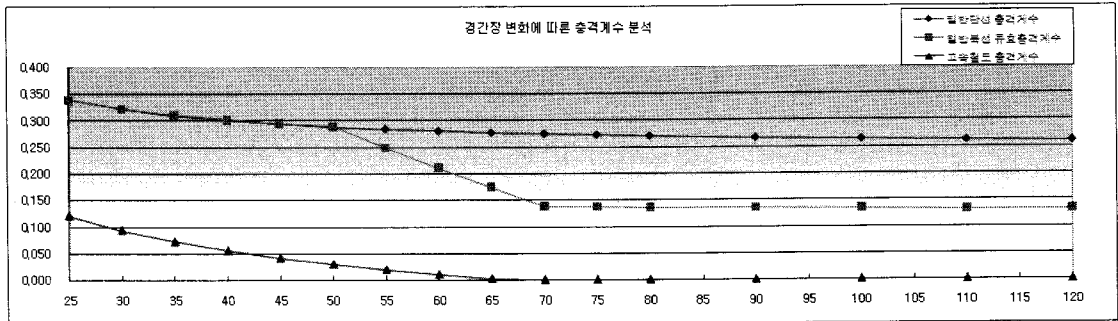


그림 3. 일반/고속철도의 충격계수 비교

충격계수란 표준열차하중에 대해 교량의 동적거동에 대비해 일종의 안전을 개념으로 도입하고 있는 것이다. 흥미로운 사실은 열차하중에 의한 교량의 동적거동이 훨씬 작을 것으로 예상되는 일반철도의 충격계수가 전체 경간에서 고속철도의 충격계수보다 훨씬 크게 적용되고 있으며, 고속철도의 경우 경간 65m 이상의 교량에서는 0으로 적용되고 있다는 점이다.

3. 대상 교량

설계하중 및 충격계수에 따른 단면력 변화를 고찰하기 위한 예제로는 국내 일반철도에 건설 중인 Extradosed 교량을 선정하였다. 대상 Extradosed 교량의 제원 및 형상은 표 1 및 그림 4와 같다. 이 중 Extradosed 구간인 중앙부 3경간(80+100+80m)에 대해서만 모델링 및 분석을 수행하였다.

표 1. Extradosed 교량의 제원

| | |
|-------|----------------------------------|
| 상부 형식 | 9경간 연속 Extradosed PSC Box Girder |
| 교량 연장 | 675m (47.5+3@80+100+3@80+47.5) |
| 해석 구간 | 260m (80+100+80) - Extradosed 구간 |
| 교량 등급 | 1급선 (설계속도 150km/h) |
| 교 폭 | B = 10.9 m ~ 12.1 m |
| 단면 형상 | 1 Cell PSC Box |
| 주형 높이 | 3.5 m ~ 6.5 m |
| 주탑 높이 | 10 m |

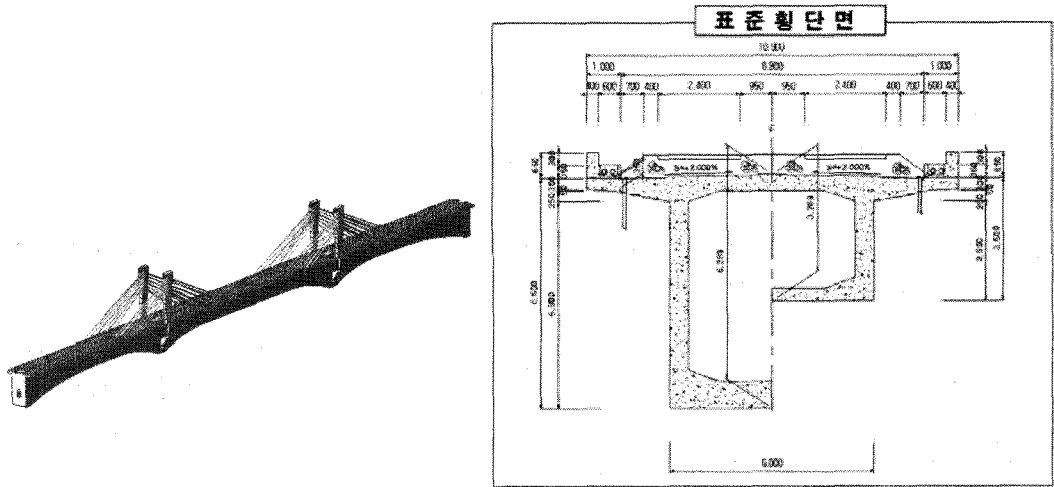
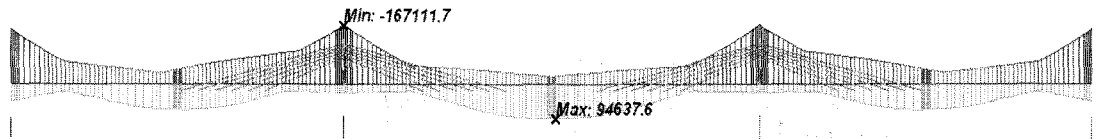


그림 4. Extradosed 교량의 형상 및 표준 횡단면도

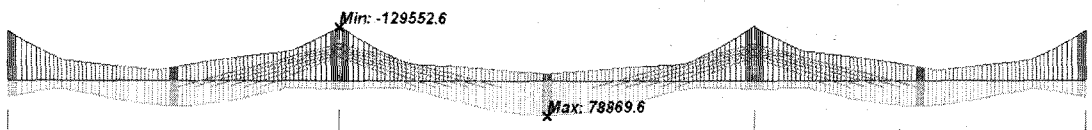
4. 설계하중 및 충격계수에 따른 단면력 비교

전술한 바와 같이 고속철도와 일반철도는 설계의 출발점이 표준열차하중과 충격계수에서 차이가 있다. 본 연구에서는 기존에 일반철도 설계기준에 맞추어 설계된 주경간 100m 케이블 장대교량인 Extradosed 교량에 대하여 주행안전성 및 승차감에 대한 분석을 수행하기에 앞서 고속철도 설계기준으로 적용하였을 경우의 차이를 분석하고자 하였다. 그림 5는 충격을 고려한 표준활하중 재하 시 휨모멘트도를 나타내며, 그림 6은 전단력도를 나타낸다.

대상교량에 대해 LS22 하중은 충격계수 13.5%가 할증되어 재하되며, 고속철도의 경우 주경간 100m의 충격계수는 0이므로, 여객전용 HL25 하중이 그대로 재하되는 차이가 있다. 그림 5에서 부모멘트의 경우 고속철도 설계기준에 따르면 129×10^3 kN-m가 발생하며, 일반철도의 경우에는 167×10^3 kN-m가 발생하여 약 29.5%의 차이가 나타난다. 정모멘트의 경우에도 각각 79×10^3 kN-m, 95×10^3 kN-m로 20.3% 충격계수를 고려한 LS22 하중에 의한 단면력이 크게 발생한다. 전단력의 경우에는 HL25 하중에 의해 7269kN, LS22에 의해 9399kN이 발생해 약 29.3%의 차이가 발생하였다.

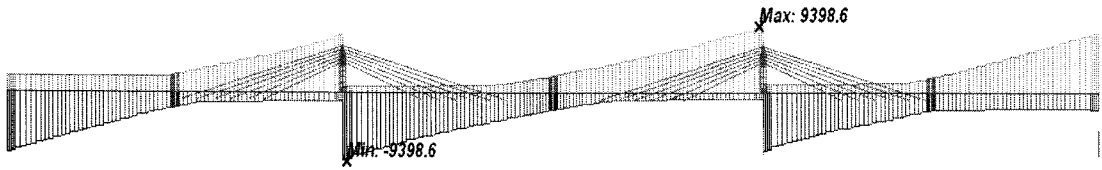


(a) LS22 재하

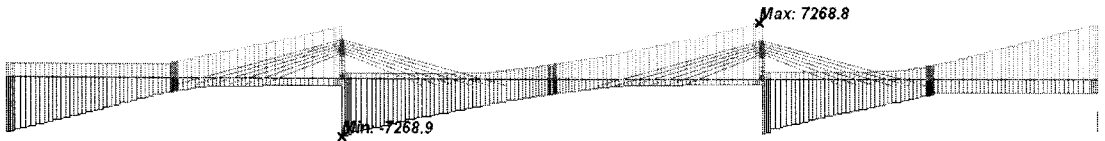


(b) HL25(여객전용) 재하

그림 5. 휨모멘트도 비교

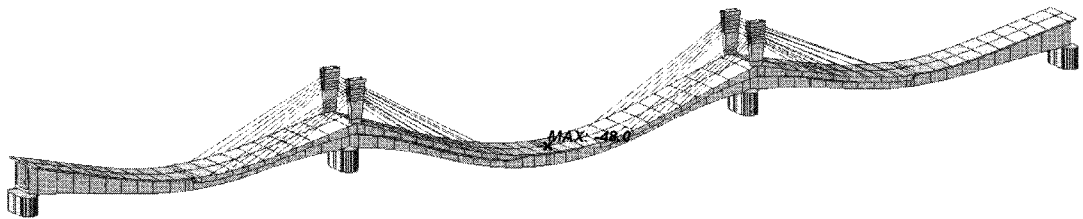


(a) LS22 재하

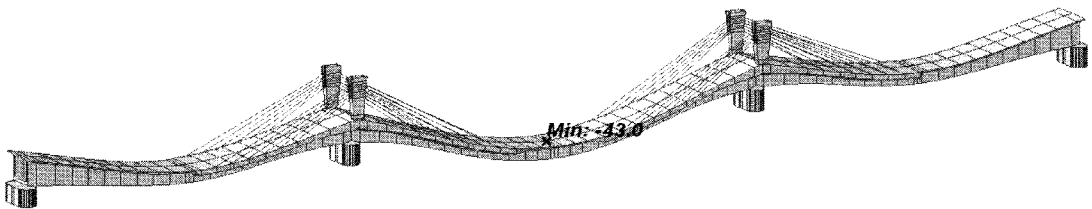


(b) HL25(여객전용) 재하
그림 6. 전단력도 비교

그림 7의 처짐발생 비교에서는 LS22 하중에 대해서도 충격을 고려하지 않았으며, 각각 최대 43mm, 48mm로, 충격을 고려하지 않은 LS22 하중에 의한 처짐이 약 11.6% 큰 것으로 나타났다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 기존에 일반철도로 설계된 교량은 고속철도 교량으로 적용하는데 큰 문제가 없으며, 오히려 현 기준에서는 단면에 대한 최적화가 가능한 것으로 판단할 수 있다.



(a) LS22 재하



(b) HL25(여객전용) 재하
그림 7. 처짐 비교

케이블 피로응력에 대한 검토에서도 LS22 적용의 경우 케이블 변동응력(Δf)이 일반적인 Extradosed 교량의 설계기준인 70MPa를 벗어난 74.16MPa로 나타나 케이블의 최대허용응력을 사장교 수준인 $0.4f_{pu}$ 로 적용하여야 하며, HL25 하중의 경우에는 57.13MPa로 나타나 최대허용장력을 $0.6f_{pu}$ 으로 적용할 수 있다.

고속철도와 일반철도의 표준열차하중 및 충격계수의 상이함에 따른 경간별 단면력 변화에 대한 비교를 보다 상세히 고찰하기 위하여 임의의 단면을 갖는 단순교에 대해 경간별 비교를 수행하였다. 그림 8 과 9는 충격계수를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 경간별 휨모멘트 및 전단력 발생을 도시한 것이다.

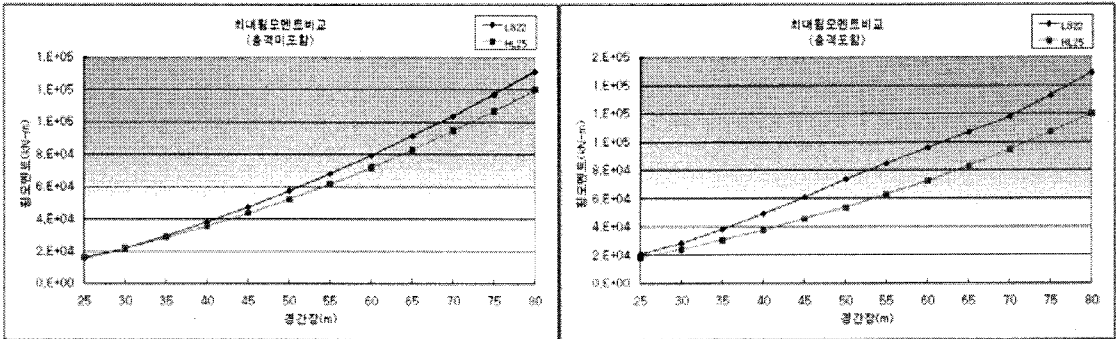


그림 8. 고속/일반철도 표준열차하중 및 충격계수에 따른 경간별 휨모멘트 비교

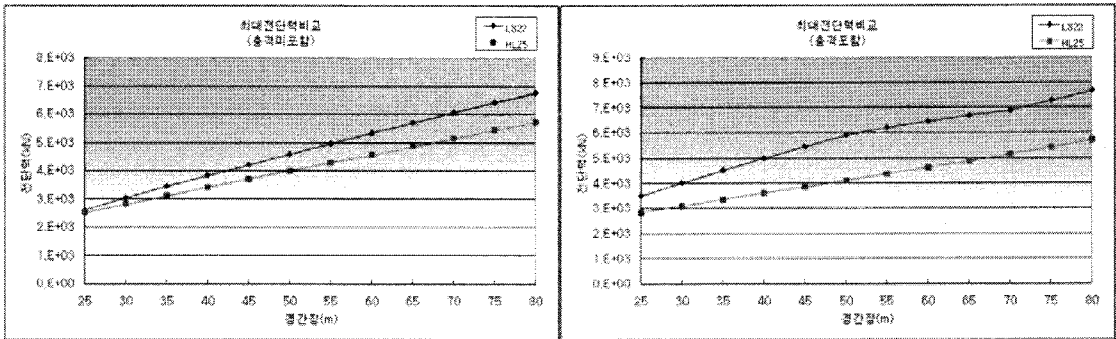


그림 9. 고속/일반철도 표준열차하중 및 충격계수에 따른 경간별 전단력 비교

일반철도의 표준열차하중인 LS22 하중은 집중하중으로만 구성되어 있으며, 호남고속철도 여객전용 표준열차하중인 HL25의 경우에는 등분포하중이 주를 이루고 있다. 이에 따라 장경간으로 갈수록 일반철도의 표준열차하중이 휨모멘트와 전단력 모두에서 큰 단면력을 발생시킴을 알 수 있으며, 전단력의 경우가 더욱 차이를 나타내고 있다. 충격계수를 고려할 경우 더욱 차이가 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 분석에서 일반철도의 표준열차하중은 장경간으로 갈수록 단면 설계에 있어 상당히 불리해질 수 있음이 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 일반철도에 적용된 장대 케이블교량인 Extradosed 교량에 대하여 표준열차하중 및 충격계수가 상이한 호남고속철도 설계지침을 적용하여 단면력 발생에 대한 차이를 분석하였다. 고속열차 주행 시 주행안전성 및 승차감에 대한 분석에 앞서 이와 같은 단면력에 대한 분석은 현행 설계단면의 적정성을 분석할 수 있을 뿐 아니라, 현행 일반철도 설계기준과 고속철도 설계기준의 근본적인 차이점을 분석할 수 있다.

분석 결과, 정적 설계하중 및 충격계수에 대해 일반철도 설계기준으로 적용된 대상 교량의 단면은 고속철도 설계기준 적용 시 휨모멘트와 전단력에 대해 기존의 안전율을 보다 확보하고 있어 적용에 문제가 없으며, 오히려 단면 효율화가 가능한 것으로 판단된다. 단, 엄격한 주행안전성 및 승차감 분석이 수반되어야 할 것이다. 현행 일반철도 설계기준의 집중하중으로 구성된 표준열차하중 및 비교적 큰 충격계수는 장경간 교량 설계 시 적합하지 않을 수 있음이 나타났으며, 케이블 변동응력을 상대적으로 크게 발생시킴을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국철도시설공단(2007), 호남고속철도 설계지침, 한국철도시설공단
2. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준(철도교편), 한국철도시설공단
3. 한국철도시설공단(2005), 고속철도설계기준 - 노반편, 건설교통부
4. Eurocode - Basis of Structural Design, 2005.12