

# 강철도교의 피로설계용 충격계수 기준 개정을 위하여

| 이희현 | 씨티씨(주) 대표이사

| 전준창 | 씨티씨(주) 이사

| 이성욱 | 한국철도공사 대전지사 시설팀장

| 이준석 | 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임 연구원

| 경갑수 | 한국해양대학교 건설·환경공학부 부교수

## 1. 서론

국내의 철도교량에 대한 통계자료에 따르면 현재 공용중인 철도교는 약 2,600개소이며, 그 중 공용년수가 30년 이상 경과한 무도상 단순 강판형 철도 교량이 약 1,000개소인 것으로 보고되어 있다.<sup>1)</sup> 그런데, 고정하중에 대한 활하중의 비가 매우 큰 이들 소규모 강철도교의 경우에 수명을 지배하는 주요 인자의 하나는 '활하중에 의해 장기간 동안 누적되어 발생하는 피로현상'이라는 것은 잘 알려진 사실이다.<sup>2)</sup> 따라서, 이들 강철도교도 이제부터 피로에 의한 문제가 본격적으로 대두될 가능성이 높고 이로 인한 유지관리 비용도 상당히 증가할 것이라는 것은 쉽게 예상된다.

현재 우리나라를 포함한 대부분의 나라에서 강교량 부재의 피로설계 또는 피로안전성 검토는 정적활하중에 의한 응력에 설계기준에 명시된 충격계수를 고려하여 실시하고 있으나, 설계기준에 명시된 충격계수는 최대충격을 유발하는 극한상황을 고려하기 위해 제정된 것으로 알려져 있다. 그러나 일상적인 조건하에서 장기간에 걸쳐 발생하는 피로현상에 대해 극한 상황에 관한 충격계수를 그대로 적용하면 과도하게 안전측의 결과를 초래할 가능성이 높다는 것은 쉽게 유추할 수 있다. 그리하여 일본의 강도로교의 피로설계지침<sup>3)</sup>에서는 교량단부와 같이 요철이 큰 부위를 제외하고는 도로교시방서에 규정된 충격계수의 50%를 사용하도록 하고 있으며, 미국 AASHTO의 LRFD<sup>4)</sup>에서도 피로한계상태에 관한 충격계수는 극한한계상태 또는 사용성한계상태에 대한 충격계수의 50%로 규정하고

있고, 이들 충격계수의 타당성은 문헌<sup>5,6)</sup>에서 이미 검토된 바 있다. 또한, 철도교에 대한 미국과 일본의 설계기준인 *Manual for Railway Engineering*<sup>7)</sup>과 *鐵道構造物等設計標準·同解説*<sup>8)</sup>에서도 피로설계용 충격계수는 평균적인 의미의 충격하중으로서 고려하여 설계기준에 명시된 충격계수를 일정 부분 감소시켜 적용하고 있다. 미국의 경우에는 부재종류에 따라 감소비율이 다른데 최하 35%까지도 감소시켜 사용하고 있으며, 일본의 경우에는 일률적으로 75%로 감소시키도록 규정하고 있다.

한편, 한국의 철도설계기준<sup>9)</sup>에서는 지간 9m 이하인 경우 피로설계시 사용하는 충격계수는 정적설계시 사용하는 값을 그대로 사용하고, 9m 이상인 경우 그 값의 65%를 사용하도록 하고 있으나 이에 대한 근거는 명확하지 않으며, 특히, 그동안 국내외에서 강철도교의 충격계수에 관한 많은 연구<sup>10, 11)</sup>가 수행되어 왔으나, 강철도교의 피로현상의 견지에서 충격계수를 다룬 연구는 본 저자들이 아는 한 문헌<sup>12)</sup>을 제외하고는 없는 실정이다.

본 고에서는 경제적이고 내구성이 높은 강교량 건설 및 유지관리를 위한 일환으로 강철도 교량의 피로설계 및 피로안전성 검토시 사용할 수 있는 적정 충격계수에 대해 검토하고 피로설계용 충격계수 기준개정의 필요성에 대해 검토하였다.

## 2. 피로설계용 충격계수의 정의

열차의 주행에 의해 교량의 각 구조부재에 발생하는 처짐, 변형 및 응력 등의 응답은 주행속도 및 열차와 교량의 동적 상호작용 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으므로 동일한 열차가 정적으로 작용하는 경우에 비해 응답이 커지게 된다. 우리나라의 철도설계기준<sup>9)</sup>에서는 이러한 동적효과를 강교 및 강합성교에 대해 식(1)과 같은 충격계수로서 고려하고 있으며, 피로설계시에는 시간길이 9m를 기준으로 9m 이하에 대해서는 식(1)의 100%, 9m를 초과하는 경우에는 식(1)의 65%를 적용하도록 하고 있다.

$$i = 50 - \frac{L^2}{48} \quad L \leq 24 \text{ m} \quad (1)$$

$$i = \frac{180}{L-9} + 26 \quad L > 24 \text{ m}$$

여기서,  $L$ : 주거더에 대하여는 지지점 중심간 거리(m)

1축 하중이 단순보 위를 주행하면 단순보 중앙에서 그림 1과 같은 응력이력곡선이 얻어진다. 그림에서 보는 바와 같이 하중이 정적으로 작용하는 경우에 비해 동적으로 이동하면 최대응력은 커지고, 자유진동 성분도 나타난다. 일반적인 정적설계시의 충격계수는 최대응력진폭을 사용하여 식(2)와 같이 정의된다. 그러나, 피로설계시 구조물 수명에 직접적인 영향을 주는 인자는 그림 1의 최대응력진폭이 아닌 최대응력범위이므로 충격계수는 식(3)과 같이 정의되어야 한다. 더욱이, 다양한 조건하에서 충격계수를 산출하는 경우, 피로현상의 특성을 감안하여 평균적인 개념을 갖는 대표성이 있는 충격계수를 도출하기 위해서는 통계적 개념을 도입하여 피로설계용 충

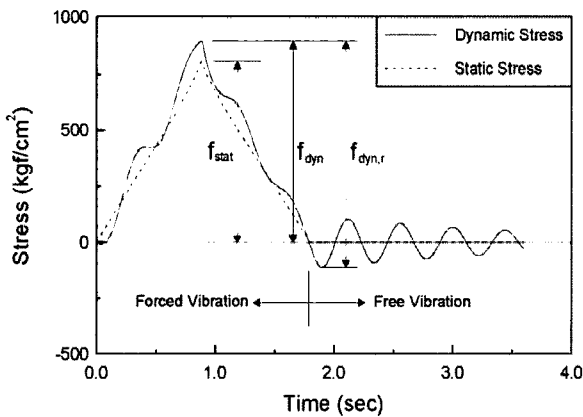


그림 1. Example of Stress Time History at Center of Simple Span Bridge

격계수는 식(4)를 이용하여 산출하는 것이 좋다. 식(4)에 의한  $i_{95\%}$ 는 통계학적으로 임의의 모집단 평균에 대해 95%의 신뢰도를 가지므로 일상적인 조건하에서 발생하는 피로현상을 해석하기 위한 충격계수로서 적절하다고 판단된다.<sup>5, 13, 14)</sup>

$$i_{static\ design} = \frac{f_{dyn}}{f_{stat}} - 1 \quad (2)$$

$$i_{fatigue\ design} = \frac{f_{dyn,r}}{f_{stat}} - 1$$

여기서,  $f_{dyn}$ : 최대 동적 응력

$f_{stat}$ : 최대 정적 응력

$f_{dyn,r}$ : 최대 동적 응력 범위

$$i_{95\%} = \mu + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

여기서,  $\mu$ : 샘플의 산술평균

$\sigma$ : 샘플의 표준편차

$N$ : 샘플 수

### 3. 강판형 철도교의 진동해석 예

#### 3.1. 단면제원

현재 우리나라에서 공용중에 있는 무도상 단순 강판형 철도교의 대표적인 단면형상은 그림 2와 같다. 이들 교량의 길이는 6~25m 정도이고 개략적인 제원은 표준도<sup>15)</sup>에 제시되

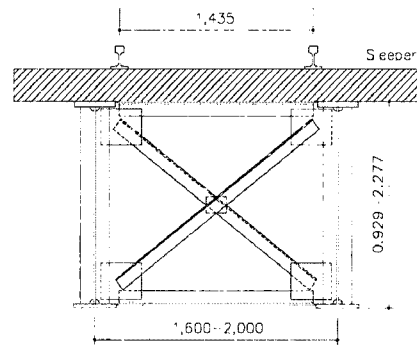


그림 2. Typical Cross Section of Bridges(unit : mm)

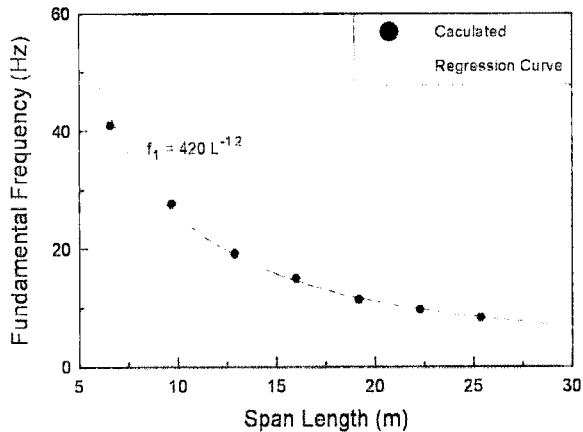


그림 3. Relationship between Span Length and Natural Frequency of Bridge

어 있다.

그림 3은 표준도에 제시되어 있는 단면제원을 사용하여 계산된 지간길이와 고유진동수의 관계를 보여 준다. 그림으로부터 표준도에 제시된 부도상 단순 강관형 철도교의 휨 1차 고유진동수는  $420L$ 로 주어짐을 알 수 있다.

### 3.2. 진동해석 결과 및 충격계수

그림 4는 새마을호가 지간 25.4m의 교량위를 150km/h의 속도로 주행할 때 얻어진 지간중앙부의 모멘트이력곡선의 일례를 보여 준다. 그림 4에 의하면 열차가 교량을 통과한 후에 자유진동성분이 나타남을 알 수 있으며, 이러한 자유진동 성분은 피로검토시 사용하는 응력범위와 충격계수를 증가시키는

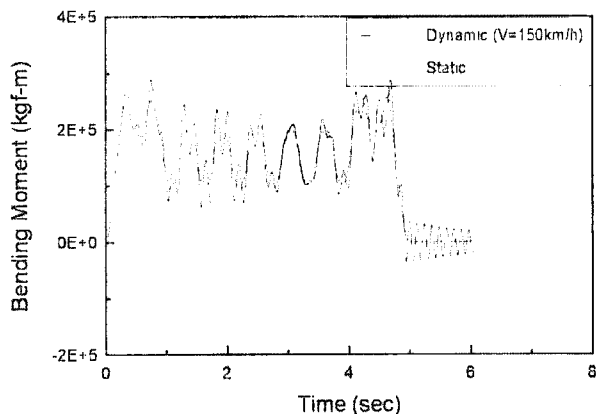


그림 4. Examples of Moment Time History at Center of Bridge by Saemaeul(L=25.4m, V=150km/h)

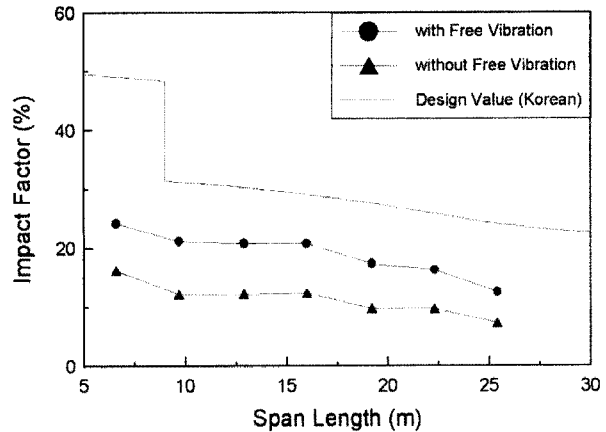


그림 5. Relationship between Calculated Impact Factor and Span Length

요인이 된다.

자유진동성분이 충격계수에 미치는 영향을 검토하기 위해, 자유진동 성분을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우의 충격계수 및 우리나라 설계기준에 제시된 충격계수를 지간길이에 따라 그림 5에 나타내었다. 그림 5에 의하면 전반적으로 지간길이의 증가와 함께 충격계수도 감소하는 경향을 나타내지만 철도설계기준에 규정된 충격계수에 비해 감소 정도에 있어서 약간의 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 교량구조물의 충격계수가 단순히 지간길이만의 함수로서 정의되지 않기 때문이다. 한편, 자유진동성분을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의  $i_{95\%}$ 를 비교해보면 전체 충격계수에서 자유진동성분이 차지하는 비율이 약 33~43%의 범위이다. 이러한 결과는 열차가 교량을 통과한 후에 발생하는 자유진동 성분이 응력범위를 상당히 증가시키기 때문으로 판단된다.

## 4. 피로설계용 충격계수 기준 개정 방향

차량의 주행에 의해 교량의 각 구조부재에 발생하는 응력범위는 차량의 주행속도 및 차량과 교량의 동적 상호작용 등 다양한 요인에 의해 영향을 받아 동일한 차량이 정적으로 작용하는 경우에 비해 응답이 커지게 되므로 피로설계시에는 충격계수로서 주행차량의 동하중 효과를 반영하고 있다. 그러나, 피로설계시 고려하는 충격계수에 관한 규정은 설계기준에 따

라 다소의 차이가 있다. 즉, 정적설계시 사용하는 충격계수를 그대로 피로설계에 적용하는 경우가 있는가 하면 정적설계용 충격계수를 일정 부분 감소시켜 적용하는 경우도 있다. 국내의 철도설계기준에서는 지간길이 9m 이상인 경우 피로검토시 사용하는 충격계수는 정적설계시 사용하는 값의 65%를 사용하도록 하고 있다. 정적설계용 충격계수를 감소시켜 피로설계를 하는 것은 피로라는 현상이 극한상황이 아닌 일상적인 조건하에서 장기간에 걸쳐 발생하기 때문으로 이해되지만 감소시키는 비율이 설계기준마다 상이할 뿐만 아니라 이에 대한 근거도 명확하지 않다. 본 고에서는 무도상 단순 강판형 철도교의 동적거동에 영향을 미치는 주요 인자를 고려한 진동해석을 수행하여 산출된 충격계수를 실측 충격계수와 비교하여 합리적인 피로설계용 충격계수 기준 개정 방향에 대해 검토하였다.

#### 4.1. 실측 충격계수와 비교

본 고에서는 해석적인 방법으로 산출된 충격계수의 타당성을 검토하기 위해 본 고에서 대상으로 하는 구조형식과 동일한 11개의 실교량에 대한 현장재하실험을 통해 얻어진 실측 충격계수를 조사하였다.<sup>16-23</sup> 조사대상 교량의 실측 충격계수에는 자유진동성분이 고려되지 않아 본 연구의 자유진동성분을 무시한  $i_{95\%}$ 와 비교하였다. 자유진동성분이 고려되지 않은  $i_{95\%}$ 와 교량별 실측 충격계수의 평균치를 그림 6에 비교하여 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 실측 충격계수

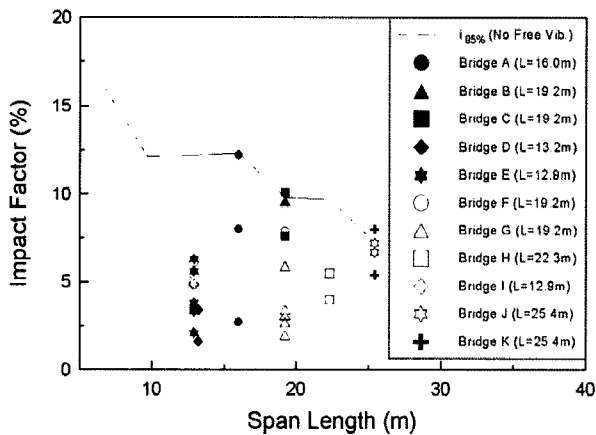


그림 6. Comparison of Measured Impact Factor with Calculated  $i_{95\%}$  Neglecting Free Vibration Component

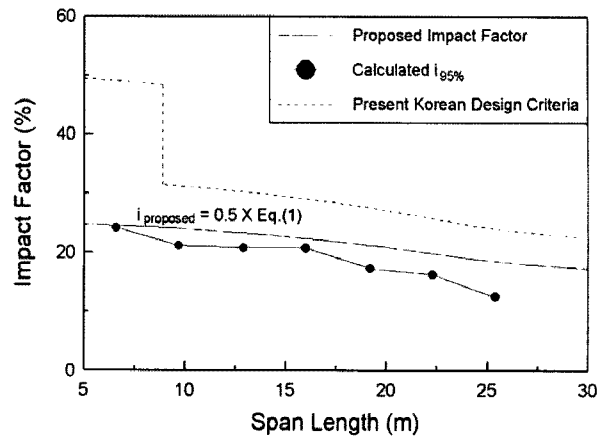


그림 7. Impact Factor Suggested for Fatigue Check

의 평균이 자유진동성분이 고려되지 않은 것을 상회하는 경우는 거의 없으므로 해석적인 방법으로 산출된 충격계수는 실제 열차가 주행할 때 발생하는 충격계수를 적절히 평가한다고 할 수 있다.

#### 4.2. 피로설계용 충격계수 기준 개정 방향

무도상 단순 강판형 철도교의 피로설계용 적정 충격계수를 제안하기 위해 철도설계기준의 정적설계시 사용하는 충격계수와 그 값의 50% 및 해석적인 방법으로 구한 충격계수를 그림 7에 비교하여 나타내었다. 현재 강판형 철도교의 피로설계시에는 지간길이 9m를 기준으로, 9m 이하에 대해서는 정적설계용 충격계수의 100%, 9m를 초과하는 경우에는 정적설계용 충격계수의 65%를 적용하고 있지만, 그림 7에 나타난 바와 같이 해석적인 방법으로 산출된 충격계수는 지간길이에 관계없이 정적설계용 충격계수의 50% 이하이므로, 향후 강판형 철도교의 피로설계용 충격계수는 정적설계시 사용하는 충격계수의 50%만을 사용하여도 무방하리라 판단된다.

### 5. 맺음말

경제적이고 내구성이 높은 강교량 건설 및 유지관리의 일환으로, 본 고에서는, 강판형 철도교량의 피로설계 및 피로안전성 검토시 사용할 수 있는 적정 충격계수에 대해 검토하고 피로설계용 충격계수 기준 개정의 필요성에 대해 검토하였다.



검토 결과, 현재 우리나라 철도설계기준에 규정된 충격계수는 극한상황을 고려하기 위한 충격계수로, 피로설계 및 피로안전성의 견지에서 살펴보면 다소 과도하게 평가되는 경향이 있음을 알 수 있었다. 그리하여, 본 고에서는 현행 철도설계기준에 규정된 충격계수의 50%만을 사용하여 단순 강판형 철도교의 피로검토를 수행하여도 무방함을 제안하였다.

향후, 본 고에서 대상으로 하지 않은 강철도교 형식에 대해서도 유사한 연구를 수행하여 국내실정에 맞는 적절한 피로설계용 충격계수 기준을 개정하면 보다 합리적이고 경제적인 강철도교량의 건설이 가능하리라 판단된다. S

❁ 참고 문헌

1. 한국철도공사, 철도 통계연보, 2002.
2. T. Mori, M. Kajihara, and Y. Hasegawa, "Development and Application of an Interactive Program for Fatigue Assessments of Steel Structures Based on JSSC Recommendations", Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Bridge Loading and Fatigue, pp.157-164, 1996.
3. 日本道路協會, 鋼道路橋の疲勞設計指針, 丸善, 2002.
4. AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Edition, 1998.
5. 李熙賢, 桁形式鋼道路橋の疲勞壽命評價法と疲勞設計用衝擊係數の検討, 法政大學 博士學位論文, 2007.
6. H.H. Lee, J.C. Leon, K.S. Kyung, and T. Mori, "Influence of Moving Vehicle on Fatigue of Steel Bridge", International Journal of Steel Structures, KSSC, Vol.6, No.4, pp.269-278, 2006.
7. AREMA, Manual for Railway Engineering, Vol.2, 2005.

8. 鐵道總合技術研究所, 鐵道構造物等設計標準·同解説 鋼·合成構造物, 丸善株式會社, 1992.
9. 한국철도시설공단, 철도설계기준(철도교편), 2004.
10. 장동일, 이종득, 이희현, "강철도교량의 진동거동파악을 위한 합리적인 방법", 한국강구조학회논문집, 제4권, 제1호, pp.101-108, 1992
11. 장동일, 최강희, 이희현, "강철도교의 실용담해석에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제9권, 제2호, pp.43-54, 1989.
12. S.U. Lee, J.C. Jeon, and K.S. Kyung, "Suggestion of Impact Factor for Fatigue Safety Assessment of Railway Steel Plate Girder Bridges", 8th World Congress on Railway Research, 2008.
13. D.I. Chang, and H.H. Lee, Impact Factor for Simple-Span Highway Girder Bridges, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.3, pp.704-715, 1994.
14. 전준창, 교량구조물의 동특성 추정 및 충격계수의 통계적 분석, 한양대학교 석사학위논문, 1991.
15. 철도청설계사무소, 강형(용접)표준도 미터형 L-22.
16. (주)창신종합엔지니어링, 동해-강릉간 전철화에 따른 옥계천외 3개소 정밀안전진단, 한국철도공사 동해시설관리사무소, 2001.
17. (주)대한건설품질연구원, 호남선 용동-함열간 연화천교량(상) 초기점검 용역보고서, 한국철도공사 익산시시설관리사무소, 2005.
18. (재)한국건설품질연구원, 호남선 익산-부용간 만경강제2교량(상·하) 정밀안전진단보고서, 한국철도공사 전북지사, 2006.
19. (사)한국강구조학회, 형산강제1교량의 4개소 내하력조사 및 안전진단보고서(1차분), 부산지방철도청, 1994.
20. (사)한국강구조학회, 형산강제1교량의 4개소 내하력조사 및 안전진단보고서(2차분), 부산지방철도청, 1995.
21. 구형우, 조은상, 황원섭, 최은수, "증속실험을 통한 강철도교의 동적응답 특성 분석", 한국강구조학회학술발표논문집, pp.379-383, 2005.
22. 한국시설안전기술공단, 한강철도교 A선 정밀안전진단보고서, 한국철도공사 서울시설관리사무소, 2005.
23. 한국시설안전기술공단, 한강철도교 B선 정밀안전진단보고서, 한국철도공사 서울시설관리사무소, 2005.