

### 강철도교의 정·동적 응답에 관한 연구

A Study on Static and Dynamic Responses of Steel Railway Bridges

장 동 일\*      최 강 희\*\*      이 희 현\*\*\*  
Chang Dong Il      Choi Kang Hee      Lee Hee Hyun

#### ABSTRACT

In this study, measured and calculated responses are compared in order to give how the static and dynamic responses occurred in steel railway bridges due to train loads could be calculated appropriately. From this, it is known that the static response ratios (measured / calculated) is high comparing to the highway bridges, and the dynamic response should be obtained by the moving mass problem. And it is known that the factors specified in the present railway bridge code are very safe under the present service speed below 100 Km/h, but are not under the rapid transit system above 100 Km/h.

#### 1. 서론

철도교란 도로교와 달리 특별한 화물이 통과한 다든지 긴급의 경우를 제외하고는 일반적으로 과 재하중이 통과하는 경우는 없으며, 또한 열차가 선로위를 통과하므로 하중이 작용하는 위치가 매우 명확하고 구조형식과 상판등도 도로교에 비해 단순하여 비교적 해석이 쉽기 때문에 선진국에서는 도로교에서 보다 먼저 철도교의 거동 해석을 실시하였다. (1, 2)

그러나 현재 우리나라에서 철도교에 관한 문헌을 조사해 보면 내하력조사보고서(3)들과 실측응력파를 통해 정리하여 실열차주행에 의한 철도교의 등가피로피해의 정도를 파악하고(4) 평면 트러스교에 여러가지 열차 하중이 속도를 변화시키면서 주행할 때 충격 계수의 변화 양상을 조사한 문헌(5)들만이 있을뿐 실제 철도교에 일어나는 정·동적 응답을 이론치와 비교 검토하여 체계적으로 철도교의 실거동 해석을 실시한 연구는 없는 실정이다.

이러한 사실을 고려하여 본 논문은 실열차하중에 의한 철도교의 실거동을 보다 합리적으로 해석하기 위한 자료를 제시하기 위하여 실측과 해석 두단계로 나누어 실시하였으며, 이를 토대로 열차가 고속(100Km/h)으로 될때 충격계수가 어떻게 변하는지 조사해 보았다. 실측은 철도교의 형식으로 가장 많이 사용되고 있는 단순 및 3경간 연속 플레이트 거어더교와 트러스교를 채택하여 교량의 주설계 대상이 되는 곳에 변형계이지와 처짐측정기를 부착하여 실시하였으며, 그때 얻어지는 정적응답 및 동적응답 이력곡선으로부터 철도교의 기본 고유 진동수, 감쇄비 및 충격계수 등을 구하였다. 그리고 해석은 실제와 유사하게 열차와 교량을 모델링하기 위하여 3차원 매트릭스 구조해석법에 따라 작성된 프로그램을 이용하여 실시하였다.

#### 2. 구조 해석

##### 2.1 가정

\* 한양대학교 토목공학과 교수  
\*\* 철도청 시설국장  
\*\*\* 한양대학교 공과대학 강사

구조해석은 다음의 가정을 두고 실시하였다. (6-9)

- 1) 구조물은 선형탄성 거동을 한다.
- 2) 트러스교의 경우 축방향력만을 고려한다.
- 3) 교량에 작용하는 열차하중의 크기는 일정하고 열차하중은 각축에 균등히 분배되며 집중하중으로 표시될수 있다.
- 4) 감쇄 매트릭스는 질량 매트릭스에 비례하고 모드중첩법에서 각 모드에서의 감쇄비는 일정하다.
- 5) 열차의 Rolling 과 Pitching 의 영향은 무시한다.
- 6) 하중이 재하되지 않았을때 교량은 직선이다.

##### 2.2 정적 해석

정적해석은 3차원 매트릭스 구조해석법에 따라 프로그램을 작성하여 실시하였는데, 해석시 플레이트 거어더교는 보와 Gird 로 모델링하고 트러스교는 평면 및 입체트러스로 모델링하여 하중이 직·간접 하중으로 작용하는 4가지 방법으로 모델링하였다. 정적응답을 구하는 과정은 문헌 (10)을 참조하기 바란다.

이때 한개의 집중하중에 의한 등가절점력 벡터는 보요소에는 Hermitian 보간함수(11,12)를 트러스 요소에 대해서는 단순보의 반력의 영향선(5,9)을 이용하여 구했다.

##### 2.3 동적 해석

동적해석은 열차의 질량을 무시하는 주행하중문제와 고려하는 주행질량문제로 나누어 실시하였다. 이때 교량의 모델은 플레이트 거어더교인 경우 하나의 보로서 트러스교의 경우는 바닥판을 구성하는 세로보, 가로보 및 레일 등의 질량이 동적응답에 영향을 줄것으로 사료되어 이들의 질량을 트러스 하한재의 절점에 균등히 분배(등가절점질량)하여 이것을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우로 나누어 해석하여 측정치와 비교하였다.

해는 주행하중문제의 경우 모드중첩법(5)에 따라 주행질량문제의 경우는 Newmark의 직접적분법 (11, 12)에 따라 구했다.

해를 구하는 과정은 문헌(5, 11~14)를 참조하기 바란다.

### 3. 시험

#### 3.1 시험 대상 교량

시험대상교량은 철도교의 형식으로 가장 널리 채택되고 있는 교량을 대상으로 하기 위해 용산과 노량진을 연결하고 각각 공용이력년수 21년과 33년을 갖는 한강 B, C선 교량으로 삼았다. B교량은 단선으로 21개의 단선 플레이트거어더와 10개의 단선 와렌트러스로, C교량은 복선으로 7개의 3경간 연속플레이트 거어더와 3개의 3경간 연속 이중(Double) 와렌트러스로 구성되어 있다. 설계하중은 B교량이 LS-22, C교량이 LS-25 하중이다. 측정위치는 시험대상 교량 전 경간중 보편성이 제일 높은 부위를 택하였는데 시험대상교량들의 상세한 단면형상, 제원, 변형계이지, 처짐측정기, 부착위치 및 시험기관차의 제원등에 대해서는 문헌 (15, 16)을 참조하기 바란다.

#### 3.2 측정치 획득과정

측정 자료는 Fig.1 과 같은 순으로 획득하였다.

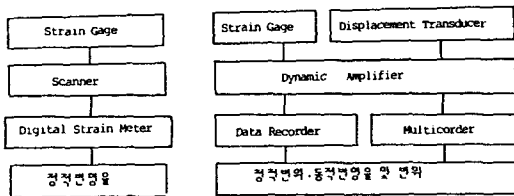


Fig.1 Measuring System

### 4. 측정치와 계산치의 비교분석

#### 4.1 정적 응답

##### 4.1.1 플레이트 거어더교

단선 및 3경간 연속 플레이트거어더교에서의 응력 및 처짐 측정 결과와 Girder 모델을 이용하여 계산한 것과 비교해 본 결과(15) 응답비는 특히 전단응력의 경우 도로교(18, 19, 20)에 비해 다소 크고, 교량의 전단면이 중앙단면과 같다고 가정하여 해석한 처짐이 오히려 실측치에 가깝다는 것을 알 수 있었다. 그리고 3경간 연속교의 경우 32년의 공용기간 동안 다소 노후화 되어 단선교에 비해 응답비가 높고, 넓게 분포되어 있고 보와 Grid 모델에 의한 해석결과와는 큰 차이가 없었다.

##### 4.1.2 트러스교

단선 및 3경간 연속 트러스교에서의 측정치와 4가지 방법에 따라 계산한 결과치를 비교해 본 결과(15) 하현계의 응답비가 사재, 상현계에 비해 낮고 처짐에 비해 응력에 대한 응답비가 높고 1.0을 초과하는 것이 다수 있었으며 연속교의 경우 노후화로 인해 단선교에 비해 응답비가 매우 넓게 분포되어 있었다. 그리고 4가지 방법에 의한 해석 결과들을 비교해본 결과 큰 차이가 없었다.

#### 4.2 동적 응답

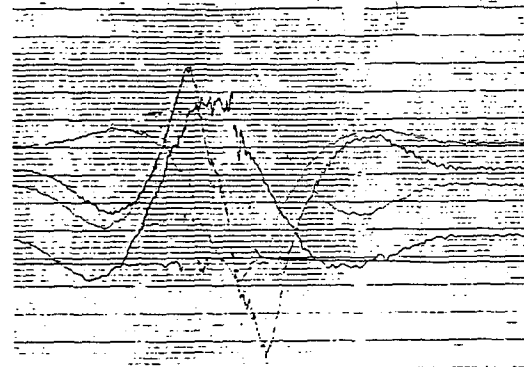


Fig. 2 Typical Dynamic Response-Time History Curve

본 논문에서 동적응답은 충격계수로 표시하였는데 충격계수는 (최대동적응답/최대정적응답)으로 구했다. Fig.2 는 동적 시험시 얻어지는 응답-시간 곡선의 일례를 보여준다.

##### 4.2.1 플레이트 거어더교

단선 및 3경간 연속 플레이트 거어더교에서 응력과 처짐에 대한 충격계수를 구하여 정리한 것이 Fig.3 이다. 해석시 교량은 보로서 모델링하였다.

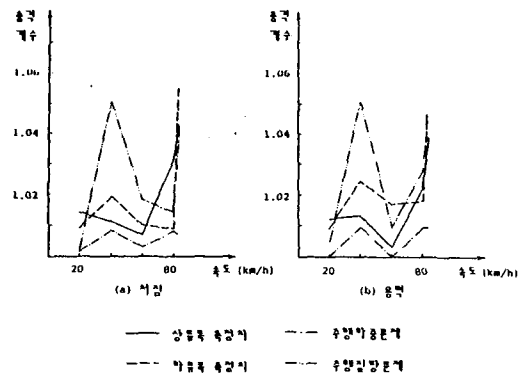


Fig.3 Measured and Calculated Impact Factor on Sample Plate Girder Bridge

여기서 측정치를 시방서 규정(단선교:1.42, 연속교:1.41)과 비교해보면 시방서규정은 상당히 안전하다는 것을 알 수 있다. 그리고 측정치와 계산치를 비교해보면 주행하중 문제로 해석할 경우 전 모드를 고려하여도 계산치는 측정치보다 훨씬 낮게 평가되나, 주행질량문제로 해석할 경우 측정치와 유사한 최대충격계수를 구할 수 있음을 알 수 있다. 그런데 연속교의 경우 노후화로 인해 측정치들이 계산치보다 다소 큰 값을 나타내었다. 측정 기본진동수는 단선교의 경우 10.01 Hz, 연속교의 경우 8.41 Hz 이고 계산치는 각각 15.74 Hz, 17.67 Hz 였고 측정 감쇄비는 각각 2.92%, 2.55%로 도로교의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. (15, 20)

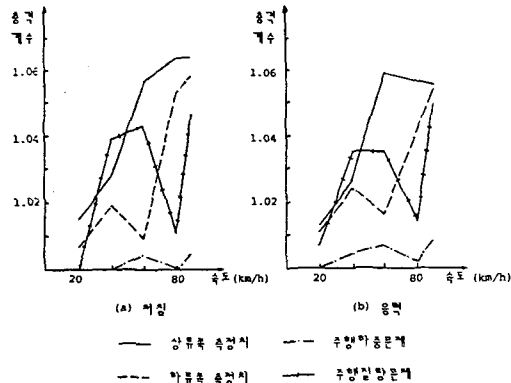


Fig. 4 Measured and Calculated Impact Factor on Three Span Continuous Plate Girder Bridge

#### 4.2.2 트러스교

트러스교에서 각 속도별 응답에 대한 충격계수를 구하여 Fig. 5, 6에 표시해 놓았다. 계산치는 평면트러스로만 모델링한 경우와 등가절점질량을 고려한 경우를 비교해 보았다. Fig. 5, 6에서 측정치를 시방서 규정과 비교해 보면(단순교:1.29, 연속교:1.29) 시방서 규정 훨씬 아래이고 등가절점질량을 고려하면 실측치보다 다소 높은 값이 구해진다는 것을 알 수 있다. 그러나

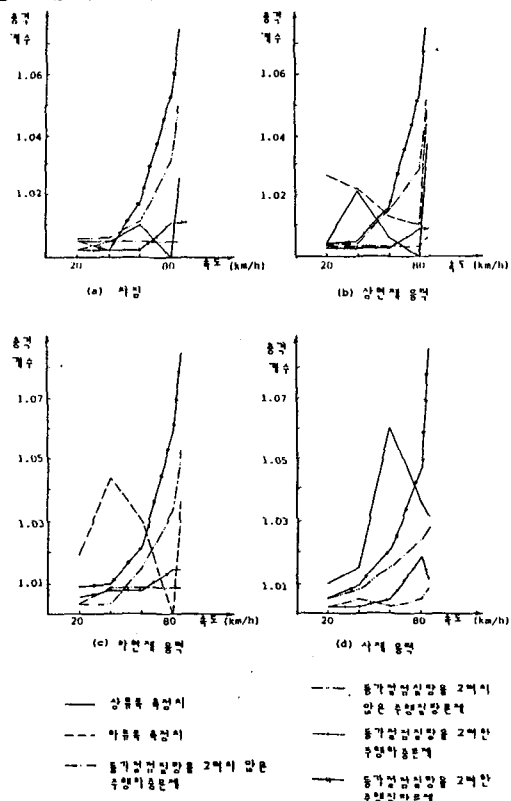


Fig. 5 Measured and Calculated Impact Factor on Simple Truss Bridge

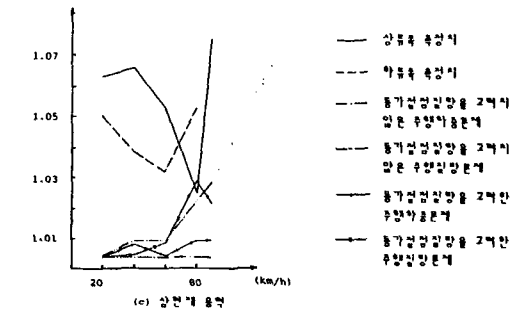
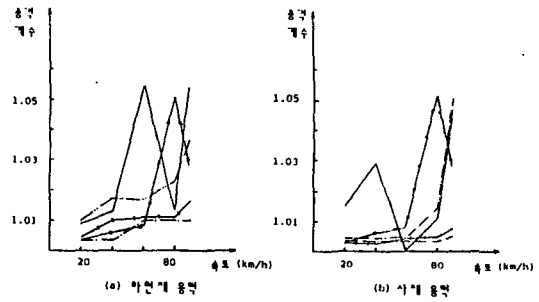


Fig. 6 Measured and Calculated Impact Factor on Three Span Continuous Truss Bridge

Fig. 5(d) 에서 사재의 경우 등가절점질량을 고려하지 않은 주행질량 문제인 경우 측정치보다 다소 낮은 값이 계산되었는데 이는 橋本香(17)의 지적한 바와 같이 사재의 충격계수 측정치가 다소 크거나왔기 때문으로 사료된다. 그리고 Fig. 6 (c)에서 연속교 상연계 용역에 대한 충격계수는 교량의 노후화로 인해 계산치에 비해 다소 크다는 것을 알 수 있다.

한편 이 교량들의 측정진동수는 단순교의 경우 3.48 Hz, 연속교의 경우 3.72 Hz 이고 계산치는 등가절점질량을 고려하지 않을 때 각각 6.26 Hz, 5.17 Hz, 고려할 때 4.35 Hz, 3.73 Hz로 진동수를 구하는 경우 등가절점질량을 고려하면 측정치에 가깝게 계산할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 측정감쇄비는 단순교의 경우 2.47%, 연속교의 경우 0.97%였다.

#### 4.3 속도 증가에 따른 충격계수

열차가 고속 (100 Km/h 이상)으로 달릴때 철도교의 주설계 대상이 되는 부분에서의 충격계수가 어떻게 변하는지 살펴보기 위하여 앞에서와 같은 요령으로 충격계수를 구하여 Fig. 7에 표시하였다. 여기서 이용한 열차하중은 일본의 N 하중과 우리나라의 전동차 (M차) 하중이었다. (5)

이 그림으로 부터 충격계수는 교량과 열차의 형식에 따라 상당히 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, 연속교에 비해 단순교의 충격계수가 훨씬 크고 특히 연속교의 경우는 열차속도가 300 Km/h 까지 증가하여도 충격계수는 대부분 1.1 이하이나 단순 플레이트 거더교의 경우 속도증가에 따라 시방서 규정(1.42)에 상당히 접근한다. 그리고 단위 길이 당 하중이 큰 N 하중쪽의 충격계수가 크다. 그런데 이러한 충격계수들은 모두 최대정적응답을

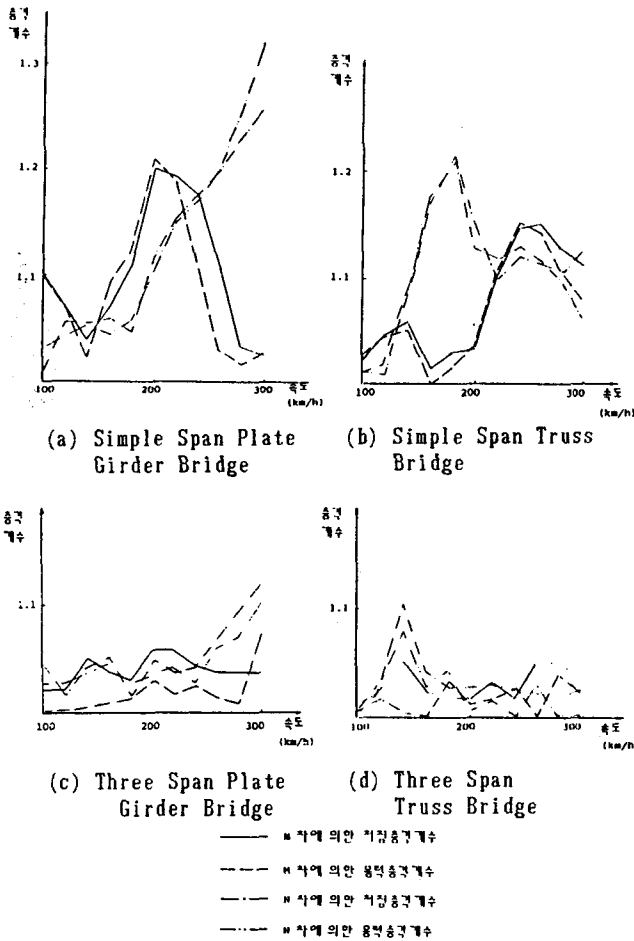


Fig. 7 Impact Factor due to Rapid Train

주는곳에서의 값인데, 충격계수란 정적응답이 작은곳에서 비교적 크다고 알려져 있으므로(11,13) 고속화시대에는 충격에 관한 시방서 규정의 개정이 있어야 하며, 사용할 열차들에 대해서도 동적해석이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

### 5. 결론

- 1) 본 연구를 위해 개발한 3차원 정·동적해석 프로그램은 장차 철도교의 실거동 파악을 위해 널리 사용될 수 있다.
- 2) 열차의 고속(100 Km/h이상) 주행에 의한 철도교의 충격계수를 구해본 결과 충격계수는 교량 및 열차의 형식에 따라 다르고 단순플레이트 거어더교의 경우는 속도증가에 따라 최대 충격계수가 현재의 시방서 규정에 상당히 접근하므로 고속전철시대에는 현재의 충격에 관한 시방서 규정의 개정이 있어야 할 것이며 아울러 고속전철시대에 사용될 열차에 대해서는 본 연구를 위해 개발한 프로그램을 이용하여 동적해석이 선행되어야 한다.
- 3) 철도교의 동적응답은 주행질량문제로 해석해야 되며 보다 정확한 교량의 진동수를 계산하기 위해서는 트러스교의 경우 등가절점질량을 고려해

야 한다.

- 4) 철도교의 정적응답을 구하기 위해서는 플레이트 거어더교의 경우 하나의 보로서, 트러스교의 경우 평면트러스로 열차하중은 직접하중으로 모델링하여도 좋다. 이때 응답비는 도로교에 비해 크다.
- 5) 해석의 간편화를 위해 플레이트 거어더교의 경우 "교량의 전단면은 중앙단면과 같다"고 하는 가정은 타당하다.
- 6) 현재의 철도교 시방서상의 충격에 관한 규정은 현재의 공용속도하에서 상당히 안전하다.
- 7) 트러스교의 경우 하현재에서 하중분산이 크게 일어난다.

### 참고 문헌

1. 日本土木學會, "構造物の安全性・信頼性" 1976, pp. 92-99
2. 何部英彦, 谷口紀久, "鋼鐵道橋の設計標準改訂", 日本土木學會 論文集, 第 344號/1-1, 1984. 4
3. 철도건설청, "호남복선 백양사 - 신흥리간 월계천 트러스교량 내하력 조사 보고서", 1987.12
4. 장동일, 이종득, 정영화, "강철도교의 등가피로 피해에 관한 연구", 대한토목학회논문집 제 2권 제4호, 1982.12
5. 장동일, 최강희, 이종득, "열차하중의 주행에 의한 트러스교의 동적응답에 관한 연구", 대한토목학회논문집 제 2권 제 4호, 1989.3
6. Biggs, J.M., "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill Inc. 1964, pp. 95-97, pp. 318-327
7. Biggs, J.M., Seur, H.S., and Louw, J.M., "The Vibration of Simple Span Highway Bridges" ASCE, Transactions, Vol.124, 1959
8. Walker, W.H, Veletsis A.S. "Response of Simple Span Highway Bridges to Moving Vehicle", Bulletin No. 486, Univ. of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, 1960
9. 浦井一, "車輛走行による橋梁の動的應答 基本式とそのトラス 橋への適用について", 修士論文, 東京工業大學, 1975.
10. Weaver, Jr.W., James, M.G., "Matrix Analysis of Framed Structures", 2nd Ed, D.Van Nostrand, 1980, pp.253-274, pp.344-359
11. Lee Hee Hyun "Impact Factor of Moving Load due to Surface Roughness of Girder Bridge of Variable Span", AIT, M.Eng. Thesis, 1985. 4
12. Klaus - Jürgen Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice - Hall, 1982, pp. 511-514

13. Inbanathan, M. J., "Random Vibrations of a Girder Bridge due to a Vehicle Moving Over a Rough Surface", AIT, M.Eng. Thesis 1982,4
14. Weaver, Jr, W., Johnston, P. R., "Structural Dynamics by Finite Element" 1987, pp. 82 - 112
15. 철도건설청, "경부선 용산-노량진간 한강 B, C 교량 내하력 조사보고서", 1988.12
16. 철도건설청, "철도차량 형식도"
17. 橋本香一, "鋼鐵道橋の應力および衝撃に関する研究", 日本國鐵研究報告, No. 713, 1970.6
18. Fisher, J.W. "Bridge Fatigue Guide", AISC, 1977.
19. Miki, C. Toyofuku, T., Yoshimura, Y. and Murakoshi, J., "Stress Reduction Factor for Fatigue Assessment of Highway Bridges", Prac. of JSCE, No. 386/1-8, 1987.10
20. 한국 도로공사, "고속도로 교량 내하력 평가 시스템 개발연구 (제1,2단계 용역) 보고서", 1987 - 1988
21. 철도청, "철도건설공사 표준시방서", 철도청 훈령 제 4914 - 4919호, 1980.