

# Preflex 철도교량의 운행열차하중에 대한 동적응답 분석

## Experimental Analysis of A Preflex Railway Bridge Under Random Train Loads

오 지 택\*      김 현 민\*\*      최 은 수\*\*\*      김 주 우\*\*\*\*  
Oh, Ji-Taek      Kim, Hyun-Min      Choi, Eun-Soo      Kim, Joo-Woo

### Abstract

This research analyzed dynamic responses of the preflex railroad bridge. Vertical deflection and acceleration induced by operating train loads and test train loads were measured. Deflection of bridge by train traveling satisfies deflection limitation regulation ( $L/800$ ) about the concrete bridge, but compare with UIC standard, vibration acceleration happened fairly greatly. Also test result show that acceleration receives greatly effect about the speed than deflection. It must discuss about vibration acceleration problems for speed elevation hereafter.

### 1. 서 론

기존선 철도교량의 경간은 대부분 12m에서 22m 사이의 단경간 단순지지로 구성되어 있다(철도청, 2000). 이러한 단경간 교량에 비하여 22m이상 40m 미만의 철도교량은 건설비의 절감과 미관상 장점이 있으며, 설계자의 설계자유도를 넓혀주는 형식이라 할 수 있다. 프리플렉스(preflex) 교량은 20m 이상의 경간에 사용되는 교량 형식으로 형하공간이 부족한 도로교에 상당수 적용되었으며, 철도교에서도 도로와 교차하여 형하공간 확보가 필요한 곳에 사용이 증가하고 있는 실정이다. 그러나 프리플렉스 철도교량에 대한 실측 자료를 활용한 연구는 국내에는 실시된 적이 없다. 따라서 본 연구에서는 경간 길이 33.9m이며 프리플렉스(Preflex) 거더 6개에 의해 건설되어진 복선철도교량에 대한 동적 재하실험을 실시하고 그 결과를 분석하고자 한다. 동적 재하실험은 1량의 디젤기관차에 의해 속도대역별

로 수행되었으며, 또한 주행하는 차량에 의한 동적응답을 측정하고 분석하였다. 이러한 분석된 응답은 철도설계기준이나 외국의 코드와 비교하여 차량의 주행안정성을 확보하고 있는지를 검토하였다.

철도교량의 현장측정 및 분석은 프랑스의 고속철도 교량에서 실시된 적이 있다(Xia et al., 2003). 이 교량은 U자 형상의 50m PC 거더로 단순지지의 교량이다. 현장측정을 통해서 교량의 모드특성, 최대가속도 및 최대처짐을 측정하였다. 차량의 속도가 약 260-310km/h로 주행할 때 교량의 수직방향 최대가속도가 0.76m/s<sup>2</sup> (0.077g)이며 최대 수평가속도는 0.174m/s<sup>2</sup> (0.0178g)로서 측정되었다. 수직방향의 최대처짐도 1.75mm로 측정되었다. 경간 길이(50m)에 비하면 가속도와 수직처짐에서 매우 우수한 성능을 보이고 있다.

### 2. 대상교량 및 현장 실험

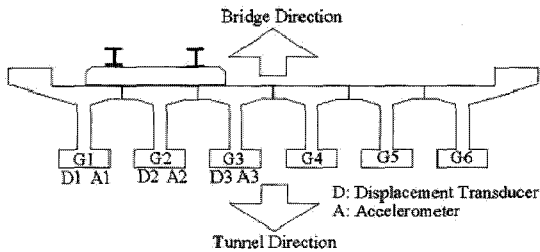
#### 2.1 대상교량

대상교량은 전라선에 위치한 33.9m의 단순지지 프리플렉스 합성형교로 교량 현황은 표 1과 같다. 복선 궤도의 교량이지만 그림 2(a)와 같이 현재 운행되는 선로는 단선으로 G1, G2, G3에 대해 계획하였으며,

\* 정회원, 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 선임 연구원  
\*\* 정회원, 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 주임 연구원  
\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 선임 연구원  
\*\*\*\* 정회원, 세명대학교 건축공학과, 조교수



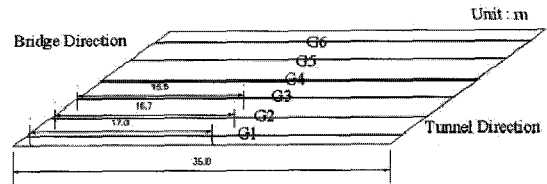
〈그림 1〉 재하시험 전경



(a) 설치거더 단면

〈표 1〉 측정대상교량 일반현황

|         |                                |
|---------|--------------------------------|
| 선별      | 전라선                            |
| 역구간     | 관촌-임실                          |
| 행정구역    | 전북 임실군 관촌면 용산리                 |
| 궤도      | 복선궤도                           |
| 직곡선     | 직선                             |
| 준공년     | 1996년 6월 30일                   |
| 직사별     | 사각 135°                        |
| 설계하중    | L-22                           |
| 경간 및 련수 | 31.9×1+33.9×1+18.55×1+18.29×17 |



(b) 설치 위치

〈그림 2〉 변위계 및 가속도계 설치 위치

변위계 및 가속도계 설치 위치는 그림 2와 같다. 원칙적으로 최대응답이 발생하는 지점인 경간의 중앙에 센서가 부착되어야 하나 현장조건상 G1, G2, G3에 대한 센서 부착위치가 중앙에서 약간의 차이가 있다.

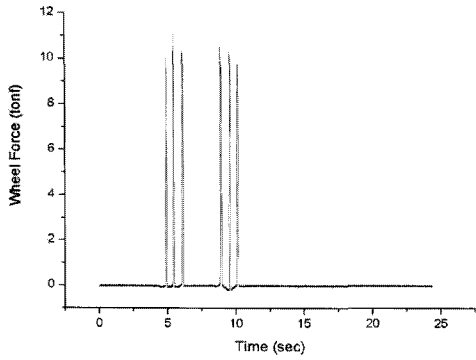
## 2.2 열차하중

본 실험은 재하차량(디젤 기관차)을 이용한 증속 실험 및 실제 다양한 편성으로 운행되는 랜덤차량(운행열차)에 대한 측정을 병행하였다. 재하차량에 의한 증속 실험은 속도 변화에 따른 응답의 특성을 명확하게 분석할 수 있지만 다양한 편성에 따른 운중의 차이에 대한 영향을 검토하기 어렵고 또한 중경간 철도교량의 경우 가장 불리한 하중 재하 조건은 증속 시험에 사용되는 재하차량(디젤 기관차)이 아닌 다량 편성 열차의 연결기 좌우측 대차하중이 재하될 때 발생되기 때문에 운행차량에 대한 병행 측정은 필수적이다 (오지택 외, 2002). 운행하중의 축중 및 속도에 따라 다른 특성을 보이는 객차와 화차의 특성을 고려하기 위하여 표 2와 같이 운행하중에 대해 3가지로 분류하여 영향을 검토하였다. 운행하중-A는 일반적

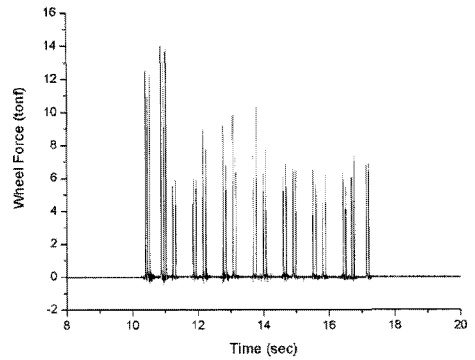
인 여객운송 시, 편성되는 디젤기관차 1량 + 장대화 무궁화 객차 7량 편성으로 축중은 크지 않지만 중고속으로 운행되는 특성을 가진다. 운행하중-B는 소수 편성된 화물차로 5~10편성 화차가 연행하중으로 구성되며 비교적 고속으로 운행되며 객차보다 큰 축중이 작용되나 만차된 화차보다는 비교적 가벼운 상태로 운행된다. 운행하중-C는 만차되어 다수 편성된 화물차로 저속으로 운행되나 축중이 가장 큰 유형이다. 그림 4는 분류된 각 열차 유형의 운중의 시간이력의 예이다.

〈표 2〉 열차하중의 분류

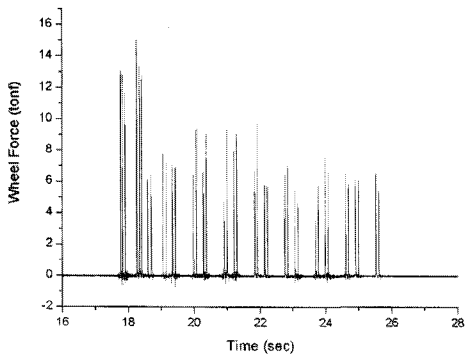
| 구 분    | 측정 회수 | 속도대역 (km/hr) | 편성 형태                | 특 징        |
|--------|-------|--------------|----------------------|------------|
| 재하하중   | 11    | 5~100        | 디젤기관차 1량 (시험차량)      | 단편성, 증속시험용 |
| 운행하중-A | 20    | 77~104       | 디젤기관차 1량 + 여객차 7량    | 중·고속, 저 중량 |
| 운행하중-B | 17    | 65~104       | 디젤기관차 1량 + 화차 5~9량   | 중·고속, 중 중량 |
| 운행하중-C | 30    | 52~79        | 디젤기관차 1량 + 화차 10~20량 | 저·중속, 고 중량 |



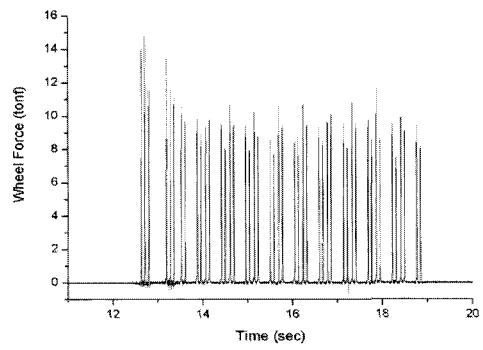
(a) 재하차량



(b) 운행하중-A(디젤 1량 + 여객차 7량)

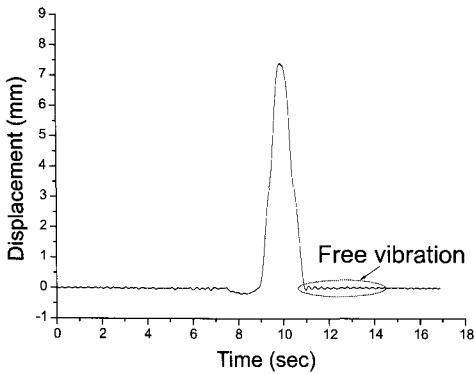


(c) 운행하중-B(디젤 1량 + 화차8량)

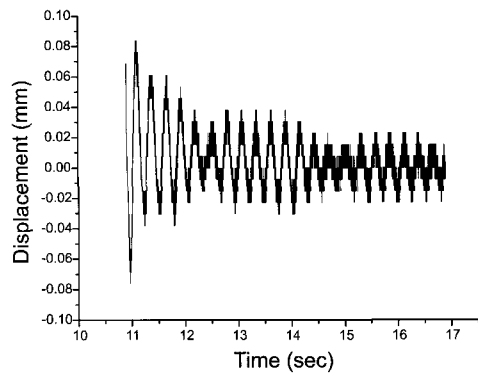


(d) 운행하중-C (디젤 1량 + 화차 10량)

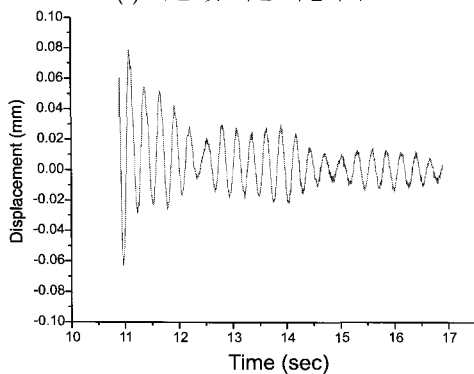
〈그림 3〉 열차 유형별 운동의 시간이력 예



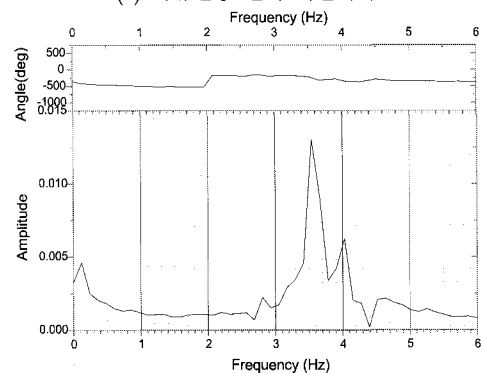
(a) 가진 및 여진 시간이력



(b) 자유진동 변위 시간이력



(c) 필터된 자유진동 변위 시간이력 분석과정



(d) FFT 분석결과

〈그림 4〉 변위이력을 이용한 모드특성 분석과정

### 3. 교량의 모드특성

교량의 모드특성은 고유진동수, 감쇠비 및 모드형상을 포함하고 있으나 본 연구에서는 측정 위치가 중앙으로 한정되어 있어 모드형상을 파악할 수 없고, 고유진동수 및 감쇠비만을 추정하였다. 그림 4에서 보는 것처럼 여진의 변위이력을 단절진동수(cut-off frequency) 100Hz로 필터링하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 실시하면 그림4(d)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기에서 고유진동수는 직접적으로 추정 가능하며 감쇠비는 Half-Power Method(Clough and Penzien, 1993)을 이용하여 도식적으로 추정할 수 있다. 추정된 교량의 고유진동수는 3.54 Hz며, 감쇠비는 4개의 평균값이 2.14% 이다. 고유진동수는 교량의 공진 문제와 관련하여 이용될 수 있다. 본 연구에서 추정된 감쇠비 2.14%는 일반적인 콘크리트 구조물의 감쇠비인 5%에 비해 상당히 작다. 이러한 경우 차량 통과 후 여진동이 크게 발생한다.

### 4. 증속에 따른 교량의 응답특성

변위와 가속도 응답의 속도 증가에 따른 응답특성을 분석하기 위하여 재하 차량에 의한 증속시험의 계측결과로부터 동적증폭계수를 산출하였다. 또한 속도에 대한 응답증가의 민감도를 응답별로 비교하기 위하여 동적증폭계수-속도의 관계에 대한 회귀분석을 수행하였다.

#### 4.1 동적변위

먼저 실험결과로부터 각 주형에서 측정된 최대

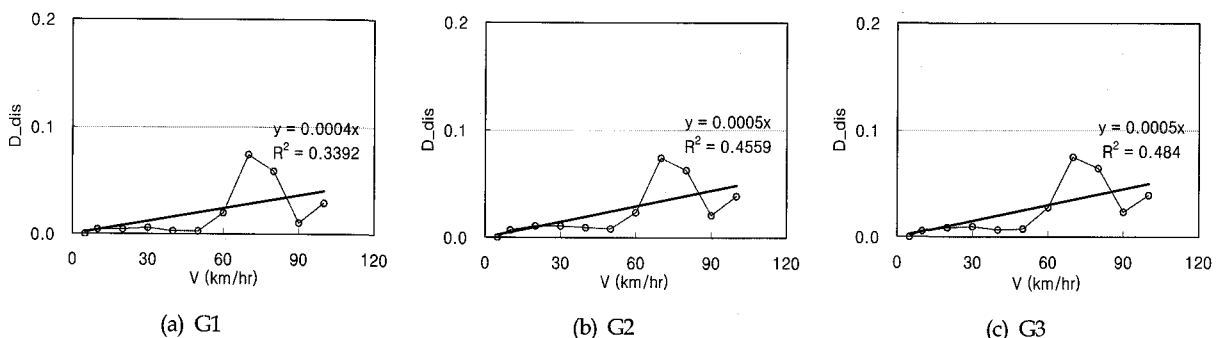
수직변위를 표 3에 나타내었다. 또한 증속에 따른 수직변위의 변화를 분석하기 위해 변위에 대한 동적증폭계수( $D_{dis}$ )를 식(1)과 같이 산출하였다. 여기서 동적증폭계수는 정적하중에 의해 발생하는 수직변위에 대한 동적하중에 의해 발생하는 수직변위의 증가분을 무차원화한 것이다. 여기서는 정적하중대신 재하차량이 5km/hr로 주행할 때의 하중(유사정적하중)을 기준으로 하였다. 각 주형별로 계산된 동적증폭계수를 회귀분석 결과와 함께 그림 5에 표시하였다.

$$D_{dis} = \frac{d_{dynamic} - d_{static}}{d_{static}} \quad (1)$$

여기서,  $d_{dynamic}$  : 증속에 따른 동적변위,  
 $d_{static}$  : 정적변위(유사정적변위-5km/hr 주행 시)

〈표 3〉 재하차량에 의한 최대수직변위

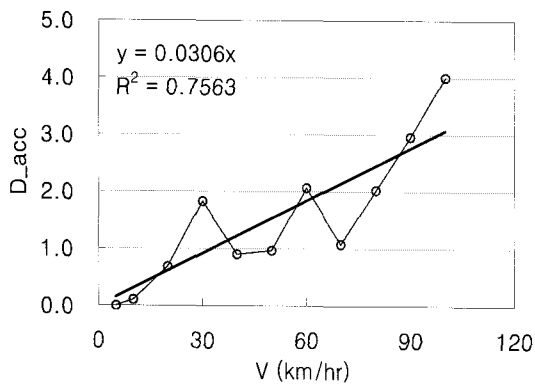
| 속도  | 진행방향 | G1 (mm) | G2 (mm) | G3 (mm) |
|-----|------|---------|---------|---------|
| 5   | 터널방향 | 7.25    | 6.45    | 4.30    |
| 10  | 교량방향 | 7.29    | 6.49    | 4.32    |
| 20  | 터널방향 | 7.31    | 6.52    | 4.32    |
| 30  | 교량방향 | 7.32    | 6.52    | 4.33    |
| 40  | 터널방향 | 7.30    | 6.51    | 4.31    |
| 50  | 교량방향 | 7.30    | 6.50    | 4.31    |
| 60  | 터널방향 | 7.45    | 6.60    | 4.39    |
| 70  | 교량방향 | 7.79    | 6.93    | 4.62    |
| 80  | 교량방향 | 7.72    | 6.86    | 4.55    |
| 90  | 터널방향 | 7.42    | 6.58    | 4.35    |
| 100 | 교량방향 | 7.53    | 6.70    | 4.43    |



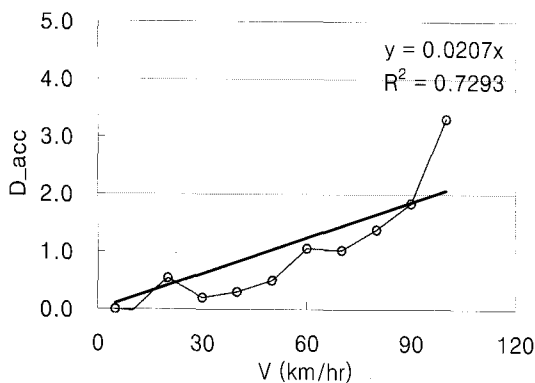
〈그림 5〉 증속에 따른 수직변위의 동적증폭계수와 회귀분석결과

### 4.2 진동가속도

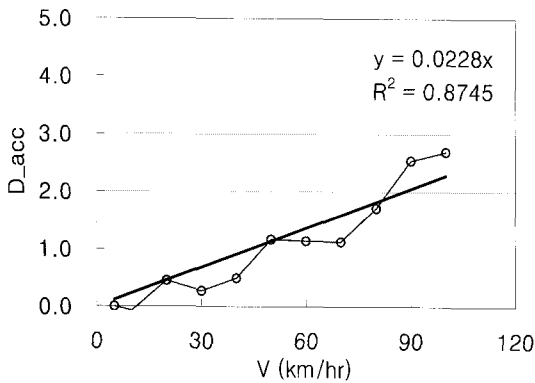
각 주형에서 측정된 최대수직진동가속도를 표 3에 나타내었다. 또한 증속에 대한 수직진동가속도의 응답의 변화를 분석하기 위해 가속도 응답에 대한 동적증폭계수를 식(2)와 같이 산출하여 각 주형별로 그림 6에 나타내었다. 또한 이에 대한 회귀분석 결과를 병행 표기하였다.



(a) G1



(b) G2



(c) G3

〈그림 6〉 증속에 따른 진동가속도의 동적증폭계수와 회귀분석결과

$$D_{acc} = \frac{a_{dynamic} - a_{static}}{a_{static}} \quad (2)$$

여기서,  $a_{dynamic}$  : 증속에 따른 진동가속도,  
 $a_{static}$  : 최소속도에 대한 진동가속도

〈표 4〉 재하차량에 의한 최대 수직진동가속도

| 속도  | 진행방향 | G1 (g) | G2 (g) | G3 (g) |
|-----|------|--------|--------|--------|
| 5   | 터널방향 | 0.056  | 0.063  | 0.057  |
| 10  | 교량방향 | 0.061  | 0.058  | 0.055  |
| 20  | 터널방향 | 0.093  | 0.091  | 0.088  |
| 30  | 교량방향 | 0.157  | 0.080  | 0.068  |
| 40  | 터널방향 | 0.106  | 0.094  | 0.074  |
| 50  | 교량방향 | 0.109  | 0.137  | 0.085  |
| 60  | 터널방향 | 0.170  | 0.135  | 0.117  |
| 70  | 교량방향 | 0.116  | 0.134  | 0.115  |
| 80  | 교량방향 | 0.168  | 0.171  | 0.135  |
| 90  | 터널방향 | 0.220  | 0.223  | 0.161  |
| 100 | 교량방향 | 0.278  | 0.232  | 0.245  |

### 4.3 동적증폭계수 비교

표 5는 식(1)과 (2)로부터 산출된 각 응답별 동적증폭계수를 나타낸 것이다. 변위와 가속도에 대한 단순한 동적증폭계수의 비교는 큰 의미가 없으므로 속도에 따른 증폭계수의 증가율을 회귀분석결과로부터 비교하는 것이 타당하다. 여기서 회귀식의 기울기는 속도증가에 따른 각 응답의 민감도를 나타낸다고 할 수 있다. 그림 5에 나타낸 변위에 대한 동적증폭계수에 대한 회귀식의 기울기는 0.004~0.005, 그림 6에 표

〈표 5〉 각 응답별 동적증폭계수 비교

| 속도  | 수직변위에 대한 동적증폭계수 |       |       | 진동가속도에 대한 동적증폭계수 |        |        |
|-----|-----------------|-------|-------|------------------|--------|--------|
|     | G1              | G2    | G3    | G1               | G2     | G3     |
| 5   | 0.000           | 0.000 | 0.000 | 0.000            | 0.000  | 0.000  |
| 10  | 0.005           | 0.007 | 0.004 | 0.103            | -0.072 | -0.025 |
| 20  | 0.009           | 0.011 | 0.004 | 0.678            | 0.451  | 0.542  |
| 30  | 0.010           | 0.011 | 0.006 | 1.827            | 0.271  | 0.202  |
| 40  | 0.006           | 0.009 | 0.003 | 0.903            | 0.492  | 0.303  |
| 50  | 0.008           | 0.008 | 0.003 | 0.968            | 1.173  | 0.501  |
| 60  | 0.028           | 0.023 | 0.020 | 2.061            | 1.146  | 1.054  |
| 70  | 0.075           | 0.074 | 0.074 | 1.079            | 1.135  | 1.027  |
| 80  | 0.064           | 0.063 | 0.059 | 2.023            | 1.720  | 1.385  |
| 90  | 0.023           | 0.021 | 0.011 | 2.957            | 2.544  | 1.842  |
| 100 | 0.039           | 0.039 | 0.029 | 3.996            | 2.694  | 3.311  |

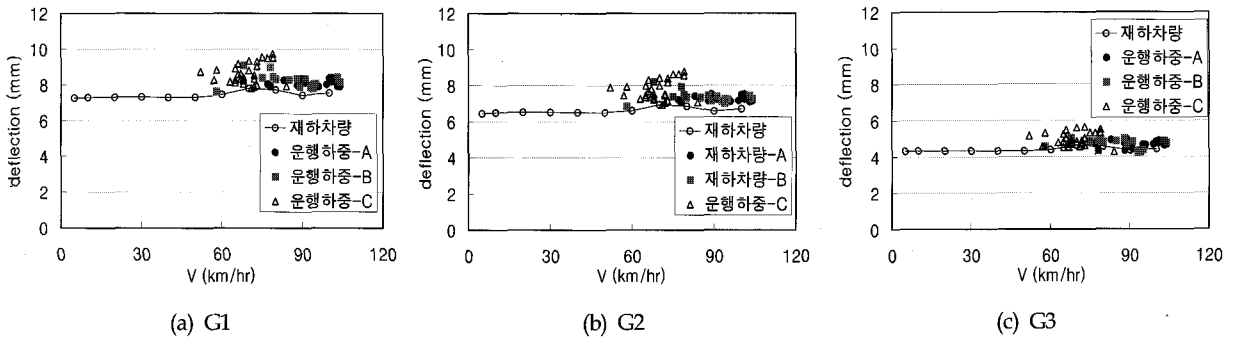
시된 가속도의 회귀식의 기울기 0.0207~0.0306로 산출되어 변위에 비해 가속도의 증가율이 4~7배정도 큰 것으로 나타났다. 따라서 향후 속도향상이 예상되는 구간에서 과도한 처짐의 증가로 발생하는 문제보다는 진동의 문제가 더 심도 있게 논의되어야 할 것이다.

### 5. 운행열차하중에 의한 교량응답

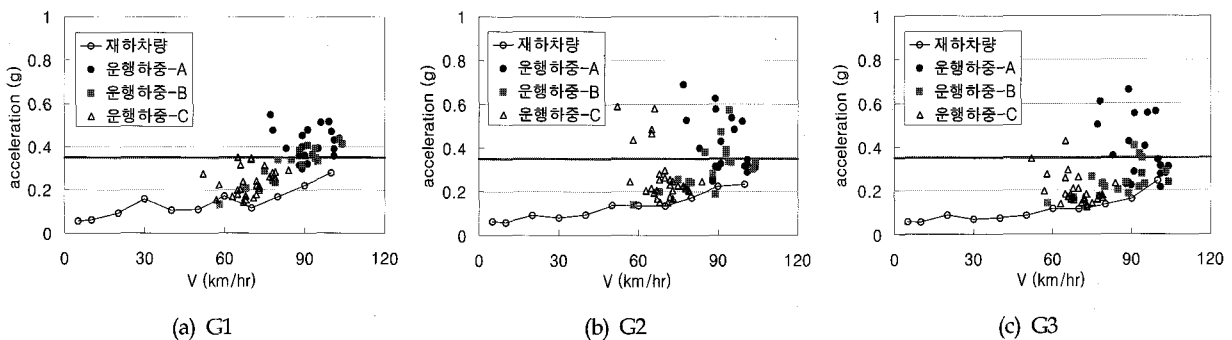
그림 7은 G1, G2, G3에서 계측된 열차유형에 따른 최대 처짐값을 비교한 것이다. 앞서 분류된 운행열차에서 중·저속으로 운행되나 가장 큰 축중을 갖는 운행하중-C에서 가장 큰 처짐이 발생하는 것을 알 수 있다. 이로부터 동적변위는 속도에 대한 영향보다는 축중의 크기에 지배됨을 유추할 수 있다. 또한, 모든 경우에 있어서 현행 철도설계기준(철도청, 1999)은 처짐 제한값을  $L/800$ 으로 제한하고 있고, UIC(EERI, 1995)에서는 높은 수준의 승차감을 요구할 때 120km/h 미만의 속도에서는  $L/900$ 의 한계규정을 제시하고 있다.

두 규정에 의한 한계값은 각각 42.38mm와 37.67mm 본 연구의 대상 교량은 처짐 두 한계값 이내로 규정을 만족하고 있다. 그림 7에서 보여주는 값은 단선 주행에 의한 값이므로, 복선 주행을 고려하여 단순히 처짐이 2배 증가한다고 하여도 최대값이 20mm를 넘지 않기 때문에 한계 규정을 만족하는데는 이상이 없다.

그림 8은 G1, G2, G3에서 계측된 열차유형에 따른 순간최대진동가속도를 비교한 것이다. 진동가속도의 경우 축중이 가장 큰 운행하중-C보다 비교적 고속도대역으로 운행되는 운행하중-A와 운행하중-B의 진동가속도 수준이 큰 것으로 나타났다. 이것은 진동가속도에 미치는 열차속도의 영향에 대한 단적으로 보여주는 예라 할 수 있다. 유럽에서 장대레일 유도상 철도교량에서 열차속도가 200km/h 이상일 경우 적용하는 순간 최대 진동가속도 허용값인 0.35g (EERI, 1999)를 초과하는 경우가 상당수 존재하는 것으로 나타나 향후 기존선 고속화시 동적 사용성에 문제가 발생할 가능성을 내포한다 할 수 있다.



〈그림 7〉 열차 유형별 수직처짐의 최대응답 비교



〈그림 8〉 열차 유형별 수직진동가속도의 최대응답 비교

## 5. 결론

본 연구에서는 프리플렉스 철도교량에 대한 시험차량과 랜덤차량에 의한 동적 변위 및 가속도를 측정하여 분석하였다. 이러한 분석은 프리플렉스교량형식이 철도교로서 나타내는 동적 거동이해에 기여할 것이며, 분석 결과는 다음과 같다.

1) 프리플렉스 교량의 감쇠비가 2.14%로 일반적인 콘크리트 구조물의 감쇠비인 5%보다 현저히 적게 나타나므로 여진동이 오래도록 발생한다.

2) 재하차량에 의한 증속실험으로부터 증속에 따른 변위 응답의 증가보다 가속도의 증가가 더 큰 것으로 나타나 속도 향상 계획에 있어 교량에서 발생하는 진동가속도의 검토가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

3) 운행하중에 대한 계측 결과, 변위는 속도에 대한 영향보다는 철도차량의 하중에 더 크게 영향을 받으며 가속도는 속도에 대한 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

4) 철도교량의 동적성능을 평가하는 지표로서 순간최대진동가속도 측면에서, 본 연구의 실험대상인 교량은 저속도 대역인 60km/h~70km/h에서조차 0.35g를 초과하는 경우가 있으며, 속도의 증가에 따라 초과하는 경우가 대부분을 차지한다는 것을 확인하였다.

5) 철도교량의 공용연수(50년~100년)를 감안할 경우 현재 및 향후 건설될 철도교량은 현 운행속도 이상으로 주행하는 열차를 안전하게 지지할 수 있는 성능을 갖추기 위해서는 현행 철도설계기준(철도교편)의 보완이 필요하다 판단됨.

현행 국유철도건설규칙의 1급선과 2급선은 LS-22

로 설계하여 각각 열차최고속도 200km/h와 150km/h를 수용할 수 있도록 규정하고 있으나, 철도설계기준(철도교편)의 설계기준을 만족하는 교량일지라도 향후 열차속도가 증속되어 200km/h에 근접하는 경우는 동적 안정성(stability)과 사용성(serviceability)에 문제가 발생할 가능성이 높다 할 수 있다. 특히, 유도상 철도교량상의 장대레일 장출에 대한 안정성과 여객열차의 승차감에 대한 사용성 측면에서 현행 철도설계기준(철도교편)의 보완이 시급하다 판단된다.

## 참고문헌

1. 오지택 외 (2002) 대륙간 철도연결에 대비한 표준열차하중 비교·분석, 건설기술혁신사업 1차년도 연차보고서, pp.55~82.
2. 철도청 (2000), 국유철도건설규칙
3. 철도청 (1999), 철도설계기준(철도교편)
4. Clough, R.W. and Penzien, J.P. (1993). "Dynamics of Structures," McGraw-Hill Inc.
5. Xia, H., De Roeck, G., Zhang, N., and Maeck, J. (2003). "Experimental analysis of a high speed railway bridge under Thalys trains," Journal of Sound Vibration, 268, pp.103-113.
6. ERRI D 190 (1995) Permissible Deflection of Steel and Composite Bridges for Velocities  $V > 160$  km/h : RP 5 Parametric Study Studies-Summary and Recommendations Final Report.
7. ERRI D214 (1999) Rail Bridges for Speeds  $> 200$  km/h, RP 9 Final Report