

디스크 받침에 의한 철도 판형교의 고유진동수 및 동적 거동 변화

Variation of Natural Frequency and Dynamic Behavior of Railway Open-Steel-Plate-Girder Bridge with Installing Disk Bearings

손지현* 최은수** 김현민*** 황원섭****

Son, Ji Hyun Choi, Eun Soo Kim, Hyun Min Hwang, Won Sup

ABSTRACT

The Open-Steel-Plate-Girder (OSPG) bridges are the one of the most prevalent bridge type among Korea railway bridges: they take 40% of the total. However, the line-type bearings used for the OSPG bridges generate problems on bridge dynamic behavior and maintenance. A solution to solve this problem is suggested in this study: which is the replacing the existing bearings by Polyurethane disk bearings. The disk bearing is a kind of elastic bearings using a Polyurethane pad. This study estimated the variation of the natural frequency and dynamic behavior of an OSPG bridge with driving Diesel locomotive and trains in service. The first natural frequency of the bridge is reduced by 3% due to installing the disk bearings. Also, the second and the third frequency are reduced 7 and 15%, respectively. The disk bearings installed under the bridge increase its vertical displacement, however, the pure displacement excluding the disk deformation is the almost same as that of the as-built bridge. The vertical acceleration is also not increased with the disk bearing under trains' current running speed. The shear pin in the disk bearing reduce the lateral displacement and acceleration of the bridge.

1. 서론

한국철도에서 판형교는 전체 교량의 약 40%를 차지하는 중요 형식 중의 하나이다. 그러나 판형교는 도상이나 콘크리트 슬래브가 없어 차량의 충격이 교량에 그대로 전달되기 때문에 소음과 진동이 크게 발생한다. 또한 판형교의 대표적인 교량받침인 선받침은 강제받침의 일종으로 이러한 충격을 하부의 교량받침 콘크리트(보자리)에 그대로 전달하기 때문에 이러한 충격으로 인한 콘크리트의 파손이 심각하다. 판형교의 손상부위 중 교량받침이 전체의 33%를 차지하고 있으며, 이의 대부분은 교량받침 콘크리트의 손상에 의한 것이다 (최은수 외, 2005). 판형교 교량받침 콘크리트 손상은 콘크리트의 파손과 더불어 교각상부의 파손을 유발하여 차량의 안전운행에 심각한 영향을 줄 수 있다. 기존의 선받침은 교축직각 방향에 대한 구속력이 부족하여 차량에 의해서 발생하는 횡압에 의해 교량이 교축직각방향으로 진동을 크게 발생시킨다.

본 연구에서는 실판형교에 폴리우레탄 패드로 제작된 탄성받침을 설치하여 속도별로 주행하는 차량의 이동하중에 의한 동적 거동 및 운행차량에 의한 동적 거동의 변화를 분석하였고, 이를 통해서 판형교에서의 탄성받침의 사용성을 검토하였다. 또한 탄성받침으로 인한 판형교의 고유진동수 변화를 동적 응답 분석을 통해서 규명하였다.

* 인하대학교 석사과정, 학생회원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

**** 인하대학교 토목공학과 교수, 정회원

2. 현장계측

2.1 디스크 받침의 제원 및 설치

본 연구에서 사용한 디스크 받침의 모양이 그림 1에 나타나 있다. 폴리우레탄을 사용하는 디스크는 천연고무에 비해 경도가 크기 때문에 고무받침과 달리 보강을 하지 않고도 사용이 가능하다 (오세환 외, 2005). 사용한 디스크는 원형으로 250mm×21mm ($\phi \times t$)의 크기를 가지고 있으며, 측면은 압축 시 부풀음 (bulging)현상을 방지하기 위해 안으로 파여 있다. 중앙에 고정핀이 있어 온도팽창 등에 의해서 디스크가 이동하는 것을 방지하며, 가동단에서는 PTFE를 사용하여 온도팽창 등에 의한 교량의 움직임 흡수할 수 있다.

그림 2에는 선받침을 제거하고 디스크 받침을 설치하는 과정이 나타나 있으며, 디스크 받침 설치 시 그림 2(c)와 같이 철근으로 받침 콘크리트를 보강하여 균열 및 파손을 방지하였다. 그림 2(a)에서 보듯이 선받침의 하부에는 철근 보강이 되어 있지 않기 때문에 충격과 다른 원인에 의해서 균열과 파손이 용이하게 발생된다고 판단된다.

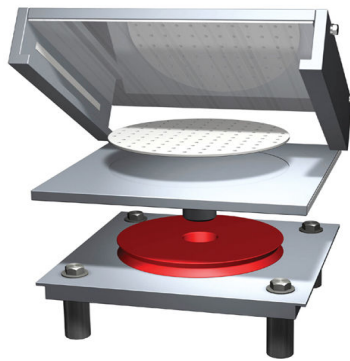


그림 1. 폴리우레탄 디스크 받침의 형상 및 구성품



(a) 제거 중인 선받침



(b) 디스크 받침 (고정단과 가동단)



(c) 설치 중인 디스크 받침 (가동단)



(d) 설치 완료한 디스크 받침 (가동단)

그림 2. 디스크 받침을 설치하는 과정

2.2 대상교량 및 재하실험

실험대상 교량은 경북선 옥산-상주 구간에 위치한 소천교로서 경간 12.9 m의 관형교이다 (그림 3 참조). 소천교는 2004년 11월에 플렌지 중앙하부에 횡방향 진동을 방지하기 위해 4800mm × 2400mm × 35mm (L×W×t) 크기의 보강판 보강이 있었으며, 2005년 10월에 디스크 받침 교체 작업을 실시하였다. 소천교는 길이에 따라 단면이 변하고 있으며, 그림 4에 단면의 치수가 나타나 있다. 그림 4에서는 보강판의 단면은 포함되지 않았다.

거더 중앙하부의 수직 및 수평방향에 대한 변위 및 가속도가 측정되었으며, 디스크 받침의 변위를 측정하기 위해 받침 위에도 변위계를 설치하였다 (그림 5 참조). 차량의 재하실험은 초기에 5 km/h의 유사정적 주행실험을 실시한 후, 10 km/h부터 90 km/h 까지 10 km/h 씩 증속하면서 교량의 동적 응답을 측정하였다.



그림 3. 하부 보강된 소천교의 전경

동적 응답의 측정에서 변위와 가속도에 추가적으로 보강판 접속부의 변형율을 측정하였다. 보강판 접속부에서는 곡률이 급속하게 변하게 되므로 응력의 집중현상에 의한 피로의 문제가 발생할 수 있다.

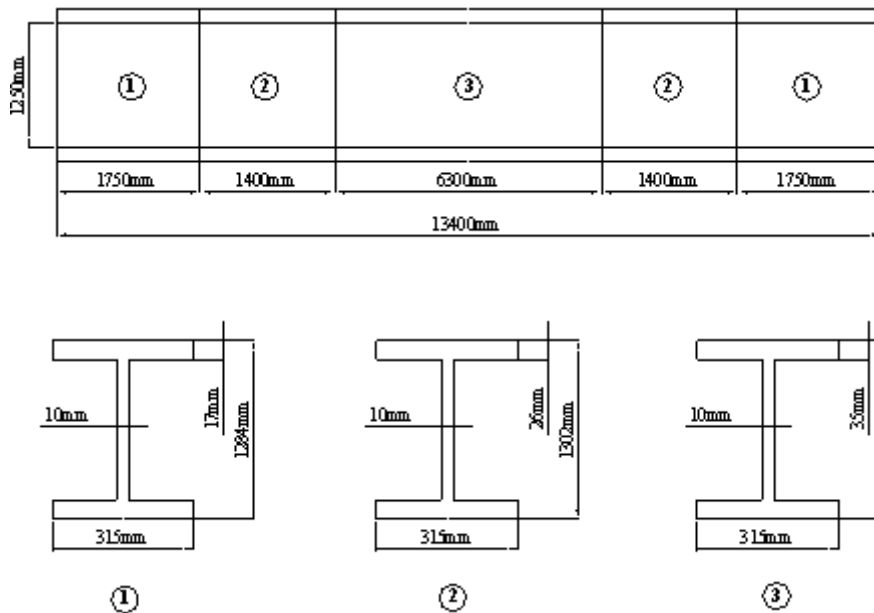


그림 4. 소천교의 단면형상의 변화



(a) 중앙하부의 변위계 및 가속도계

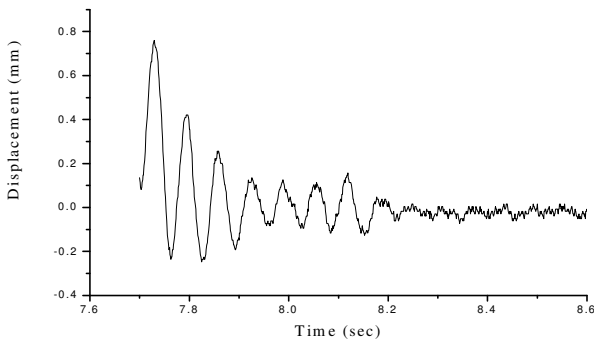


(b) 받침부의 변위계

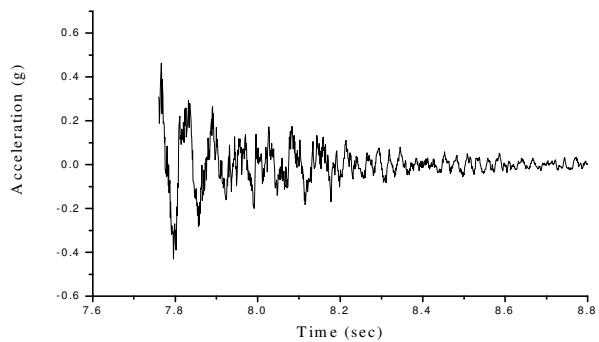
그림 5. 응답 측정을 위한 센서설치

2.3 고유진동수의 변화

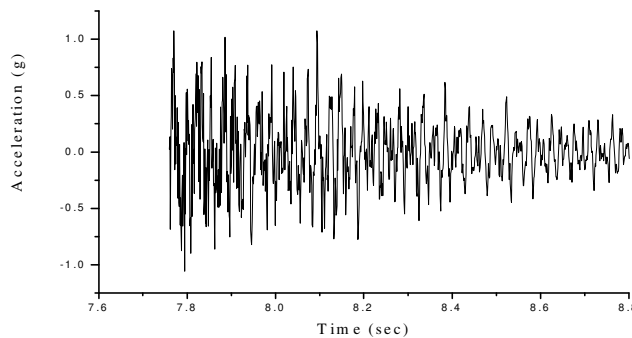
탄성받침에 의한 대상교량의 고유진동수 변화를 분석하기 위해서 중앙의 변위 및 가속도를 사용하였고, 추가적으로 1/2지점의 가속도 시간이력을 사용하였다. 차량의 주행에 의해서 발생하는 시간이력에서 가진부분은 제거하고 여진부분 즉 자유진동 시간이력을 사용하여 FFT (Fast Fourier Transform) 분석을 실시하여 고유진동수를 추정하였다. 그림 6에는 탄성받침 설치전의 중앙에서의 변위 및 가속도의 자유진동 시간이력과 1/2 지점에서의 가속도 이력이 나타나 있으며, 그림 7에는 탄성받침 설치 후의 각 응답에 대한 자유진동 시간이력이 나타나 있다. 각 시간이력에 대한 FFT 분석의 결과가 그림 8 및 9에 나타나 있다.



(a) 중앙의 변위 자유진동 시간이력

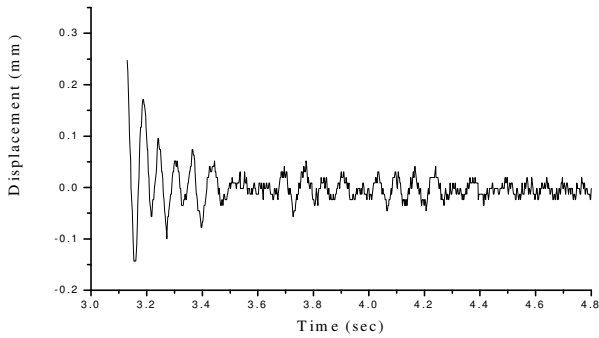


(b) 중앙의 가속도 자유진동 시간이력

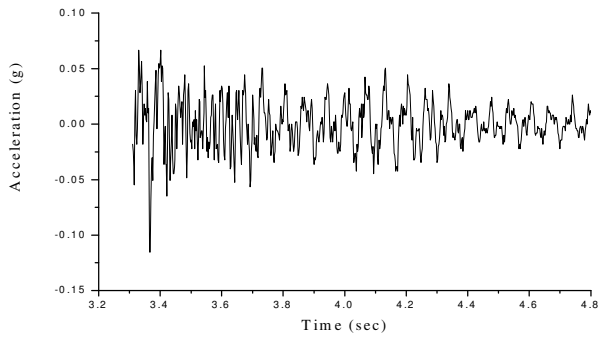


(c) 1/4지점의 가속도 자유진동 시간이력

그림 6. 탄성받침 설치 전 자유진동 시간이력



(a) 중앙의 변위 자유진동 시간이력



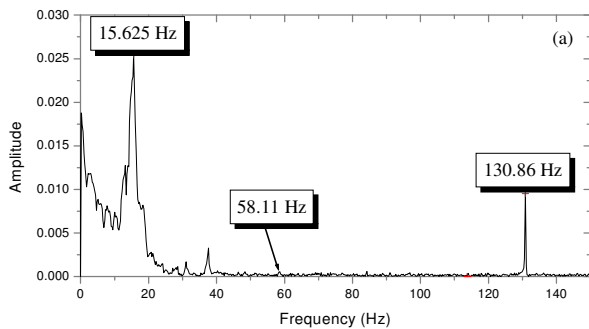
(b) 중앙의 가속도 자유진동 시간이력

그림 7. 탄성받침 설치 후 자유진동 시간이력

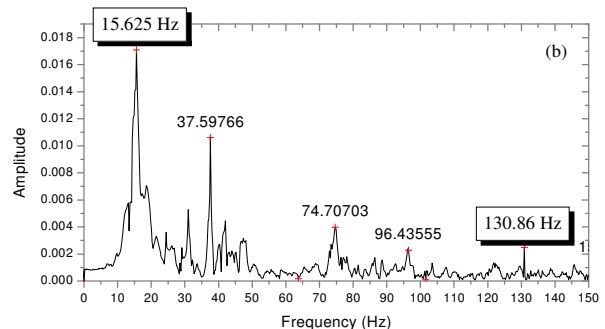
수직방향에 대한 탄성받침 설치 전의 고유진동수는 1차모드가 15.625 Hz이고, 2차모드가 58.11 Hz이며, 3차모드는 130.86 Hz로 추정된다. 단순보의 경우 2차 및 3차모드 고유진동수는 1차모드 고유진동수의 4 및 9배로 발생하여야 하며 (Cough and Penzien, 1993), 위에서 추정된 값은 이와 유사하다. 정확히 일치하지 않는 것은 실교량의 지지조건이 완전한 단순지지 상태를 형성하지 못하기 때문이라고 판단된다. 그림 8(a)에서 2차모드 고유진동수에 대한 스펙트럼의 크기가 아주 작게 나타나는 것은 측정 부위가 중앙으로 단순보의 2차모드 진동은 중앙에서 발생하지 않기 때문이다. 그림 8(b)에서도 동일하게 2차모드를 관찰할 수 없다. 그러나 1/4지점에서 측정한 가속도의 스펙트럼인 그림 8(c)에서는 2차모드의 스펙트럼이 1차모드에 비해 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 단순보의 1/4 지점에서는 2차모드의 진동이 최대 발생하는 위치이다.

그림 9의 탄성받침에 의한 대상교량의 수직방향에 대한 고유진동수가 1차모드 13.137 Hz, 2차모드 54.20 Hz 및 3차모드 111.82 Hz로 추정된다. 중앙변위 자유진동의 PSD (Power Spectrum Density) 인 그림 9(a)에서 2차모드는 54.20 Hz로 나타났으나, 가속도 자유진동 PSD인 그림 9(b)에서는 58.11 Hz로 나타나고 있다. 탄성받침에 의해서 1차 및 3차모드의 고유진동수가 감소하였기 때문에 2차모드의 고유진동수도 감소하여야 한다. 따라서 그림 9(a)의 54.20 Hz가 적합하다고 판단된다.

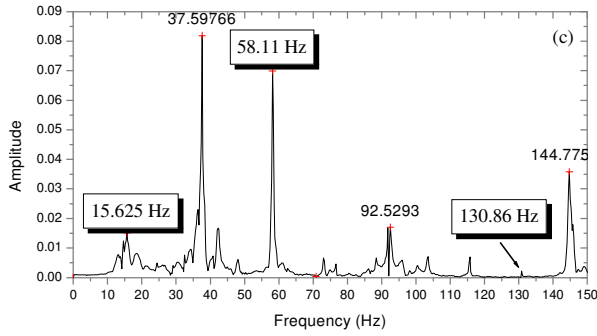
탄성받침에 의한 고유진동수의 변화를 표 1에 정리하고, 탄성받침 설치 후의 고유진동수를 설치 전의 고유진동수에 대한 비율을 퍼센트로 표시하였다. 표 1에서 고차모드에서 탄성받침에 의한 고유진동수의 변화가 크게 발생하는데, 이것은 일반적인 경향과 일치한다.



(a) 중앙 변위 자유진동의 PSD

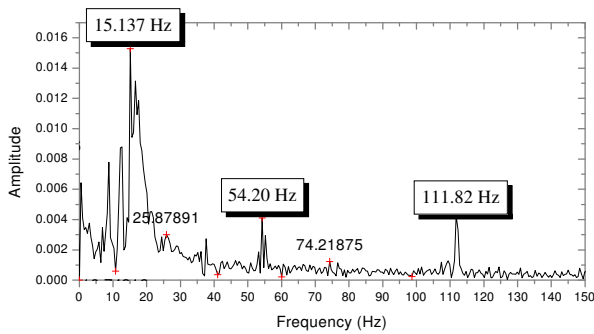


(b) 중앙 가속도 자유진동의 PSD

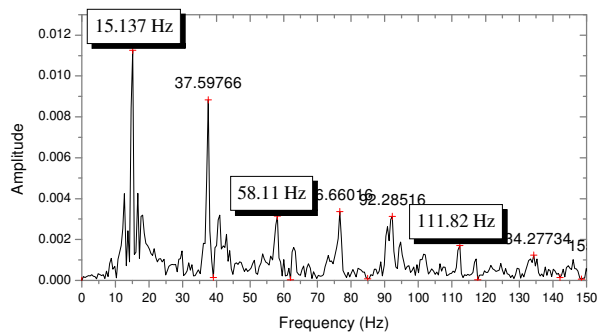


(c) 1/4 지점 가속도 자유진동의 PSD

그림 8. 탄성받침 설치 전 교량의 고유진동수 추정



(a) 중앙 변위 자유진동의 PSD



(b) 중앙 가속도 자유진동의 PSD

그림 9. 탄성받침 설치 후 교량의 고유진동수 추정

표 1. 탄성받침에 의한 고유진동수의 변화

모드차수	1차 (Hz)	2차 (Hz)	3차 (Hz)
설치 전	15.628	58.11	130.86
설치 후	15.137	54.20	111.82
비율 (%)	96.87	93.27	85.45

3. 동적 거동 및 분석

분석 대상 응답은 수직 및 수평방향의 변위와 가속도이다. 속도별 각 응답의 시간이력에서 최대값을 결정하여 속도의 증가에 의한 탄성받침의 영향을 분석하였다. 가속도 시간이력은 원 가속도 이력을 30 Hz Low Pass Filter 사용하여 필터링한 시간이력을 사용하였다. ERRI에서는 교량의 고유진동수의 1.5-2배의 차단진동수(cut-off frequency)를 사용하여 철도교량의 가속도 이력을 필터링하도록 권장하고 있다. 대상교량의 기본 고유진동수가 15 Hz 내외인 것을 고려하면 30 Hz 필터는 합리적이다.

3.1 수직 변위의 변화

그림 10에는 재하차량이 5~90 km/h로 주행할 경우 탄성받침 설치 전·후의 속도별 최대값이 정리되어 있다. 탄성받침은 탄성에 의한 교량의 전체적인 강제운동이 발생하기 때문에 탄성받침 설치 전의 순수한 교량의 변형에 의한 변위 및 진동보다 크게 발생하는 것이다. 그림 10의 속도별 최대 수직변위에서도 탄성받침에 의해서 90 km/h 주행 시 최대 0.55 mm 증가를 보이며, 평균적으로 6%의 증가를

보이는 것도 탄성받침에 의한 강제운동에 기인하는 것이 크다. 그림 10에서 교량 중앙의 전체 변위에서 탄성받침의 변위를 제거한 순수한 교량의 변형에 의한 순수변위 (pure deflection)를 추가적으로 나타내었다. 교량의 순수변위는 다음과 같이 구하여지며, 순수변위는 탄성받침 설치 전의 처짐과 거의 동일하게 나타났다.

$$d_p(t)_{\max} = d_t(t) - \frac{1}{2}(b_1(t) + b_2(t)_{\max})$$

여기서, $d_p(t)$: 교량의 순수변위 시간이력
 $d_t(t)$: 교량 전체변위의 시간이력
 $b_i(t)$: 각 탄성받침 변위의 시간이력

3.2 수평 변위의 변화

속도가 증가함에 따라 수평변위가 증가하지만, 평균적으로 탄성받침에 의해서 수평변위는 감소하고 있다. 설치 전의 평균 변위가 0.459 mm이며, 설치 후의 평균이 0.258 mm로 약 43.7%의 감소효과가 있다. 변위 감소의 크기는 실제적으로 아주 작은 값이다. 이러한 변위가 감소는 거더의 변형에 의한 변위의 감소라고 판단되지는 않는다. 탄성받침 이전의 선받침은 구조적으로 횡방향에 대해서 완전한 구속을 형성하지 못한다. 즉, 마찰력을 제외하면 구속력이 없는 것이다. 횡방향에 대해서 전단핀이 있거나 겹이 크기 때문에 작은 변위의 이동에 대해서는 의미가 없다.

반면 탄성받침은 전단핀이 완전히 밀착하여 횡방향 이동을 완전히 구속하게 되므로 그림 11에서 나타나는 차이는 탄성받침의 전단핀이 교량의 교축직각방향으로 강제이동을 제어해서 발생한다고 판단된다.

대상교량인 소천교는 하부보강이 없는 경우에는 수평변위가 1 mm 이상 발생했으나, 하부보강에 의해서 그림 11와 같이 감소하고 있다 (오지택, 2005). 이러한 경우 횡방향 보강에 의한 거더의 변형을 제어하여 수평변위가 감소한다고 판단된다. 그러나 탄성받침은 횡방향에 대해서 구속조건만을 변화시켰으므로 위의 판단은 타당성이 있다. 이러한 교량의 횡방향에 대한 강제운동의 제어는 차량의 주행안정성에 기여할 것으로 기대된다.

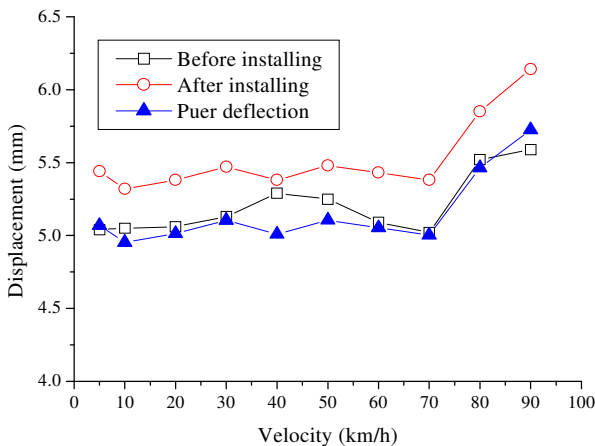


그림 10.탄성받침에 의한 최대 수직처짐의 변화

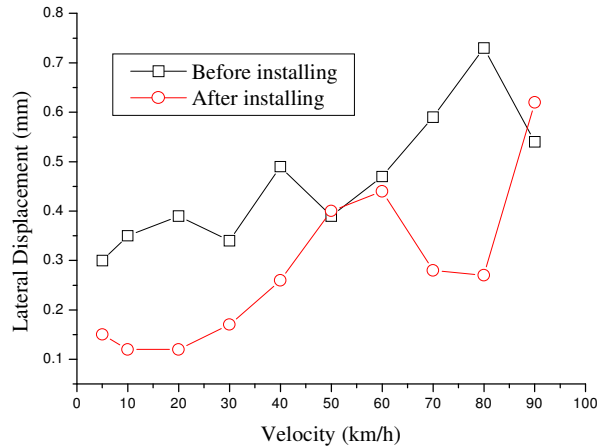


그림 11.탄성받침에 의한 최대 수평변위의 변화

3.3 수직 가속도의 변화

철도교량의 가속도 증가는 구조적으로는 어떠한 문제를 야기하는 것은 아니다. 그러나 차량의 승차감이나 철도교량 상의 궤도구조의 안정성에 영향을 주므로 일정한 값을 초과하지 않을 것을 권고하고 있다. ERRI에서는 자갈도상이 있는 교량의 경우 최대 수직 가속도를 0.35 g로 제한하고, 자갈도상이 아닌 콘크리트 슬래브 궤도 등에서는 0.5 g로 제한할 것을 권고하고 있다. 따라서 탄성받침에 의한 대상교량의 수직 가속도 변화를 분석하는 것은 중요한 항목이다. 본 연구에서는 위에서 언급한 것과 같이

초기 가속도 데이터를 30 Hz Low Pass Filter를 이용하여 필터링한 후 최대 가속도를 결정하였다.

그림 12에 최대 수직 가속도의 변화가 속도별로 나타나 있으며, 전체적으로 탄성받침 설치 전·후의 수직 가속도의 변화는 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 또한, 재하차량의 속도가 70 km/h를 초과하여 80 및 90 km/h 주행 시 가속도가 크게 증가하는 경향도 동일하다. 탄성받침을 사용하면 교량에서의 가속도는 일반적으로 증가한다. 그러나 본 연구의 대상교량에서는 그러한 증가현상이 뚜렷하게 나타나지 않으며, 그 원인은 탄성받침의 강성이 상대적으로 크기 때문이라고 판단된다. 단순지지 교량에서 상대적으로 강성이 작은 탄성받침을 사용하는 경우 수직 가속도의 증가현상은 해석적 연구를 통해서 설명되고 있다 (최은수 외, 2005).

탄성받침 설치 전후의 교량 모두 차량의 주행속도 80 km/h 이상에서 가속도가 권고안인 0.5 g를 초과하고 있다. 따라서 차량의 보다 안정적인 운행과 개선된 승차감의 확보를 위해서는 관형교에서는 수직 가속도 저감을 위한 대책을 강구할 필요가 있다.

3.4 수평 가속도의 변화

철도교량에서 횡방향의 가속도에 대한 규정이나 권고사항은 없으나, 횡방향 가속도의 증가는 레일면과 차륜의 접촉면에서 레일에 작용하는 윤종과 횡압에 영향을 줄 수 있다. 윤종과 횡압은 차량 탈선의 중요 영향인자로 횡방향 가속도의 증가로 인한 윤종과 횡압의 변화는 차량의 탈선 안정성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 탄성받침에 의한 대상교량의 횡방향 가속도의 변화를 검토하는 것은 의미 있는 항목이다.

그림 13에서 보듯이 관형교에서의 수평가속도의 크기는 수직가속도에 비해 상대적으로 작게 나타나고 있으며, 속도가 증가해도 크게 증가하지 않는다. 탄성받침 설치에 의해서도 수평 가속도의 크기에 거의 변화가 없으며, 탄성받침 설치에 의해서 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 수평 변위에서도 언급한 것과 같이 탄성받침의 전단편에 의한 횡방향 구속이 설치 전의 선받침에 비해 양호하기 때문이라고 판단된다.

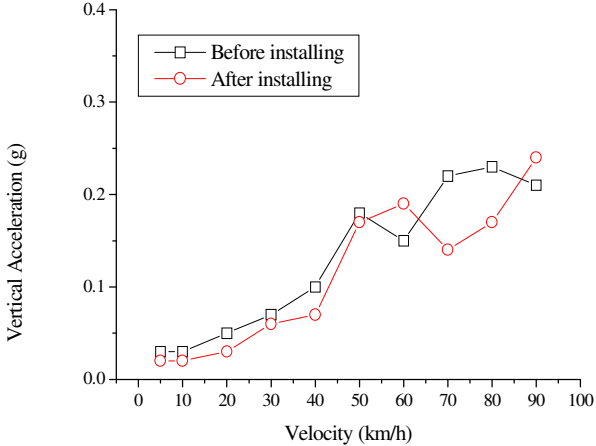
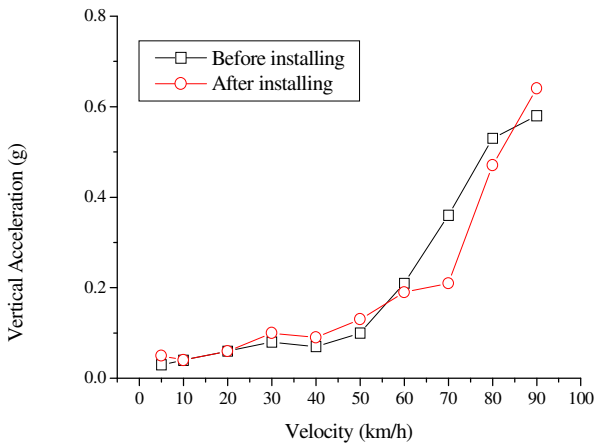


그림 12. 탄성받침에 의한 최대 수직가속도의 변화

그림 13. 탄성받침에 의한 최대 수평가속도의 변화

3.5 접속부 변형율의 변화

하부보강판의 접속부는 곡률이 급격히 변화는 곳으로 응력이 크게 발생할 수 있기 때문에 피로문제에 대한 안전성 확보를 위하여 변형율을 점검할 필요가 있다. 그림 14에서 보듯이 접속부의 변형율은 60 km/h 이하의 저속에서는 탄성받침에 의해서 약간 증가하나, 70 km/h 이상의 중속에서는 오히려 감소하는 경향이 있다. 그러나 전체적으로 변형율에서 차이가 발생한다고 판단하기 어렵다. 따라서 탄성받침에 의해서 발생하는 순수한 휨은 설치 전후가 거의 동일하다고 판단되며, 이 결과는 순수처짐과 탄성받침 설치 전의 처짐이 거의 동일한 것과 일치하는 것이다.

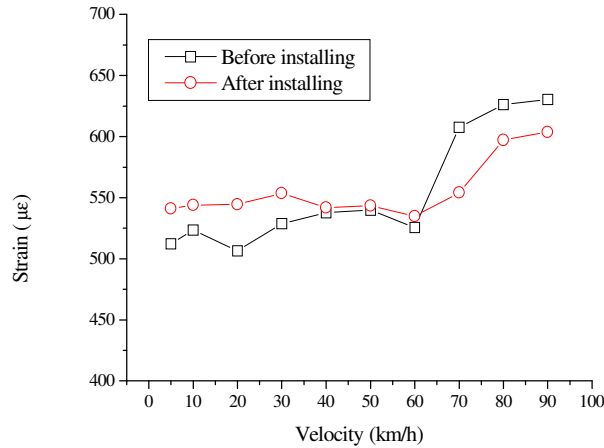


그림 14. 보강판 접속부의 변형을 변화

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 폴리우레탄 디스크를 사용한 탄성받침을 철도 판형교에 설치하여 탄성받침에 의한 고유진동수의 변화 및 동적 거동 특성의 변화를 고찰하였다.

1. 탄성받침의 설치에 의해 1차 모드의 고유진동수의 감소는 약 3%로 크지 않았으나, 2차 및 3차 모드의 고유진동수의 감소는 각각 7 및 15%로 상대적으로 크게 나타났다. 고차모드가 교량 시스템의 강성 변화에 민감한 것과 본 연구의 결과는 일치하고 있으며, 이러한 결과를 이용하여 탄성받침의 결과를 추정하는 것이 가능하다.

2. 동적 거동에서 수직처짐은 약 5% 정도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 탄성받침의 변형을 제거한 순수한 교량의 변형에 의한 처짐의 증가 거의 발생하지 않았다. 이는 탄성받침 설치에 의해서 교량의 변형을 또는 응력 증가현상이 발생하지 않는다는 것을 의미한다.

3. 수평방향의 변위는 탄성받침의 전단된 구속작용에 의해서 약간 감소하는 경향을 보였다. 연구결과에서 보여주는 것은 기존의 선받침이 횡방향에 대해서 완전한 구속작용을 하지 못한다고 판단된다. 이러한 불안정성은 차량 주행의 안정성에 불리하게 작용할 수 있으므로 시급히 개선하는 것이 바람직하다.

4. 수직방향의 가속도는 탄성받침에 의해서 증가하지는 않았다. 그러나 설치 전후 모든 교량에서 재하 차량의 속도 80 km/h 이상에서 최대 가속도가 0.5 g를 상회하고 있어 이에 대한 대책이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 2005년 선로구축물 핵심기술연구 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

- 박영훈, 전준창, 박용길. (2003). “외부 후 긴장 보강공법 적용에 따른 합성형의 동적 거동,” 대한토목학회 논문집, 제 23권 6A호, pp.1165-1173.
- 박남희, 최진유, 유철수, 강영중. (2000). “강판형교 바닥판 모멘트의 해석기법,” 한국강구조학회 논문집, 제12권 1호, pp.17-28.
- 임성순. (2000). “이동하중을 받는 판형교의 동적 거동에 대한 실험적 연구,” 한국강구조학회 논문집, 제 12권 4호, pp.407-416.
- 오지택. (2005). 기존선 속도향상에 대비한 판형교의 동적 안정성 향상 기술 개발 보고서, 한국철도기술연구원.
- 최은수, 김현민, 오지택, 김성일. (2005). “철도교용 고무패드 설치에 따른 판형교의 동적 거동 분석,” 한국강구조학회, 17권 3호, pp.295-306.
- Clough, R.W. and Penzien, J. (1993). Dynamics of Structures, the second edition, MacGraw-Hill, Taipei, Taiwan.
- Yau, J.D., Wu, Y.S. and Yang, Y.B. (2001). “Impact response of bridges with elastic bearings to moving loads,” Journal of Sound and Vibration, 248 (1), pp.9-30.
- Yang, Y.B., Liao, S.S., and Lin, B.H. (1995). “Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams,” ASCE, Journal of Structural Engineering, 121 (11), pp.1644-1650.