

철도 판형교에서 스페리칼받침의 유지보수 및 동적 거동

Maintenance and Dynamic Behavior of Spherical Bearings under Railway Open-Steel-Plate-Girder Bridges

최은수* 오주택** 감현민***
Choi, Eunsoo OH, Jatae Kim, Hyun-Min

ABSTRACT

Line type rigid bearings for Open-Steel-Plate-Girder railway bridges have several problem in service, and they are unstable structurally. Thus, spherical bearings having advanced maintenance capability and device to resistance up-lift are developed and replace the existing ones. A experiment of maintenance for a new placed spherical bearings under real Open-Steel-Plate-Girder bridge is conducted and their good maintenance performance is proved. The dynamic behavior of the bridge is measured and analyzed for the two cases of the existing and replacing bearings. Therefore, the effect of the new spherical bearings on the railway bridge is assessed.

1. 서 론

한국철도에서 판형교는 전체 교량의 약 40%를 차지하는 중요 형식 중의 하나이다 (오세환 외, 2005). 그러나 판형교는 도상이 없어 차량의 충격이 교량에 그대로 전달되기 때문에 소음과 진동이 크게 발생하며, 판형교의 대표적인 교량받침인 선받침은 강제받침의 일종으로 이러한 충격을 하부의 교량받침 콘크리트(보자리)에 그대로 전달하기 때문에 이러한 충격으로 인한 콘크리트의 파손이 심각하다. 선받침을 지지하고 있는 에폭시 모르타르는 콘크리트에 비행 강도가 작기 때문에 특히나 충격에 취약하다. 판형교의 손상부위 중 교량받침이 전체의 33%를 차지하고 있으며, 이의 대부분은 교량받침 콘크리트의 손상에 의한 것이다 (최은수 외, 2005). 판형교의 교량받침부의 손상은 그림 1에서 보는 것과 같이 콘크리트의 파손과 더불어 교각상부의 파손을 유발하여 차량의 안전운행에 심각한 영향을 줄 수 있다. 또한, 선받침은 교량의 구속을 접촉에 의한 마찰력에 의존하기 때문에 내진성능이 매우 취약하다. 따라서 철도 판형교에 설치되어 있는 선받침을 성능이 우수한 교량받침으로 교체할 필요성이 존재한다. 철도 판형교 교량받침에 요구되는 성능을 정리하면 다음과 같다.

- ① 교량받침 교체 등 유지보수 성능이 우수해야한다.
- ② 내진성능을 보유하여 지진에 대한 저항성이 있어야 한다.
- ③ 차량 주행에 의한 교량받침 들림현상에 대한 저항성(부반력 저항성)이 있어야 한다.

판형교와 더불어 철도교에서 차량의 주행에 의해서 교량받침이 들리는 현상이 관측되고 있다. 이러한 현상은 철도교의 특징이며, 판형교에서는 경간에 비해 수직처짐이 상대적으로 크기 때문에 단부에서 들림현상이 더 크게 발생하며, 판형교 교량받침은 이에 대한 저항성이 요구된다. 판형교는 위에서 언급한 것과 같이 차량 주행에 의한 충격으로 교량받침 콘크리트가 손상 받을 가능성이 상대적으로 높고, 교량받침은 주기적으로 교체해야 하므로, 교체 시에 교량받침 콘크리트를 파쇄하지 않고 교체할 수 있는 유지보수 성능이 요구된다. 또한, 발생 가능한 지진에 대해서 교량받침이 손상을 받지 않고 저항할 수 있는 내진성능 보유가 요구된다.

* 홍익대학교 토목공학과 조교수, 정회원 E-mail : eunsoochoi@hongik.ac.kr,

TEL : (02)320-3060 FAX : (02)302-3060

** 한국교통연구원, 도로교통연구실 책임연구원, 비회원

*** 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 주임연구원, 정회원

본 연구에서는 이러한 요구에 따라서 철도 관형교에 사용될 수 있는 개량된 스페리칼 받침을 개발하였다. 스페리칼 받침은 기본적으로 내진성을 보유하고 있으며, 위에서 요구되는 성능을 추가적으로 보유하여 기존 스페리칼 받침을 관형교에 사용하기 적합하게 개량하였다. 본 연구의 목적은 개량된 스페리칼 받침을 제작하여 관형교 하부에 설치하고, 개량된 스페리칼 받침의 유지보수 성능 및 교량받침 교체에 의한 관형교의 거동과 교량받침의 거동을 분석하는데 있다. 이를 위해서 교량받침 교체 전후에 관형교 및 교량받침의 차량 주행에 의한 동적 거동을 계측하여 분석하였다.

오세환 (2005) 등은 철도교용 고무패드의 정적 실험에 의해 강성을 추정하는 기법을 제시하였으며, 최은수 (2005) 등은 철도 관형교에서 탄성지지 강성의 변화에 의한 교량의 동특성 및 동적 거동의 변화를 분석하였다. 국외 연구자로는 Yau et al. (2001)은 탄성지지 된 단순보의 속도와 보 길이의 함수로 표시되는 응답표면(response envelop)을 제시하였으며, Yang et al. (2004)은 탄성지지 단순보의 이동하중에 의한 공진과 소진에 관한 연구를 실시하였다.



(a) 교량받침 콘크리트 파손



(b) 교각상부 콘크리트 파손

그림 1. 관형교 교량받침부의 파손 형상

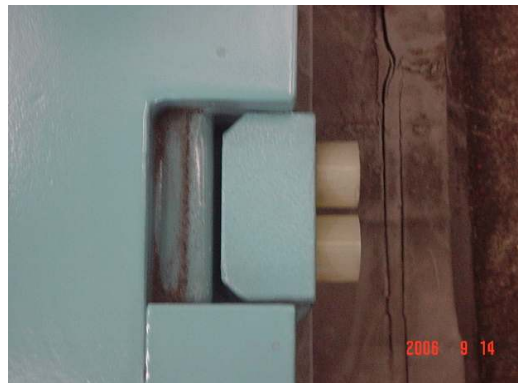
2. 개량된 스페리칼 받침의 특징

개량된 스페리칼받침의 특징은 기존의 받침에 유지보수 성능개선을 고려하여 고안되었다. 그림 2(a)에서 보듯이 상판과 솔플레이트가 볼트로 연결되어 있어 교체 시에 볼트를 해체 후 프레임과 내부의 고력항동판만을 교체할 수 있다. 기존의 스페리칼받침의 경우 콘크리트를 파쇄하고, 상부 솔플레이트를 교량 거더에서 용접을 제거한 후, 교량받침 전체를 교체하는 방법으로 유지보수가 이루어 졌다. 따라서 본 연구에서 사용하고 있는 유지보수 성능개선 스페리칼받침은 이러한 어려움 없이 교량받침의 주요 작동부를 교체할 수 있도록 고안된 것이 특징이다. 주요 구성품의 교체 방법은 그림 3에 간략하게 나타나 있으며, 잭을 사용하여 3 mm 인상 후, 교체하는 작업이 가능하므로 차량의 주행에 크게 영향을 주지 않은 상태에서 교체작업이 가능하다.

그림 2(b)에는 부반력에 저항할 수 있는 고무스프링이 나타나 있으며, 이는 받침의 측면에 설치되어 있다. 그림 2(a)에 있는 T자 형태의 꺾쇠를 이용하여 상판의 들림에 의해서 고무스프링이 압축을 받게 고안되었다.



(a) 스페리칼 받침



(b) 부반력 저항 고무스프링

그림 2 사용된 스페리칼받침의 모습

2.1 교량받침 교체 실험

개량된 스페리칼받침의 유지보수 성능을 검증하기 위해서 사용 중에 교체하는 실험을 수행하였다. 실험에서 중요한 인자는 인상높이 및 교체시간이다. 인상높이 교량을 과도하게 인상하는 경우 레일의 레벨에 변화가 있어 차량의 주행에 악영향을 주기 때문에 교량받침 교체 시 주형의 인상높이를 3 mm로 제한하고 있다. 따라서 3mm를 인상한 상태에서 교량받침 교체 가능성 여부가 유지보수 성능에서 중요한 사항이다. 교량받침 교체 시 차량을 서행을 하게되는데, 이는 전체적인 철도운영에 영향을 줄 수 있다. 따라서 교체시간을 최소화하는 것도 또한 매우 중요한 사항이다.

개량된 스페리칼 받침은 경북선의 옥산-청리 구간의 평천천교에 설치되어 있으며, 교대 상에 설치된 가동단 스페리칼 받침을 대상으로 실험이 진행되었다. 교체 실험은 받침을 주형에서 완전히 분리한 다음 다시 조립하는 과정으로 수행하였다. 그림 3에는 분리 및 조립하는 사진이 나타나 있으며, 교체하는 과정은 다음과 같다.

①잭을 설치→②솔플레이트와 프레임 연결볼트 해체→③잭을 3mm 인상→④받침의 하판부 분리
→⑤상부판 볼트 분리 및 상부판 분리→⑥받침 구성품 분리 및 새것으로 교체→⑦잭 인하



(a) 잭 설치



(b) 볼트해체



(c) 잭 인상



(d) 하판 분리



(e) 상판분리



(f) 교체 조립

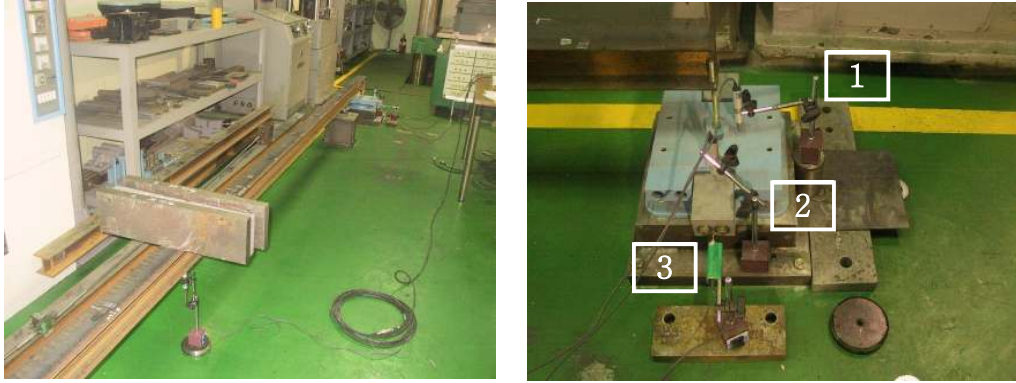
그림 3. 개량된 스페리칼 받침의 교체실험 과정

교체실험에서 총 소요시간은 약 20분으로 매우 양호하였으며, 기존의 콘크리트를 파쇄하여 교체하는 시간과 비교하면 획기적인 단축이라고 할 수 있다. 콘크리트 파쇄에 의한 교량받침 교체는 최소한 2일이 소요되기 때문에 그동안에는 잭을 인상한 채로 유지해야 한다. 잭을 인상한 상태에서 차량의 주행은 레일 레벨은 차이에 의해서 레일과 차량에 모두 좋지 않은 영향을 줄 수 있다.

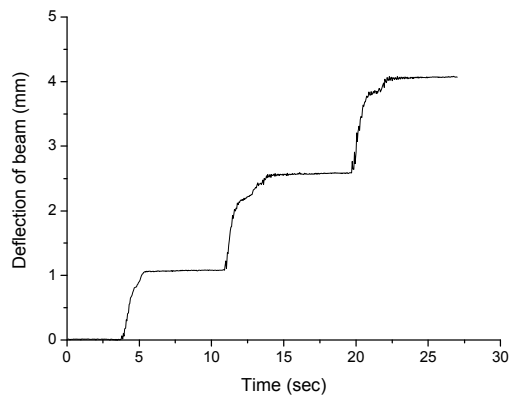
2.2 부반력 저항 실험

부반력에 저항하기 위해서 설치한 고무스프링의 거동을 파악하기 위해서 부반력 실험을 그림 4와 같은 실험장치를 통해서 수행하였다. 그림 4의 보는 단순지지되어 있으며, 돌출보는 보의 중앙부 하중에 의해서 들림이 발생하게 되고 이는 교량받침에 들림현상을 유발하도록 설치되었다. 부반력 저항 고무스프링은 폴리우레탄 고무로 길이 35mm, 내경 10mm 및 외경 30mm로 제작되었다. 폴리우레탄 고무의 경도는 85A, 90A 및 95A 세 가지에 대해서 실험을 진행하였다. 고무스프링은 교량받침 양 측면에 총 4개를 설치하였으며, 보 중앙에 순차적으로 정적하중을 재하하여 고무스프링의 거동을 측정하였다. 정적재하에 의해서 보에 처짐이 발생하면 교량받침 상판이 들리게 되고(변위 ①), 교량받침 상판의 드림은 측면 꺾쇠의 상부 들림(변위 ②)으로 전달되고, 이는 꺾쇠 측면을 밀어 넣어 고무스프링을 압축하게 된다(변위 ③). 정적하중은 세 개의 쇠막대를 순차적으로 재하하였으며, 막대의 무게는

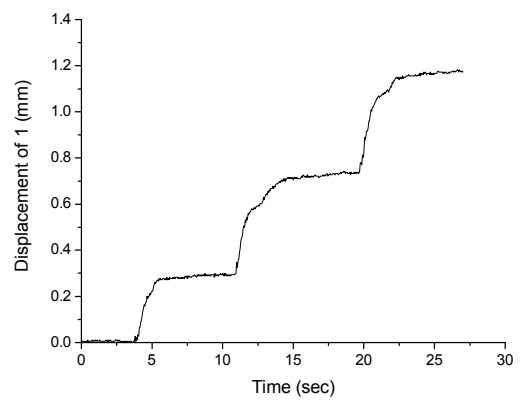
27.15, 35.70 및 35.95 kg이다. 그림 5에는 쇠막대를 순차적으로 재하하였을 발생하는 각 부분의 변위가 나타나 있으며, 이 때 사용된 고무스프링의 경도는 85A 이다.



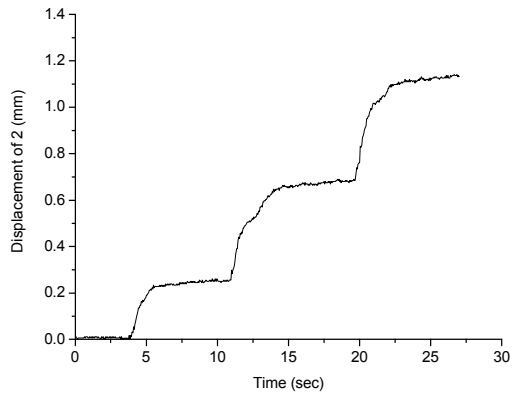
(a) 부반력 실험의 보 및 정적하중 (b) 교량받침과 변위계
그림 4. 고무스프링의 부반력 저항 실험



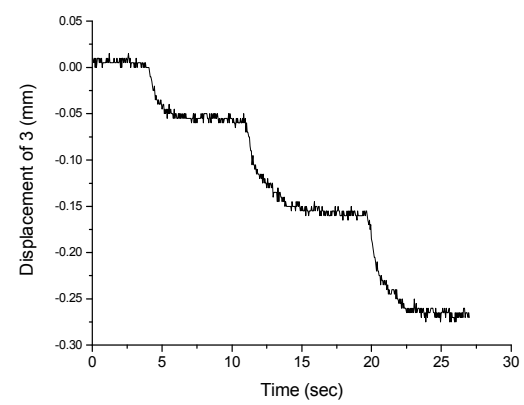
(a) 보 중앙의 처짐



(b) 교량받침 1번 변위



(c) 교량받침 2번 변위



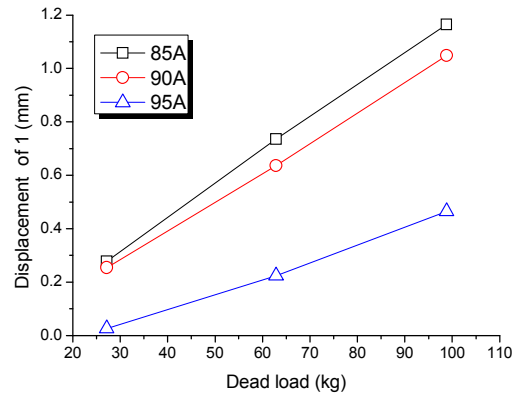
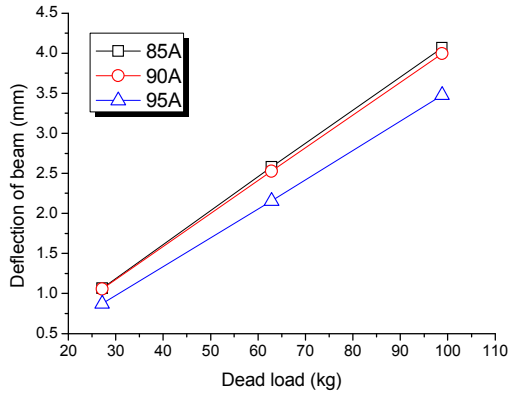
(d) 교량받침 3번 변위

그림 5. 고무스프링 85A 부반력 정적실험 결과

그림 6에는 순차적인 정적재하에 의해서 교량받침의 각 부위에서 발생하는 변위를 고무스프링의 종류에 따라 나타내었다. 보의 중앙처짐과 교량받침 각 부분의 들림변위는 고무스프링의 경도(hardness)가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 경도가 큰 고무스프링이 강성(stiffness)이 크게 작용하는 것이다. 경도 85A와 90A 고무스프링에 대한 들림은 95A 고무스프링의 경우보다 상대적으로 크게 발생

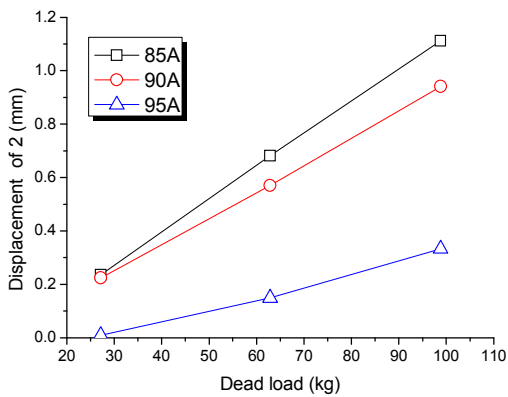
하였다. 하중 증가에 의한 들림변위의 증가는 거의 선형거동을 보이고 있다. 고무는 기본적으로 압축에 대해서 비선형 거동을 보이지만, 개량된 스페리칼 받침에 사용되는 고무스프링의 설계 및 제작은 선형거동에 기초하여 실시할 수 있다.

철도 관형교에서 차량 주행에 의한 교량받침 1번 위치에서의 들림변위는 약 0.1mm 내외로 매우 작다 (오세환, 2006). 따라서 경도가 크고 강성이 큰 고무스프링의 경우 제작상의 어려움이 존재한다. 90A 폴리우레탄 고무를 사용한 고무스프링은 거동에서도 거의 완전한 선형거동을 보이며, 제작 상에도 큰 어려움이 없기 때문에 이를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

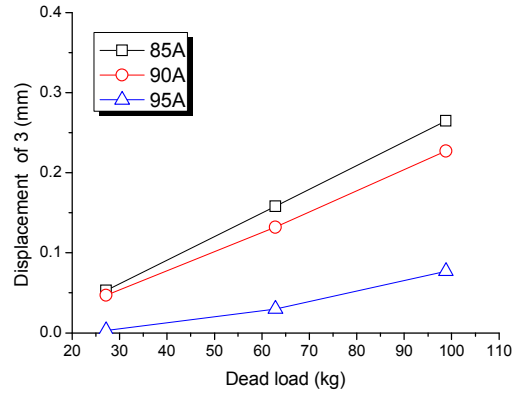


(a) 보 중앙의 처짐

(b) 교량받침 1번 변위



(c) 교량받침 2번 변위



(d) 교량받침 3번 변위

그림 6. 고정하중과 각 부위 변위의 관계

3. 관형교 및 교량받침의 동적 거동 분석

개량된 스페리칼 받침을 실교량에 설치하는 경우 교량 및 교량받침의 동적 거동 변화를 분석하기 위해서 철도 관형교를 선택하여 기존의 선받침을 개량된 스페리칼 받침으로 교체하는 작업과 교량받침 교체 전후에 차량 주행에 의한 교량 및 교량받침의 거동을 계측하였다. 교체작업 및 계측은 2006년 10월 -11월 사이에 진행되었으며, 대상 교량은 경북선 청리-옥산 구간에 위치하고 있는 12m 형 관형교인 평천천교이다. 12m 관형교에 대한 제원 및 단면은 오세환 (2005) 논문에서 나타나 있다.

3.1 교량받침 교체 및 차량 주행 실험

교량받침의 교체는 차량주행의 중단없이 수행하도록 잭을 사용하여 교량주형을 지지한 상태에서 이루어진다. 잭을 사용하여 교량 주형을 인상하는 경우, 레일의 높이변화가 발생하여 차량주행에 영향을 주기 때문에 인상높이를 3mm 이내로 제한하고 있으며, 이를 준수하여 작업을 진행했다. 또한, 작업의 안전을 확보하기 위해서 차량의 주행속도를 40km/h로 감소시켰다. 그림 7에는 기존의 받침을 교체하는 작업과정이 나타나 있다.

교량받침은 교대부에 가동단 받침을 설치하였고, 교각 상부에 고정단의 받침을 설치하였다. 이는 기존의 선받침 배치와 동일하게 교량받침을 배치한 것이다.



(a) 기존받침 제거 및 주형지지



(b) 교체 중 차량의 주행



(c) 새로이 설치되는 교량받침



(d) 설치된 교량받침 안정화

그림 7. 교량받침 교체작업 과정

차량 주행실험은 디젤기관차의 증속주행에 의해서 이루어 졌으며, 최소 5 km/h의 유사정적 주행 후, 10-80 km/h까지 10 km/h 증속하면서 교량 및 교량받침의 거동을 계측하였다. 차량의 주행은 같은 속도로 양방으로 실시하였다. 차량 주행실험은 교량받침 교체 전후에 실시되어, 선받침 상태에서 교량의 동적 거동과 스페리칼 받침 상태에서 교량의 동적 거동을 비교할 수 있도록 하였다. 실험에서 계측항목은 교량 주형의 중앙부 수직처짐을 계측하였으며, 교량받침은 수직변위 및 수평변위를 계측하였다. 교량받침의 수직변위는 들림에 의한 변위 및 수직하부로 발생하는 변위를 계측하는 것이며, 수평변위는 교축방향으로 교량의 휨에 의해서 발생하는 변위를 계측하는 것이다. 그림 8에는 사용한 차량의 제원이 나타나 있으며, 그림 9에는 계측기의 설치 모습이 나타나 있다.

3.2 교량 주형의 수직변위

차량 주행에 의한 교량 주형 중앙부에서 발생하는 수직변위를 교량받침 교체 전후에 계측하여 비교하였다. 그림 10에는 속도별 최대 변위가 나타나 있다. 그림 10에서 주형 중앙의 수직변위는 선받침 상태에서는 옥산→상주 주행에서 평균 7.72 mm 발생하였으며, 상주→옥산 주행에서는 7.61 mm 발생하였다. 스페리칼 받침 상태에서는 옥산→상주 주행에서는 6.96 mm, 상주→옥산 주행에서는 6.76 mm 발생하여, 각각 선받침 상태에 비해 9.8 및 11.1% 감소하는 것으로 나타났다.

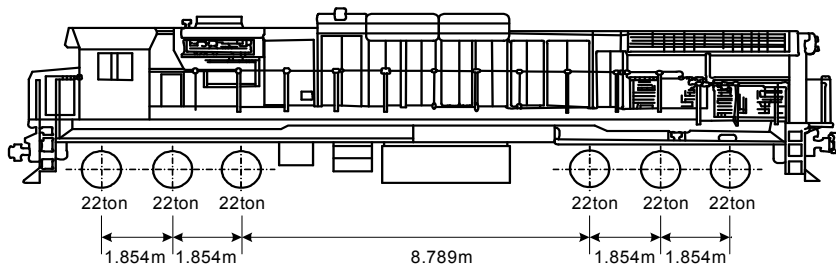


그림 8. 재하차량의 제원



(a) 주형 중앙의 수직변위계



(b) 교량받침의 수직 및 수평변위계

그림 9. 변위계 설치 모습

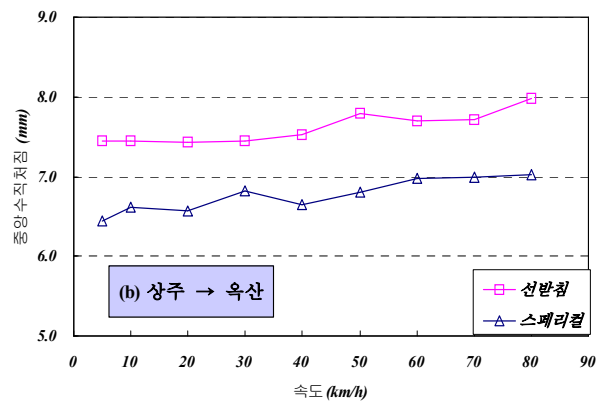
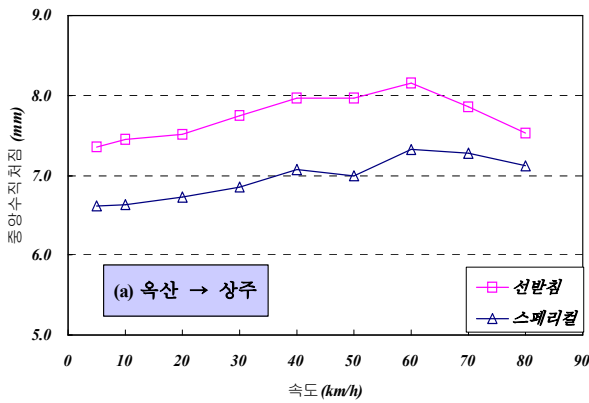


그림 10. 교량 주형 중앙부의 수직 최대변위

3.3 교량받침의 거동

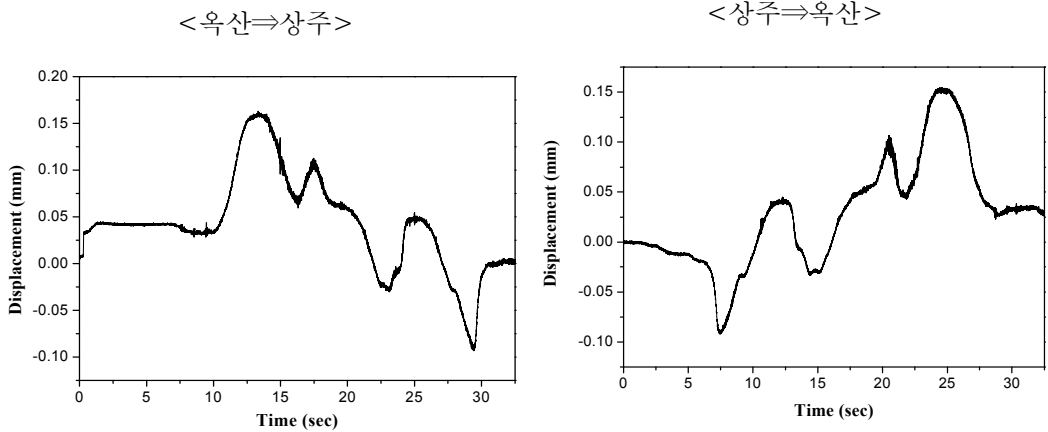
선받침 및 스페리칼 받침의 가동단과 고정단에서 측정한 수직변위의 시간이력이 그림 11과 12에 나타나 있다. 선받침의 경우 수직방향 거동에서 가동단과 고정단에서 기본적으로 차이가 없다. 두 경우 모두 쇄판을 막대위에 올려놓은 형태이기 때문이다. 그러나 그림 11에서 가동단의 변위와 고정단위 변위에 큰 차이가 나타나고 있다. 선받침의 고정단의 수직변위가 크게 나타나는 것은 주형의 바닥과 받침의 상면이 완전하게 접촉하고 있지 않기 때문에 발생한다고 판단된다. 즉, 선받침 고정단이 ‘뜬받침’ 상태라고 판단된다. 그림에서 가동단과 고정단에서 모두 들림현상이 관찰되고 있다.

스페리칼받침의 수직변위 시간이력은 그림 12에 나타나 있다. 스페리칼 받침의 경우, 가동단에서 수직변위가 고정단보다 상대적으로 매우 크다. 이는 가동단 받침에 설치된 PTFE의 영향으로 판단된다. 가동단에는 교량의 신축팽창을 흡수하기 위해서 PTFE를 사용하였는데, PTFE의 하중에 의한 변형이 교량받침의 수직변위에 포함되어 있다. 고정단의 경우 선받침의 가동단과 같이 수직변위가 매우 작게 나타나며, 가동단과 고정단 모두 들림현상은 관찰되고 있다. 가동단의 경우 선받침의 평균 수직변위는 0.116 mm 이며, 고정단의 경우는 0.22 mm 이다. 스페리칼 받침의 경우 가동단의 평균 수직변위는 0.274 mm 이며, 고정단의 평균 수직변위는 0.048 mm 이다. 스페리칼 받침의 고정단은 선받침이 안정되게 지지된 경우인 가동단 수직변위의 약 42%로 교량받침으로서 보다 안정적으로 교량을 지지하고 있다고 판단할 수 있다.

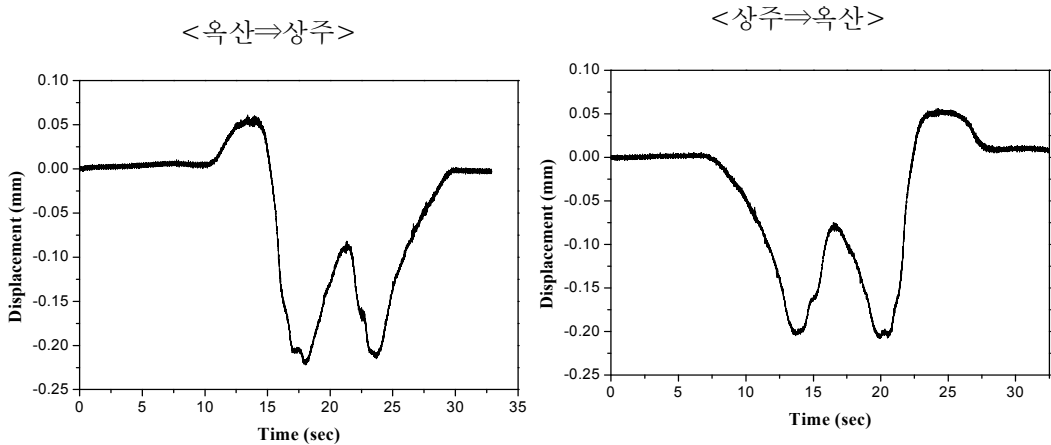
그림 14에는 두 받침의 속도별 최대 들림변위가 나타나 있다. 가동단에서 들림변위는 선받침의 경우 평균 0.147 mm 이며, 스페리칼받침은 0.048 mm 이다. 고정단의 경우 선받침은 평균 0.060 mm 이며, 스페리칼받침은 0.057 mm 이다. 스페리칼받침의 경우 들림변위가 가동단과 고정단에서 유사하게 나타나지만, 선받침의 경우 가동단이 고정단보다 약 2.5배 크게 나타나고 있다. 선받침의 고정단은 ‘뜬받침’ 상태이기 때문에 차량의 주행에 의해서 들림현상이 크게 나타나지 않을 수 있다. 따라서 선받침의 들림변위는 가동단에서 발생한 값이 일반적인 것으로 판단되며, 이 변위는 스페리칼 받침에서 발생한 들림변위에 비해 약 2.5 정도 크다. 따라서 개량된 스페리칼 받침에 사용한 고무스프링이 판형교 교량받침의 들림변위 제어에 일정한 역할을 했다고 판단된다.

교량받침의 전체적인 거동을 볼 때, 선받침에 비해 개량된 스페리칼받침이 양호한 거동을 보이고 있다. 따라서 이러한 보다 안정적인 지지는 교량의 전체적인 동적 거동에 영향을 줄 것으로 판단되며, 개량된 스페리칼받침에 의해서 교량의 중앙 수직변위가 감소하는 원인도 개량된 스페리칼받침의 안정적

지지에 기인한 것으로 판단된다.



(a) 선반침 가동단의 수직변위 시간이력



(b) 선반침 고정단의 수직변위 시간이력

그림 11. 선반침 가동단 및 고정단의 수직변위 시간이력 (5km/h 주행 시)

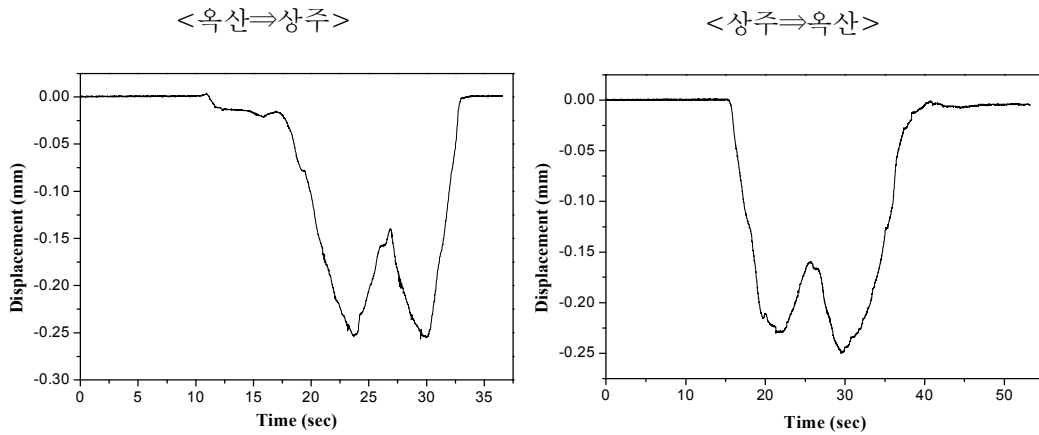
4. 결 론

판형교에 설치되어 있는 선반침은 안정적인 지지조건을 완전하게 충족하고 있지 못하며, 또한 하부 콘크리트에 균열발생 등의 여러 문제를 유발하고 있다. 따라서 이를 새로운 교량받침으로 교체할 필요성이 존재하고 있다. 판형교 선반침의 교체를 위해서 철도 판형교의 거동특성을 고려하여 유비보수 성능이 개선되고, 부반력에 대해 저항을 보유하도록 개량된 스페리칼받침을 고안·제작하였다. 이를 판형교에 설치하여 교량받침 교체 전후의 교량 및 교량받침의 동적 거동 비교를 차량 재하실험에 의해서 계측된 응답을 비교하여 수행하였으며, 교체 성능을 확인하기 위해서 교체작업을 설치된 교량받침에서 수행하여 유지보수 성능을 확인하였다.

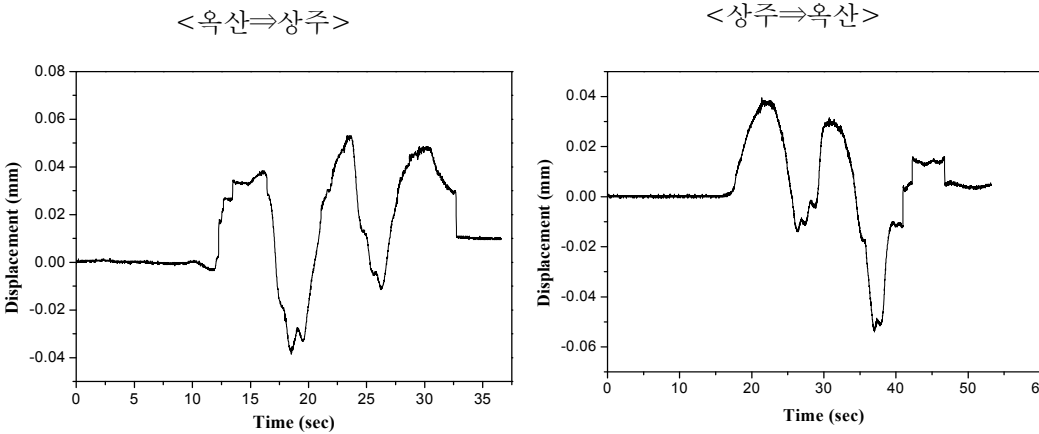
개량된 스페리칼받침은 판형교에서 기존의 선반침에 비해 교량 중앙 수직처짐을 감소시켜, 차량의 주행 안정성 개선에 기여하였다. 또한, 교량받침의 수직처짐에서도 선반침보다 양호한 거동을 보였으며, 부반력 작용에 의한 들뜸현상에서도 월등히 양호한 결과를 보여주었다. 이는 개량된 스페리칼받침에 설치된 부반력 저항 고무스프링의 작용에 의한 것으로 판단된다. 들뜸변위는 감소는 들뜸현상에 의해서 발생하는 하부 콘크리트의 충격량의 감소를 유발하여 콘크리트 손상 및 파손 방지에 긍정적인 효과를 줄 수 있다.

개량된 스페리칼받침은 차량이 주행하는 상태에서 교량 주형을 3 mm 인상하여 교량받침을 교체하는 것이 실험적으로 증명되었으며, 숙련된 기술자들에 의해서 약 20분 소요에 의해서 인상 후 교체작업이 완료되었다. 이러한 짧은 시간에 교량받침을 교체할 수 있는 것을 차량의 주행 및 전체적인 철도운영에 매우 이로운 것이며, 기존의 콘크리트를 파쇄하여 교체하는 것에 비해 아주 우수한 결과이다. 또한 교체 작업을 위해서 3 mm 인상은 차량의 주행에 의해서 레일에 거의 영향을 주지 않기 때문에 이 높이의 인상에서 작업이 이루어지는 것도 중용한 요소이다. 개량된 스페리칼 받침의 판형교 사용으로 판

형교의 거동 개선과 교량받침의 유지보수에 긍정적인 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

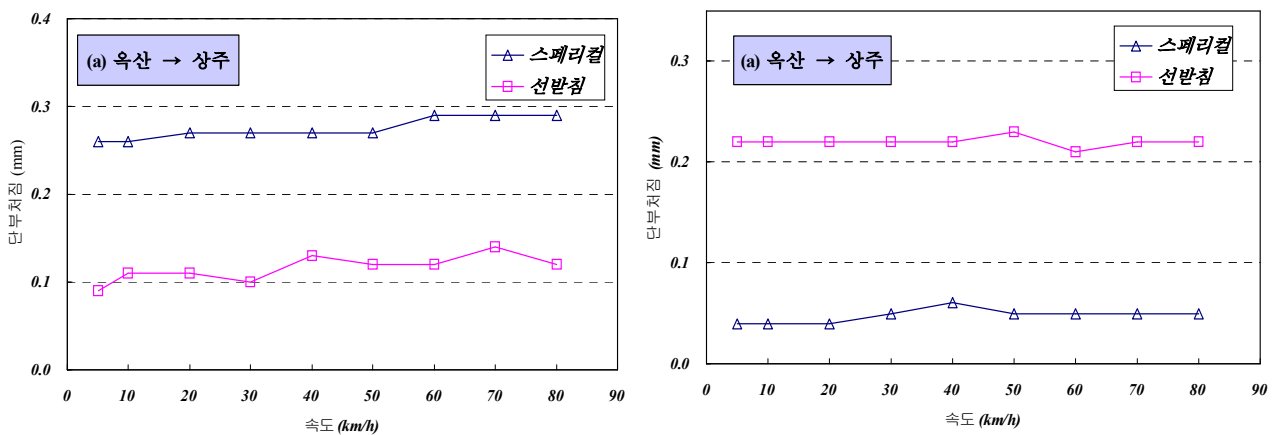


(a) 스페리칼 받침 가동단의 수직변위 시간이력



(b) 스페리칼 받침 고정단의 수직변위 시간이력

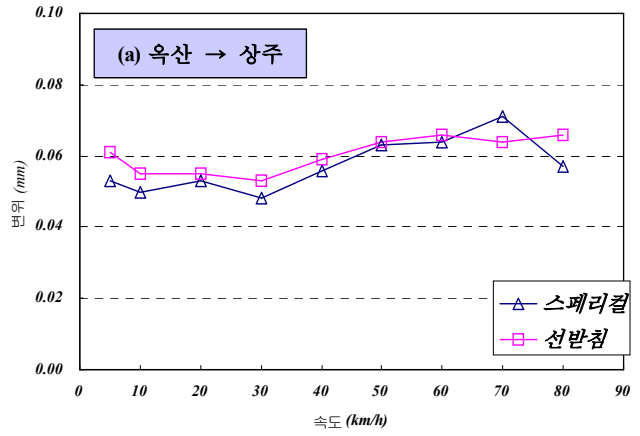
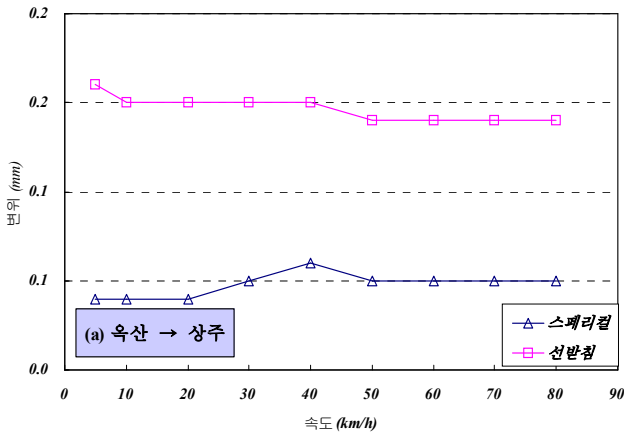
그림 12. 스페리칼 받침 가동단 및 고정단의 수직변위 시간이력 (5km/h 주행 시)



(a) 가동단의 속도별 최대 수직변위

(b) 고정단의 속도별 최대 수직변위

그림 13. 선받침 및 스페리칼 받침의 속도별 최대 수직변위



(a) 가동단의 속도별 최대 들림변위

(b) 고정단의 속도별 최대 들림변위

그림 14. 선받침 및 스펀지 받침의 속도별 최대 들림변위

참고문헌

1. 오세환, 최은수, 정희영 (2005), “철도교용 고무패드의 강성 추정기법”, 한국강구조학회 논문집, 제17권 3호, pp.307-316.
2. 오세환, 최은수, 정의형, 김학수 (2006), “철도차량하중에 의한 디스크받침의 정동적 거동특성”, 한국강구조학회 논문집, 제18권 4호, pp.469-480
3. 최은수, 김현민, 오지택, 김성일 (2005), “철도교용 고무패드 설치에 따른 판형교의 동적 거동 분석”, 한국강구조학회 논문집, 제17권 3호, pp.295-306.
4. 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.
5. 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.