

고무차륜형 경전철 고가구조물의 열차 제동하중 계측시험연구

A Field-test Study on the Braking Force of Elevated Structures for Rubber-tired Light Rail Transit

신정열*, 이안호*[†], 박재임*, 신인조**

Jeong-Ryol Shin*, An-Ho Lee*[†], Jae-Im Park*, In-Jo Shin**

Abstract Since the high-speed railway was introduced in Korea, there have been active studies of interaction of the track bridge structure resulted from the axial force of continuous welded rail which is generated when accelerated or put on the brakes according to the temperature changes of continuous welded rail. Based on these studies, the design standard of high-speed railway bridge has been established. However, the elevated structures of rubber-tired light rail transit have been designed and constructed based on the design code of conventional heavy railway bridges or on the one suggested by foreign rolling-stock manufacturer. This is why the elevated structures of rubber-tired rail transit in Korea are much massive, or over-designed and non-economically constructed. Therefore, in this paper, as the basic study on the design guideline of elevated structures for rubber-tired light rail transit, authors carried out the field test to analyze the braking force of elevated structures, which induced by braking the driving train at the speed of 60km/hr. Authors also briefly demonstrate the test and analyzing results of braking force acting on the substructure of elevated light-rail structures.

Keywords : Light Rail Transit, Rubber-tire, Elevated structure, Design guideline, Braking force

초 록 국내 고속철도가 도입되면서, 지금까지 고속철도 교량상 장대레일의 온도변화에 따른 신축 및 사제동시 발생하는 장대레일 축력으로 인한 궤도/교량구조물간 상호작용 연구가 활발히 이루어져 왔고, 이를 기반으로 철도교 설계기준이 마련된 바 있다. 하지만, 국내 운영 중인 고무차륜형 경전철 고가구조물에 대하여서는 설계 당시 별도의 국내 설계기준이 마련되어 있지 않아 일반 중전철용 철도교 설계기준 및 국외 경전철 차량제작사에서 제시한 설계기준을 참조하여 설계되었고, 이로 인해 경전철 고가구조물임에도 일반 철도교 수준으로 육중하게 비경제적으로 건설되었다. 이에, 본 연구에서는 경전철 고가구조물의 합리적인 설계기준 마련을 위한 일환으로, 고무차륜형 경전철의 열차 제동시 고가하부구조물에 작용하는 하중을 분석하기 위해 계측시험을 수행하였고, 현재 철도설계기준에서 제시하고 있는 제동하중과 계측시험결과를 비교·분석하였다.

주요어 : 경전철, 고무차륜, 고가구조물, 설계기준, 제동하중

1. 서 론

최근 대도시의 교통문제를 해결하기 위해 기존 도시철도시스템에 비해 경제적이고 효율적인 신교통 수단으로 경량의 차량시스템이 운영되는 경전철이 도입되고 있다. 이러한 경전철은

† 교신저자: 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 저심도·경전철연구단(ahlee@krrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 저심도·경전철연구단

** 부산교통공사 기술연구소

부산의 일부 복잡한 도심지 구간을 제외하고는 국내 용인, 의정부, 부산 4호선 및 김해 등은 전구간이 고가구조물 방식으로 건설되어 있다[1]. 이들 고가구조물의 경우, 도심지 내에 건설되는 점을 고려하지 못한 채 구조물의 기능적인 측면만을 고려하여 형고가 높고 단면이 큰 육중한 기존의 철도 고가구조물 형태로 건설되어 도시 미관을 해치고 있다.

이는 국내 경전철 설계 및 건설 시, 경전철 고가구조물에 대한 국내 설계기준이 별도로 마련되어 있지 않아 국외 차량 제작사에서 제시한 기준과 국내 중전철을 위한 철도설계기준을 참고하여 설계하였기 때문이다[2]. 따라서 보다 효율적이고 경제적인 경전철 고가구조물의 설계 및 건설을 위해 국내 환경과 경전철 차종 특성을 반영한 경전철 고가구조물 설계기준 마련이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 경전철 고가구조물의 슬림화 및 설계기준을 마련하기 위한 기초 연구로서 고무차륜형 경전철이 고가구조물 상을 주행할 때 열차의 제동 시 고가구조물에 작용하는 제동하중에 대한 영향을 분석하기 위하여 열차의 정속주행 및 제동시험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 시험개요

2.1.1 계측시험 대상 고가구조물

현장 계측구간은 고무차륜형 경전철시스템이 운영 중인 부산 도시철도 4호선으로 선정하였으며, Fig. 1과 같이 고촌역(11K265)과 안평역(12K356) 사이 상행선 직선부 및 곡선부로서 최고속도 70km/hr을 고려하여 직선부는 교각 P88~91 구간, 곡선부(R320m)는 교각 P94~97 구간을 대상으로 현장 계측시험을 수행하였다.

계측대상 고가구조물은 형식은 Fig. 2와 같이 경간 40m의 3경간 연속 강합성 박스 거더교이며, 두 번째 교각의 받침은 회전 변위만 가능하고 신축 변위가 불가능한 고정된 힌지이고, 나머지 교각의 받침은 신축 및 회전 변위가 불가능한 롤러 형태로 구성되어 있다. 단면 제원은 Fig. 3과 같다.



Fig. 1 Field-test site (Gochon~Anpyeong in Line 4, Busan)

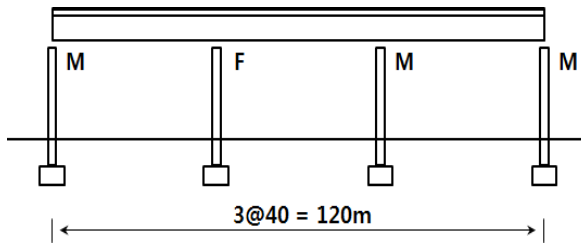


Fig. 2 Structural type of elevated structure

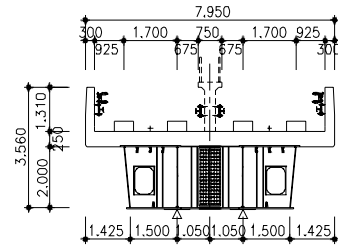


Fig. 3 The specification of elevated structure

2.1.2 주행시험 차량

주행시험 차량은 Fig. 4와 같이 최대 축중이 9.5톤인 고무차륜형 경량전차로서, 열차길이는 1량 기준 9.640m이며, 6량 1편성 기준으로 57.840m이다. 대차 중심간 거리는 5.3m이며, 첫 번째 차축에서 마지막 차축까지 거리는 53.50m이다.

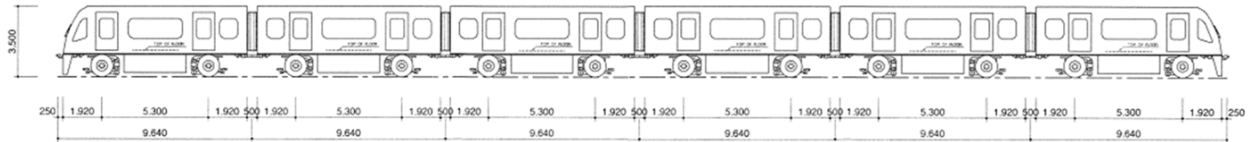


Fig. 4 The configuration of test AGT train

2.1.3 제동시험 방법

제동하중은 주행 중인 열차가 제동할 때 차량의 무게중심 위치에서 열차의 진행방향으로 수평으로 작용하는 하중으로서 고가 하부구조물의 교축방향으로 하중이 전달되어 교각 등 하부구조물의 응력을 증가시키기 때문에 경전철 고가구조물 설계 시 주요 설계하중으로 사용되고 있다.

제동하중 시험은 Fig. 5 및 6과 같이 안평역에서 고촌역 방향으로 직선부 및 곡선부 각각에 대해서 열차 주행시험을 수행하였다. 제동 시 발생하는 교축방향 하중이 고정단 교각에 최대가 발생되도록 하였으며, 콘크리트 변형률 센서는 대상 고가하부구조물 고정단 교각에 지면과 가까운 교각 부위에 교각 높이 방향으로 부착하였다. 주행속도에 따른 영향을 분석하기 위해 열차속도 60km/hr 정속 주행 중 직선부 및 곡선부 각각 5개소 지점에 선두 열차의 첫 번째 차축이 도달할 때 제동이 걸리도록 하여 고정단 교각에 발생하는 변형률을 측정하였다. 또한 기관사가 제동 조작을 하여 실제 차량에 제동이 걸리는 공주시간 1~1.5초를 고려하여 각 속도별 공주거리만큼 미리 열차에 제동이 걸리도록 하였다.

제동 시 발생하는 변형률은 제동없이 상기속도별 정상적인 정속주행 시험 시 발생하는 변형률 및 열차 제동에 따른 하중에 의해 발생하는 변형률 응답 이력곡선을 비교·분석하였으며, 이 차이를 통해 제동하중에 의한 교각에 추가된 변형률을 도출하였다.

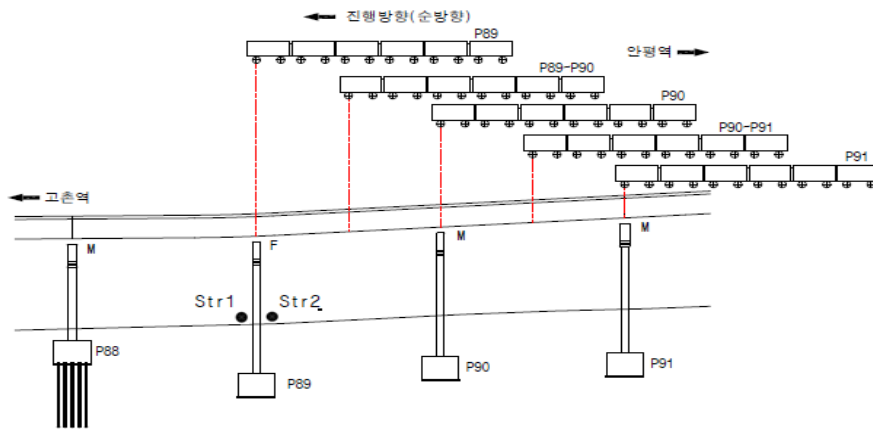


Fig. 5 The braking points of running train in straight line

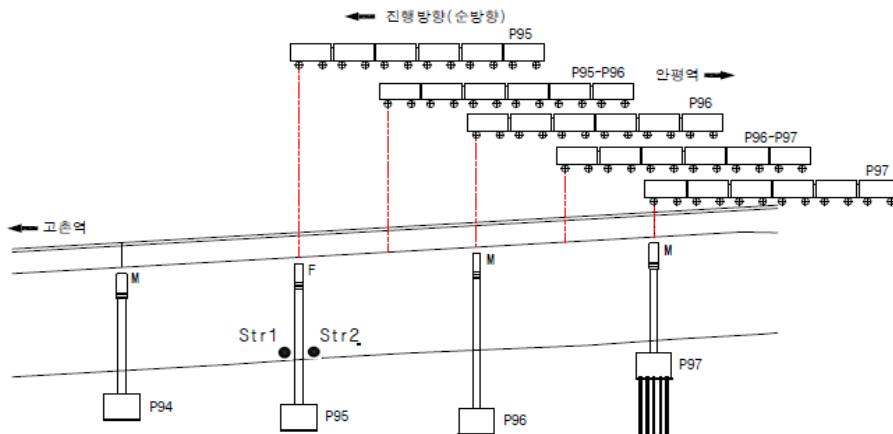


Fig. 6 The braking points of running train in curved line

2.2 시험결과 및 분석

Fig. 7은 곡선부에 대해서 열차속도 60km/hr로 정속주행 시 고정단 교각에 발생된 변형률 응답 이력곡선과 동일 속도로 정속주행 중 교각 P91(직선부) 및 P97(곡선부) 사이 총 5개 지점에서 열차제동 시 고정단 교각에 발생된 변형률 응답 이력곡선을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보듯이 정상적인 정속주행 시 발생된 교각 변형률과 열차 제동 시 발생된 교각 변형률이 차이가 발생하는 것으로 나타나, 제동하중의 영향으로 고가구조물 하부구조인 교각에 추가 변형률이 발생된 것으로 판단된다. 이에 경전철 고가구조물 설계 시 제동하중은 중요한 설계인자 인 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7(a)에서 보듯이, 교축방향의 하중이 곡선 선형에 따라 분산되는 효과가 크기 때문에 고정단 교각에 발생하는 인장 변형율이 열차 진입 초기에는 작게 걸리다가 열차가 고정단 교각에 가까워진 후반부에 상대적으로 커진 것을 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 7(b)에서 7(f)에서 보듯이, 제동지점이 따라 변형률 그래프가 달라지는 것을 확인할 수 있는데, Fig. 7(b)는 고가구조

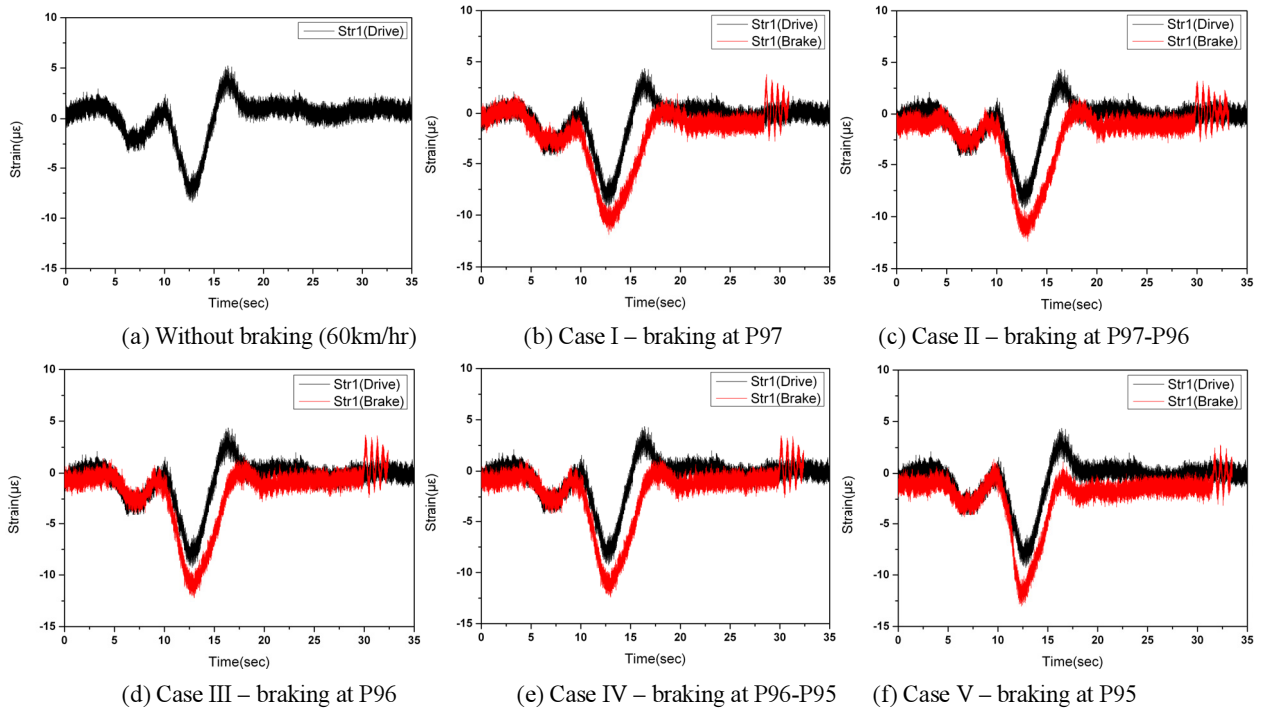


Fig. 7 The strain histories of pier with fixed end in driving and in braking of train (in a curved line)

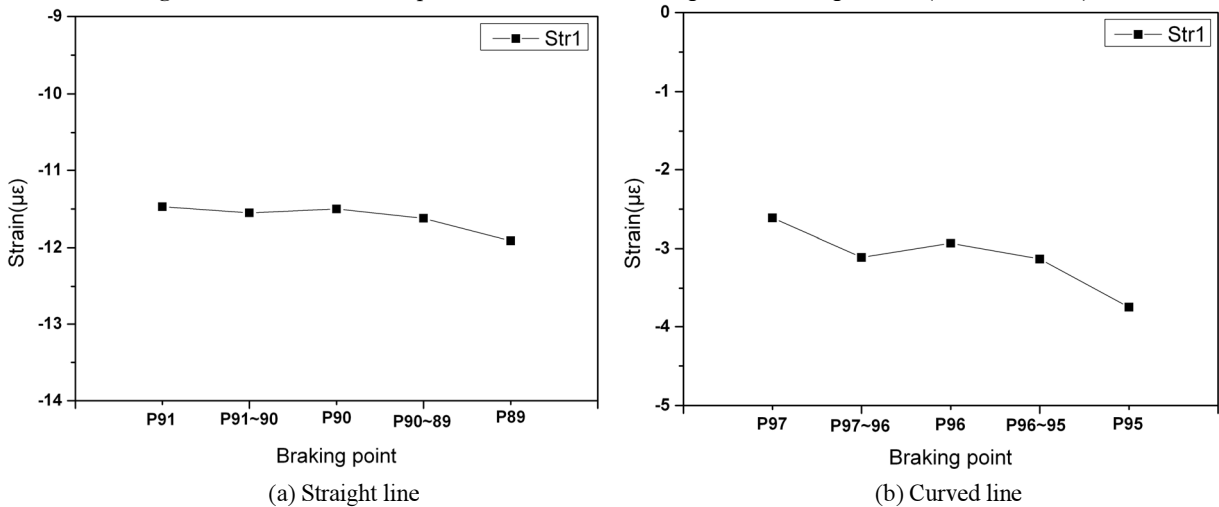


Fig. 8 The strain variation of pier according to braking points

물에 열차 진입시점인 교각번호 P97 에서 제동을, Fig. 7(c)는 교각 P97 과 P96 경간 중앙지점(열차 진입후 1.2 초)에서 제동을, Fig. 7(d)는 교각 P96(열차 진입후 2.4 초)에서 제동을, Fig. 7(e)는 교각 P96 과 P95 경간 중앙지점(열차 진입후 3.6 초)에서 제동을 그리고, Fig. 7(f)는 교각 P95(열차 진입후 4.8 초)에서 제동을 한 경우의 변형을 시간이력 그래프를 각각 나타낸다.

제동하중에 의한 추가 변형률은 열차 제동 시 발생된 교각 변형률과 동일 속도 정속 주행시 발생된 변형률 차이로 분석하였다. Fig. 8 및 Fig. 9 는 각각 직선부 및 곡선부에서 열차가 60km/hr 속도로 주행 중 제동시 고정단 교각에 추가 발생된 센서(str1) 변형률을

제동 지점별로 나타낸 것이다. 직선부 및 곡선부 제동하중에 따른 추가 압축 변형률을 분석한 결과, 직선부 및 곡선부의 최대 추가 압축 변형률은 각각 11.91 및 3.75 $\mu\epsilon$ 으로, 직선부 교각의 추가 변형률이 더 크게 나타났다. 이는 곡선부의 경우 교축방향의 제동하중이 곡선 선형에 따라 분산되는 효과 때문인 것으로 판단된다. 그리고, 열차 제동 지점이 고가구조물 진입 시점보다 열차 전 차량이 진입한 후 제동한 경우에서 다소 크게 교각의 추가 변형율이 나타났다.

4. 결 론

열차의 제동 시 고가구조물에 작용하는 제동하중의 영향을 분석하기 위해 현장 계측 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다; (1) 정상적인 정속주행 시 발생된 교각 변형률과 열차 제동 시 발생된 교각 변형률이 차이가 발생하는 것으로 나타나 제동하중의 영향으로 고가구조물 하부구조인 교각에 추가 변형률이 발생된 것으로 판단되고, (2) 직선부 및 곡선부 최대 추가 압축 변형률은 각각 11.91 및 3.75 $\mu\epsilon$ 으로 나타나, 직선부 교각의 추가 변형률이 더 큰 것으로 나타났으며, (3) 열차 제동지점이 고가구조물 진입 시점보다 열차 전 차량이 진입한 후 제동한 경우에서 다소 크게 교각의 추가 변형율이 나타났다.

향후 현장 계측결과를 바탕으로 전산 구조해석 프로그램을 이용하여 제동하중을 분석할 계획이며, 속도별 제동하중에 대한 추가 반복 시험결과를 토대로, 확률론적 분석을 통하여 고무차륜형 경전철 고가구조물에 대한 적정 제동하중 연구를 추진할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 산업기술연구회의 “저비용 고성능 철도 인프라 기술 개발” 연구과제에 대한 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한국철도기술연구원 (2008) 도시철도시스템 기술의 이해, 화남출판사
- [2] 신정열, 이안호, 박원빈, 임철수, 조강희 (2013) 경전철 고가 주요 설계요소의 구조물 규모에 미치는 영향 분석, 한국철도학회 2013년도 춘계학술대회, pp.1390-1395.