

도시철도차량의 구조체 처짐량에 대한 해석 방안 연구

A Study on Analysis Method for Structure Deflection of Electric Multiple Units

정종덕†
Chung, Jong-Duk

편장식*
Pyun, Jang-Sik

ABSTRACT

This paper describes the structural deflection analysis method and result of EMU(Electric Multiple Units). During manufacturing of rail passenger coaches, the underframe is assigned a camber before it is integrated with other major assemblies of shell such as the side panel, the end panel and the roof. The camber of the positive deflection given intentionally to compensate for the sagging so that it remains straight at the maximum load. But some manufacturers have insisted there has no relationship between the camber and the safety or life cycle and they expect to reduce a manufacturing cost without a camber. So this study analyzes whether the camber influences on the safety or life cycle of EMU structure under a full load and regular driving condition. The structural dynamics model for a railway vehicle is introduced.

1. 서 론

캠버는 일반적으로 구조물이나 기계의 강성을 높이기 위해 평탄한 면에 굴곡을 주는 방법을 많이 사용하는데 이것의 가장 대표적인 예가 교량이다. 오래전부터 다리를 건설할 때에는 구조물을 아크 형식으로 만들어 하중을 잘 견딜 수 있도록 설계되어진다.

도시철도차량 차체는 길이방향으로 길게 연장되게 형성되어 있어 차체의 자체 중량이 대차 중심간의 거리가 긴 구조적 특성, 차량에 탑재되는 여러 가지 시설 및 승객의 무게 등으로 인해 차량 차체 중앙부가 아래로 처지는 현상이 나타난다. 이를 위해 그림 1과 같이 도시철도차량의 차체 제작시 여러 하중조건으로 인해 발생하는 차체의 처짐 또는 변형을 사전보상하기 위한 캠버(camber)를 부여하게 되며, 이러한 처짐 또는 변형을 충분히 고려하여 사전에 반영하여야만 구조적으로 안전하고 내구성이 있는 차량을 제작할 수 있다.

한편, 사용내구연한이 도래한 도시철도차량의 차체 처짐량 측정시 그 결과가 차량의 내구연수에 어떠한 영향을 미치며, 또한 사용연수, 하중조건 등에 따른 처짐량의 변화에 대한 연구가 부족한 실정이다. 도시철도차량의 안전을 위해 구조체의 변형 및 처짐량에 대한 기준이 도시철도 관련법에 제시되어 있으나 정밀진단시 이를 적용하는데 있어 명확한 공학적 근거 자료가 제시되어 있지 않아 차량의 안전성을

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단,
책임연구원

E-mail : jdchung@krii.re.kr

TEL : (031)460-5513 FAX : (031)460-5749

* 비회원, 인하대학교 대학원(한국철도기술연구원),
도시철도표준화연구단, 학연박사과정

평가하는데 어려움이 있다.

자동차 분야에서는 차량의 동적특성을 고려하여 피로수명을 평가하는 기법들이 적용되고 있다. 실제 주행과 동일한 해석을 수행하기 위해 실제 주행시 필요한 동적응답특성을 측정하고, 해석을 위한 유한요소모델 검증에 위해 정적처짐 및 모드해석을 수행하며 해석에 필요한 물성치 데이터를 확보한다. 물성치를 모르는 경우 신뢰성있는 결과를 이용하여 물성치를 추정할 수 있다. 확보된 물성치로 동역학 해석과 유한요소해석을 수행한다. 이때 동역학 해석에서는 유연체를 위해 모드방법으로 하중이력을 측정하고, 유한요소해석에서는 하중이력으로부터 응력을 해석하여 그 결과로부터 피로해석을 수행한다.

본 논문에서는 캠버나 수평도와 같은 인자들이 도시철도차량 구조체의 처짐량과 내구연한에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 알아보고 또한 구조체 처짐량에 영향을 미치는 다른 인자들이 무엇인지 있는지 확인하기 위한 해석방법을 제시하고 해석결과의 활용방안에 대해 고찰하고자 한다.

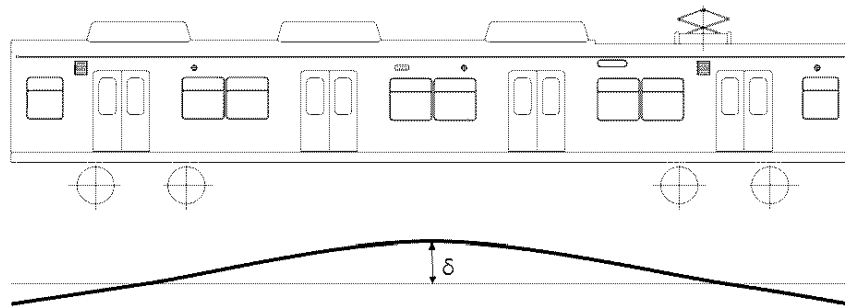


그림1. 도시철도차량 캠버 적용

2. 도시철도차량 강체동역학 모델

도시철도차량에 대한 동역학 해석 모델은 1량에 대해 7개의 강체로 모델링을 하게 된다. 승객이 탑승하는 구조체와 두 개의 대차템인데 대차 1개당 2개의 휠셋으로 구성되어 있으며, 휠셋과 대차 사이에는 1차 현수장치로 연결되고 대차와 구조체는 2차 현수장치로 연결된다. 1차 현수 장치에는 직접 레일에 접촉하는 휠셋과 대차 사이에 연결하는 요소이며, 2차 현수장치는 공기 스프링, 센터피봇, 사이드 버퍼, 그리고 오일 댐퍼로 구성되어 객차와 대차를 연결하는 요소이다. 공기 스프링은 구조체와 대차 사이를 연결하는 요소 중에서, 축 하중을 견디는 요소이다. 그림 2는 도시철도차량의 강체모델을 나타내는 것이다.

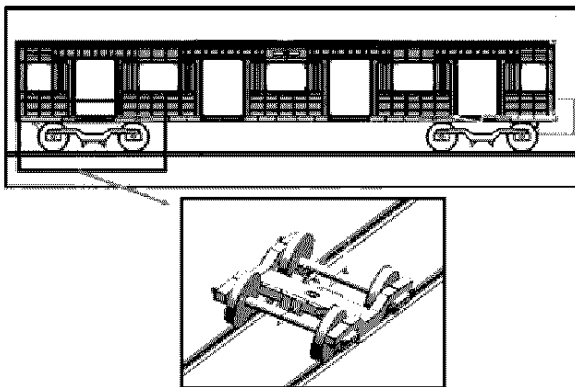


그림2. 도시철도차량 강체 모델

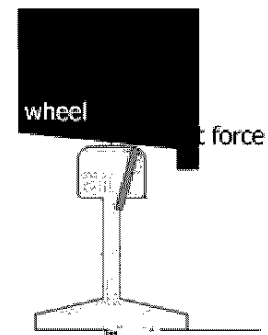


그림3. Wheel-Rail 접촉 메커니즘

휠과 레일 사이의 접촉은 그림 3과 같이 정의하였으며, 접촉 요소는 접촉 상수와 감쇠 계수를 이용하여 침투량을 허용하는 컴플라이언스 방법을 사용하여 접촉력을 계산한다. 마찰은 쿨롱 마찰을 정의하도록 하였고, 휠의 형상은 그림 3에서 나타난 것처럼 conicity를 이용하여 선형적으로 정의하였으며, 레일의 형상은 비선형적인 곡면부가 반영될 수 있도록 모델링하였다.

3. 구조체의 유한요소해석

일반적으로 유한요소해석을 수행할 경우 모델의 메시 크기가 적정한지 먼저 검증작업이 요구된다. 추후 내구해석을 해야 할 필요성이 있기 때문에 해석에 적절한 최대 메시 크기를 알 필요가 있다. 그 이유는 내구해석은 충돌해석에 비해 장시간의 해석시간을 요구하고, 캠버에 대한 영향도 평가를 하기 위해서는 수 많은 시뮬레이션을 수행해야 하기 때문에 작은 자유도로 좋은 결과를 낼 수 있는 메시 크기가 필요하기 때문이다. 본 연구에서 DAFUL이라는 상용 소프트웨어를 사용하였지만 해석 결과를 그대로 믿고 사용해도 문제가 없는지 판단하기 위하여 간단한 처짐 해석을 통해 기존 많은 분야에서 사용되고 있는 IDEAS의 결과와 비교해 보았다. 이 때 물성치와 유한요소 모델은 두 소프트웨어에 동일하게 적용시켰으며, 최대 처짐량을 비교한 결과 3.22%의 차이가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 따라서 DAFUL의 처짐해석 결과는 신뢰할 수 있는 수준임을 알 수 있다.

그림 4는 대차의 유한요소 수렴성 평가를 위한 모델로서 공기스프링이 장착이 되는 부분에 각 12.5톤의 하중을 분포하중으로 가하고 1차 현수장치가 장착되는 지점에 고정 경계조건을 사용하여 처짐 해석을 수행하였다. 해석 결과 최대 처짐량이 발생하는 절점을 선택하여 절점의 처짐량을 메시 크기에 따라 그림 5와 같이 그래프로 나타내었다. 그림 5의 그래프에서 나타나듯이 메시 크기가 작아질수록 처짐량이 수렴해 가는 것을 볼 수 있으며, 약 2만 8천 자유도 이상의 메시 크기에서는 신뢰할만한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

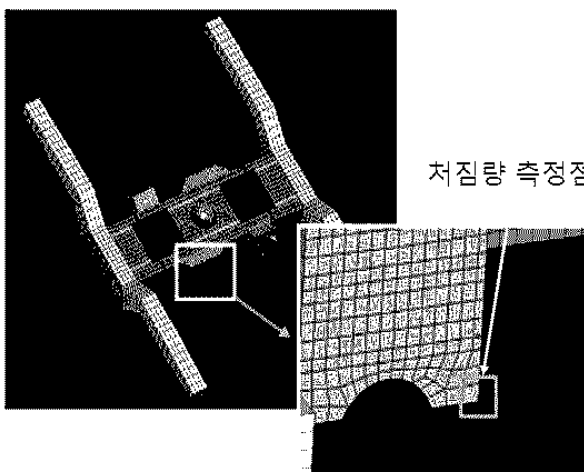


그림 4. 대차의 유한요소모델

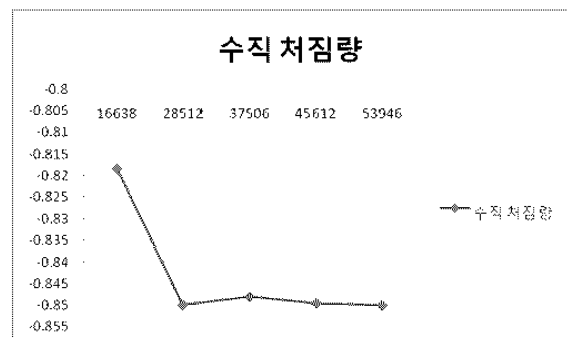


그림 5. 대차 모델의 자유도와 처짐량 비교

그림 6은 구조체의 유한요소해석 수렴성 평가를 위한 모델로서 공기스프링이 장착이 되는 부분을 고정 경계조건을 이용해 고정시키고 50톤의 하중을 균일 분포하중으로 가하고 처짐해석을 수행하였다. 최대 처짐량이 발생하는 절점을 선택하고 메시 크기를 변화시킴에 따라 그 결과는 그림 7과 같으며, 메시 크기가 작아질수록 처짐량이 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 약 19만 자유도 이상의 메시 크기에서는 신뢰할만한 해석 결과를 얻을 수 있다.

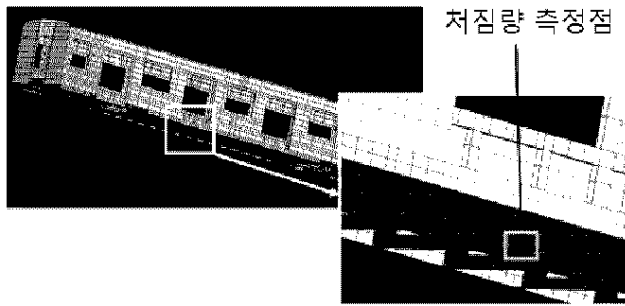


그림 6. 구조체의 유한요소모델



그림 7. 구조체 모델의 자유도와 처짐량 비교

4. 캠버 적용을 위한 동역학 모델

구조체의 캠버는 언더프레임을 지그에 올려놓고 설정된 캠버가 될 수 있도록 강제 변형을 유도한 다음 사이드 어셈블리, 엔드프레임 등을 언더프레임과 용접으로 연결한다. 이때, 구조체에 캠버를 주기 위하여 언더프레임을 강제로 변형이 되고 여러 가지 수직방향 하중에 잘 견딜 수 있도록 잔류응력을 가지게 된다. 그런데 구조해석 단계에서는 캠버에 의한 강제 변형 및 잔류 응력을 적용시키기가 쉽지가 않다. 먼저 평탄한 언더프레임 유한요소 모델을 만든 뒤에 캠버량을 줄 수 있도록 가상 지그를 유한요소 해석 프로그램에서 재현하고, 지그에 형상되도록 적용되어진 캠버량을 적용한 뒤 해석을 수행해 변형된 언더프레임을 만들고 여기에 외판을 용접 요소로 이용해 변형된 언더프레임과 결합을 하게 되고, 다시 해석을 수행하면 캠버량이 고려된 구조체의 초기 형상을 구현할 수 있을 것이다. 그림 8은 언더프레임의 캠버 적용 모델을 나타낸 것이다. 먼저 처짐량 해석 방법의 타당성을 확인하기 위해 물성치는 알루미늄 구조체의 재질인 "A6005A-T6"을 적용하였으며, 도표 1과 같다.

도표 1. 철도차량 구조체의 물성치

밀도(kg/mm ³)	E(MPa)	Nu
2.7e-6	6.9e+4	0.33

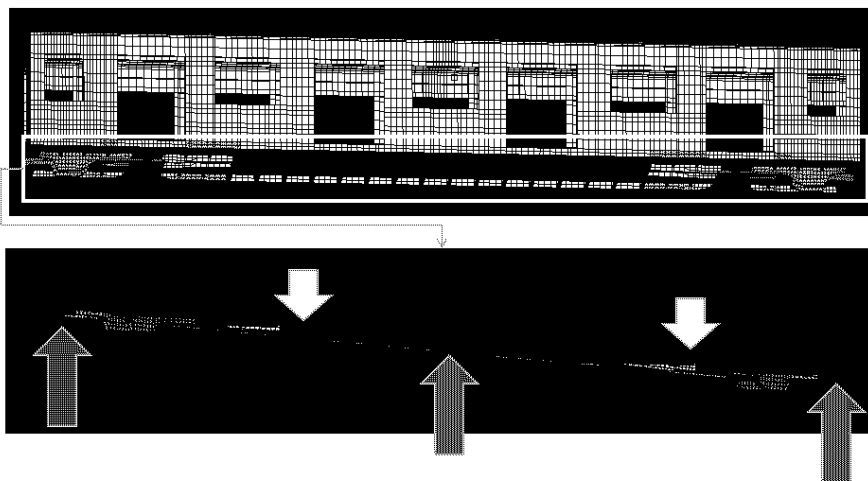


그림 8. 언더프레임의 캠버 적용모델

5. 구조동역학 해석 및 결과

그림 9는 내구해석을 위해 필요한 동응력을 얻기 위한 구조동역학 모델을 나타낸 것으로 강제동역학 모델에서 구조체 부분만 유한요소 모델로 대체를 하여 구조동역학 모델을 완성한다. 구조체에 작용하는 하중은 승객하중 20톤이 균일하게 분포한다고 가정하고 80km/h의 주행속도로 운행하는 도시철도차량 구조체의 동응력을 해석하였다. 해석시 실제 운행조건을 구현하기 어려우므로 실제 레일 조건을 반영하기 위해 공차상태에서 실제 레일 위를 주행하면서 휠에 가진되는 힘을 계측하여 해석에 적용하였다. 그림 10은 실제 주행시 휠에 작용하는 하중을 나타낸 것이다.

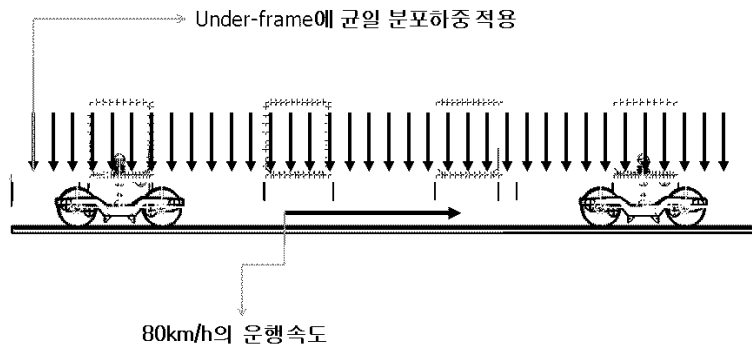


그림 9. 구조동역학 모델

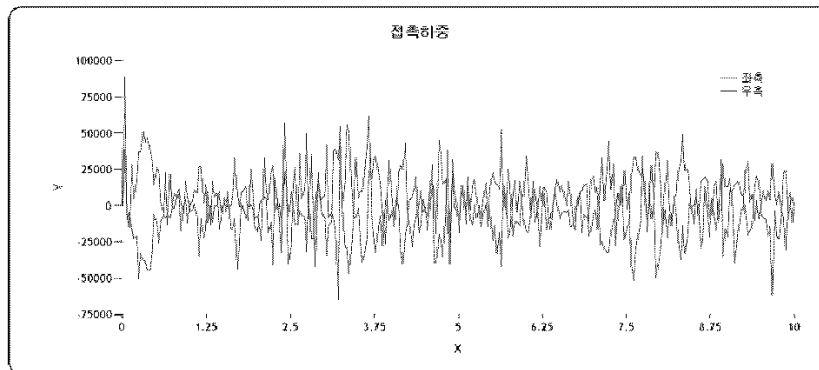


그림 10. 실제 주행에서 실측된 휠-레일 접촉하중

분포하중이 20ton이 가해지는 상황에서 Von-Mises 응력이 최대로 가해지는 부분은 대차 위에 있는 도어부의 밑 부분에서 나타났으며, 그림 11은 최대 응력이 발생한 지점에서의 동응력을 시간에 대한 그래프로 나타낸 것이다. 구조체가 10초 주행하는 동안 60MPa이라는 값을 기준으로 약 ± 5 MPa의 진폭을 가지고 랜덤한 진동수로 운동을 하고 있는 것으로 해석되었다.

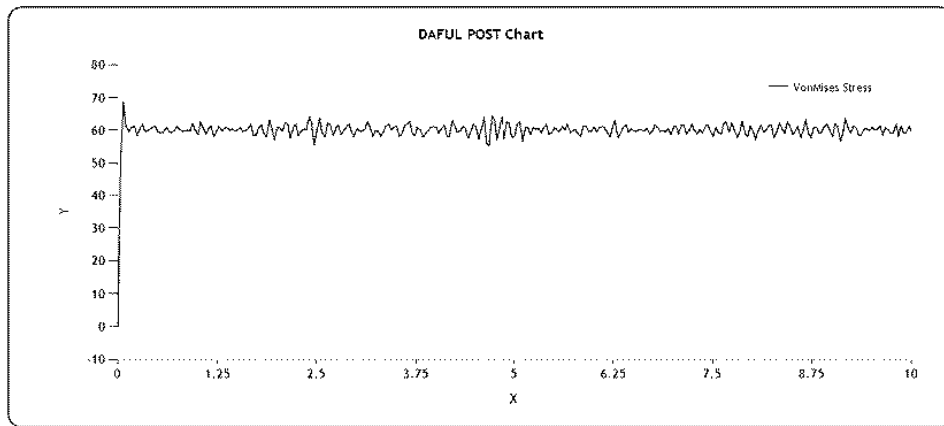


그림 11. 캠버가 0일 때 최대 동응력 그래프

6. 결 론

도시철도차량의 구조체 처짐량 해석을 위해 동적 거동해석에 대한 강체동역학 모델의 검증을 수행하였으며, 휘/레일 접촉부분의 하중에 실제 실험데이터를 적용하였다. 또한 유한요소 모델의 정적 처짐에 대한 메시크기의 검증이 수행되었고, 동역학 해석을 통한 동응력 데이터를 확보할 수 있으며, 이 결과를 가지고 피로해석이 가능할 것으로 사료된다. 또한 정확한 해석을 위해 구조체 캠버 모델에 대한 연구가 필요하며 차중별 물성치 확보가 필요할 것으로 판단된다. 더 많은 연구를 통해 구조체에 대한 동역학적 해석방법을 정립하므로써 캠버량에 따른 처짐, 동응력 해석, 영향도 분석이 가능할 것이며, 하중 및 운행 조건에 따른 영향도 분석도 가능할 것이다.

참고문헌

1. Kumaran, M.S., Kumar, R.K. and Sriraman, R, 2000, "Finite element simulation of the railway coach shell assembly process," Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol.214 Part B, pp.581~592.
2. 전현규, 이동형, 김재철, 이찬우 (2008), "캠버를 고려한 디젤기관차 차체 피로수명평가", 대한기계학회.
3. 김효식 (1999), "다물체계내 유연체의 피로수명 예측을 위한 동응력 해석", 박사학위논문, 인하대학교.
4. 김주연 (2009), "도시철도차량 구조체의 객차모델 처짐량 해석에 관한 연구", 석사학위논문, 한양대학교.