

# 도시철도차량 구조체 처짐량 해석방법 및 캠버방식에 따른 영향분석 An Analysis for Structure Deflection and Camber Effect of Electric Multiple Units

\*정종덕<sup>1</sup>, #편장식<sup>2</sup>

\*J. D. Chung<sup>1</sup>, #J. S. Pyun(jspyun@krri.re.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단, <sup>2</sup>인하대학교(한국철도기술연구원)

Key words : Pre-Deflection, Camber, Rigid Body

## 1. 서론

도시철도차량 차체는 길이방향으로 길게 연장되게 형성되어 있어 차체의 차체 중량이 대차 중심간의 거리가 긴 구조적 특성, 차량에 탑재되는 여러 가지 기기 및 승객의 무게 등으로 인해 차량 차체 중앙부가 아래로 처지는 현상이 나타난다. 이를 위해 도시철도차량의 차체 제작시 여러 하중조건으로 인해 발생하는 차체의 처짐 또는 변형을 사전보상(Pre-Deflection)하기 위한 캠버(camber)를 부여하게 되며, 이러한 처짐 또는 변형을 충분히 고려하여 사전에 반영하여야만 구조적으로 안전하고 내구성이 있는 차량을 제작할 수 있다.<sup>1,2</sup>

본 논문에서는 캠버나 수평도와 같은 인자들이 도시철도차량 구조체의 처짐량과 내구연한에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 알아보고 위한 처짐량 해석을 수행하고, 캠버 방식에 따라 구조체에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하고자 한다.

## 2. 구조체 처짐량 및 동응력 해석

### 2.1 강제동역학 모델

도시철도차량에 대한 동역학 해석 모델은 전동차 1량에 대해 7개의 강체로 모델링을 하며, 구조체와 두 개의 대차로 구성되는데 대차는 1개당 2개의 휠셋으로 구성되어 있으며, 휠셋과 대차프레임 사이에는 1차 현수장치로 연결되고 대차프레임과 구조체는 2차 현수장치로 연결하게 된다. 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. Fig. 1은 도시철도차량의 강체모델을 나타내는 것이다.<sup>3,4</sup>

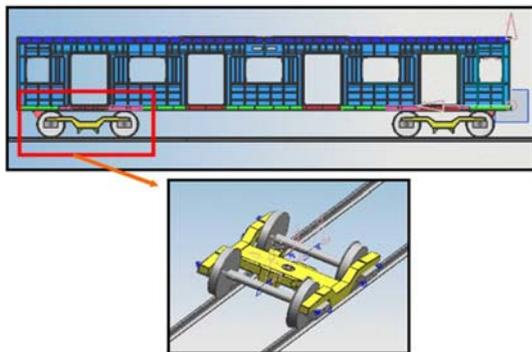


Fig. 1 Rigid body model of EMU

### 2.2 구조체의 유한요소해석

일반적으로 유한요소해석을 수행할 경우 모델의 메시 크기가 적정한지 먼저 검증작업이 요구되며, 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.

### 2.3 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 주기위하여 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 정상대로 적용되어진 캠버량을 적용한 뒤 해석을 수행해 변형된 언더프레임을 만들고 여기에 외관을 용접 요소로 이용해 변형된 언더프레임과 결합을 하게 되고, 다시 해석을 수행하면 캠버량이 고려된 구조체의 초기 형상을 구현할 수 있을 것이다.



Fig. 2 Camber application of EMU underframe

### 2.4 구조동역학 해석 및 결과

Fig. 3은 내구해석을 위해 필요한 동응력을 얻기 위한 구조동역학 모델을 나타낸 것으로 강제동역학 모델에서 구조체 부분만 유한요소 모델로 대체를 하여 구조동역학 모델을 완성한다.

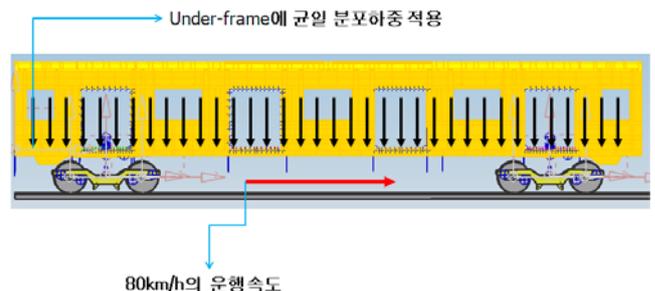


Fig. 3 Dynamic analysis model

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 가해지는 힘을 계측하여 해석에 적용하였다. Fig. 4는 실제 주행시 휠에 작용하는 하중을 나타낸 것이다.

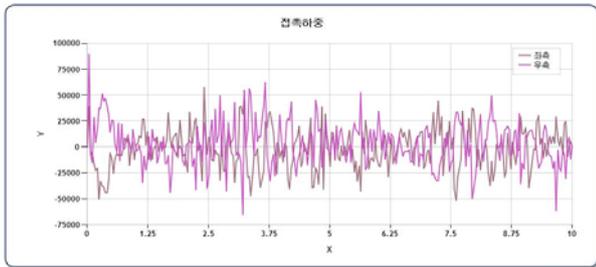


Fig. 4 Wheel/rail contact load data

분포하중이 20ton이 가해지는 상황에서 Von-Mises 응력이 최대 가해지는 부분은 대차 위에 있는 도어부의 밑 부분에서 나타났으며, Fig. 5는 최대 응력이 발생한 지점에서의 동응력을 시간에 대한 그래프로 나타낸 것이다. 구조체가 10초 주행하는 동안 60MPa이라는 값을 기준으로 약  $\pm 5\text{MPa}$ 의 진폭을 가지고 랜덤한 진동수로 운동을 하고 있는 것으로 해석되었다.

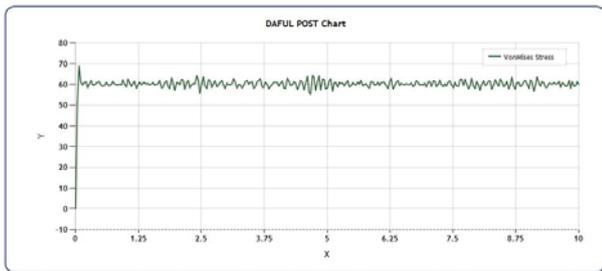


Fig. 5 Maximum Von-Mises stress(camber = 0mm)

### 3. Camber 방식에 따른 영향

도시철도차량의 차체 제작시 여러 하중조건으로 인해 발생하는 차체의 처짐 또는 변형을 사전보상하기 위한 캠버를 부여한다. Fig. 6은 차량에 적용하고 있는 캠버방식을 나타낸 것으로 국내의 경우 A type을 적용하고 있으며, B type 경우 해외 철도차량에서 적용하고 있는 형태이다.

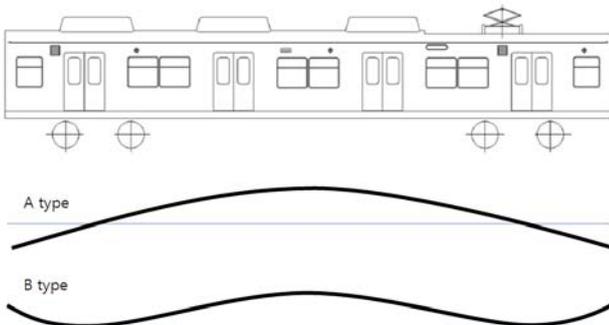


Fig. 6 Camber type of EMU

Fig. 7은 도시철도차량에 A와 B type의 캠버를 적용한 경우 언더프레임에 발생하는 응력분포를 나타낸 것이다. A type 경우 중앙 부위 및 센터실 안쪽부위에서 응력이 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며 B type 경우 중앙 부위보다 센터실 및 차량의 끝단부위에서 응력이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 캠버량에 따른 처짐 및 처짐의 변화량을 나타낸 것으로

캠버량에 따른 처짐의 형태는 유사하나 처짐 변화량의 경우 A type은 캠버량에 따라 처짐의 변화량 차이가 B type보다 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

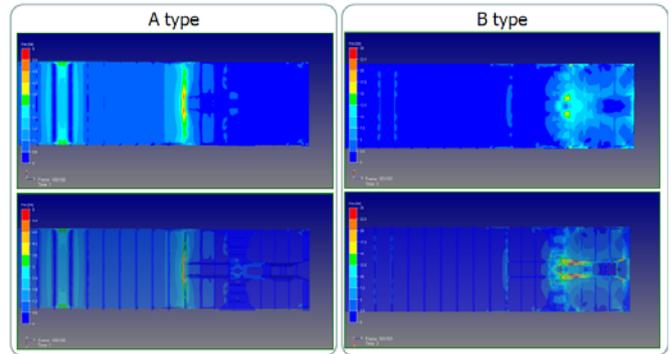
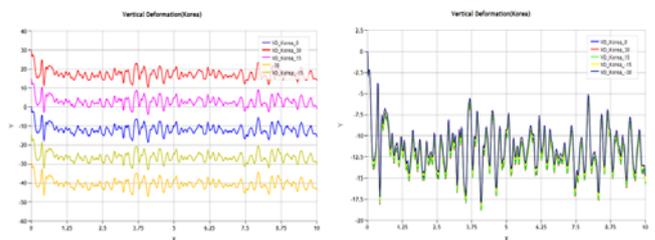
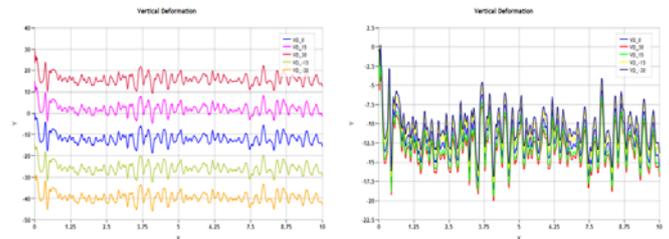


Fig. 7 Stress distribution of A and B type



(a) A type



(b) B type

Fig. 8 Deflection and deflection variation

### 4. 결론

도시철도차량의 구조체 처짐량 해석 및 캠버 방식에 따른 동적 거동해석을 수행하였다. 동적거동 해석을 위해 강체모델에 대한 검증을 수행하고, 실제 차량운행시 휠과 레일 접촉부에서 발생하는 하중 데이터를 해석에 적용하였고, 동역학 해석을 통해 동응력 데이터를 확보할 수 있었으며, 이 동응력 데이터를 통해 피로해석이 가능할 것으로 사료 된다. 국내 전동차에 적용되고 있는 캠버방식과 해외에서 적용되고 있는 캠버방식에 대한 해석을 통해 비교분석을 하였으며, 발생하는 응력의 분포 및 처짐변화량에서 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

### 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.