

고속열차 동력차의 센터피봇 상대 회전각 계측에 관한 연구

A Study on the Measurement of Relative Rotation of Center Pivot in Power Car of KTX

서승일[†] · 정우진^{*}

Sung-Il Seo · Wu-Jin Jeong

Abstract

The center pivot in the power car of KTX carries the traction force of the motor bogie to the carbody. The damage to the center pivot due to failure of swivel joint causes a serious hazard of the train. To prevent the hazard, information on the relative motion between bogie and carbody is necessary. In this paper, a method to measure the relative rotation of the center pivot is proposed and an actual test to verify the method and safety is conducted. The test results show that the rotation of the center pivot is within the allowable limit and the damage due to the relative motion doesn't take place.

Keywords : Center pivot(센터 피봇), High speed train(고속 열차), Linear Voltage Displacement Transducer(선형 전압 변위 변환기), Lateral displacement(횡변위), Relative rotation(상대 회전), Swivel joint(스위벨 조인트)

1. 서론

고속열차는 전후의 동력차에서 출력을 발생하여 열차를 견인한다. 동력차의 견인전동기는 감속구동장치를 통해 하부 동력대차의 차축을 회전시켜서 견인력을 발생하고 대차의 견인력은 센터피봇(center pivot)을 통하여 동력차에 전달되며, 동력차는 전체 열차를 전후에서 밀고 당김으로 열차를 추진시킨다. 동력차의 센터피봇은 견인력을 전달하면서 차체와 대차의 상대 횡변위를 흡수할 수 있는 구조로 되어 있는데, 상대 횡변위가 일정한 값을 벗어나는 경우에는 회전을 위한 스위벨 조인트(swivel joint)에서 손상이 발생할 수 있고, 이로 인해 센터피봇의 거동이 원활하지 못하여 차량의 전복과 탈선과 같은 위험을 초래할 수도 있다.

고속열차에서 차체 공기스프링의 강성 변화 및 차륜 담판 형상 변화에 따라 횡진동이 민감하게 변동하는 특성이 있어 다양한 연구가 진행되었으나[1,2], 횡동요에 의해 발생하는 차체-대차 상대변위에 대해서는 연구 수행 실적이 드물다.

특히 국내에서 운행되는 고속열차는 고속신선 뿐만 아니라 기존선을 운행하고 있으므로 선로 상태가 양호하지 않은 기존선 구간에서 과도한 횡동요에 의해 대차쪽의 조인트에 의해 센터피봇의 손상 위험성이 있다. 이러한 센터피봇 손상 위험성을 사전에 파악하기 위해 상대 회전각을 계측하는 것이 필수적이나, 상대 회전각을 직접적으로 계측하는 것은 현실적으로 곤란하다. 센터피봇 주위의 구조상, 각변위계와 같은 센서 취부가 곤란하고, 회전각의 절대값보다는 대차와의 상대 회전각에 의해 손상이 발생하기 때문이다. 따라서 센터피봇의 상대 회전각은 별도의 방법에 의해 계측되어야 한다. 본 연구에서는 고속열차 동력차 센터피봇의 상대 회전각을 계측하기 위한 새로운 방법을 제시하고 이 방법에 근거하여 실제 운행시 횡변위를 계측하여 그 결과를 분석하고, 차량의 안전성을 평가하고자 한다.

2. 센터피봇 상대 회전각 계측의 원리

Fig. 1과 같은 고속열차 동력차의 T형 센터피봇은 차체 쪽에 취부되어 있어서, 전후로는 변위가 고정되어 있으며, 전동기와 차륜에서 발생하는 견인력을 차체로 전달하고 있고, 좌

[†] 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단
E-mail : siseo@krri.re.kr
TEL : (031)460-5623 FAX : (031)460-5699
^{*} 특허청(연구당시 한국철도기술연구원)

우로는 회전이 가능하다. 센터피봇 하부의 스위벨 조인트의 하우징(housing)은 대차와 연결되어 있고 스위벨 조인트의 볼(ball)은 센터피봇과 일체가 되어 회전하면서 차체와 대차의 상대 횡변위를 흡수할 수 있다. 센터피봇의 수직변위는 스위벨 조인트에서 자유롭게 허용할 수 있으나, 회전변형은 제한된다.

Fig. 1과 같이 스위벨 조인트의 볼이 센터피봇의 움직임에 따라 회전하게 되는데, 볼의 회전변형은 스위벨 조인트의 구조상 제한되어 있다. 볼이 제한 범위를 초과하여 회전하게 되면 Fig. 1의 원으로 표시된 부분에서 볼과 접촉하고 있는 부싱(bushing)의 하부를 접촉하게 되어 부싱을 이탈시킬 수 있게 된다. 부싱(bushing)이 이탈하게 되면 볼이 직접 조인트의 금속면과 마찰되면서 마모가 발생하고 회전 거동이 불량하게 된다. 센터피봇의 회전 거동 불량은 대차의 곡선 추종성을 악화시키고, 차체와의 상대변위를 제한하게 되므로 차량의 탈선과 전복의 원인이 될 수 있다. 센터피봇의 상대 회전각에 대한 정확한 정보는 이러한 위험을 예방할 수 있는 대책이므로 사전 확보가 필수적이다.

센터피봇의 상대 회전각은 차체와 대차의 상대변위에 의해 결정된다. 즉, 상대 회전각은 Fig. 2와 같은 차체와 대차의 상대 횡변위에 의한 성분과 Fig. 3과 같은 상대 수직변위에 의한 성분으로 분해해 볼 수 있다. 상대 횡변위에 의한 회전각 성분은 차체가 고정되어 있고 대차가 수평 이동하였을 때 센터피봇이 회전하는 성분으로 볼 수 있고, 상대 수직변위에 의한 성분은 센터피봇과 수직을 이루는 대차의 회전각에 의해서 발생하는 성분으로 볼 수 있다. 상대 횡변위에 의한 회전각 성분은 Fig. 2를 참고로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \frac{U}{L_1} \quad (1)$$

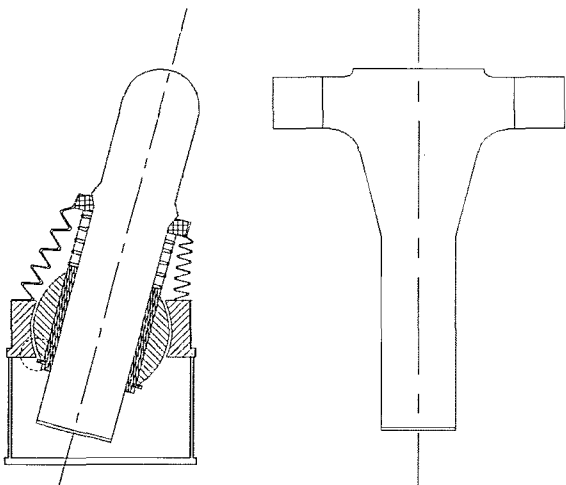


Fig. 1. Center pivot rotating in swivel joint

여기서,

θ_1 = 상대 횡변위에 의한 센터피봇의 회전각

U = 체를 기준으로 대차의 수평 횡변위

L_1 = 센터피봇의 회전중심에서 스위벨 볼의 중심까지의 거리

상대 수직변위에 의한 회전각 성분은 Fig. 3을 참고로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_2 = \frac{V}{L_2} \quad (2)$$

여기서,

θ_2 = 상대 수직변위에 의한 센터피봇의 회전각

V = 차체 좌측에서 대차와의 상대변위와 우측에서 상대

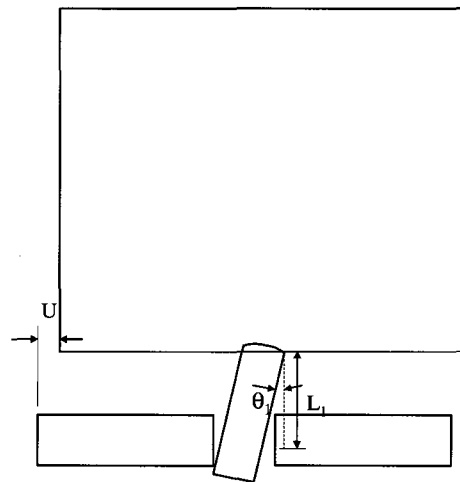


Fig. 2. Relative lateral displacement of carbody and bogie

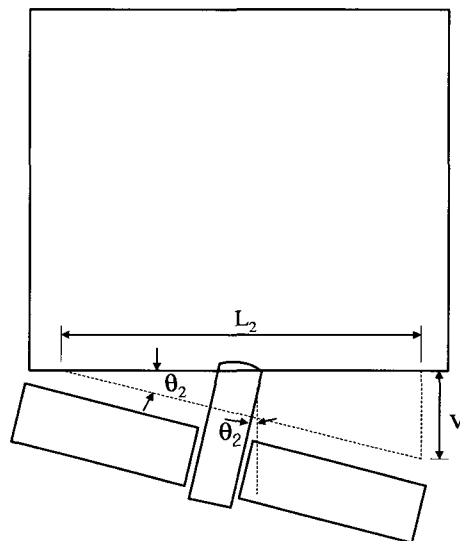


Fig. 3. Relative vertical displacement of carbody and bogie

변위의 차

$L_2 =$ 차체 좌측 기준점에서 우측기준점까지의 거리

그런데, 실제 동력차에서 보면 차체 좌우의 거리는 센터피봇의 회전중심에서 스위벨 볼 중심까지의 거리에 비해 상당히 크고($L_2/L_1 > 10$), 스프링의 특성과 안티롤바(anti-roll bar)의 효과 등으로 차체-대차 상대 횡변위가 차체-대차 수직변위보다 크게($U \gg V$) 된다. 따라서 다음 식 (3)과 같은 관계가 성립하여 센터피봇의 상대 회전각은 차체-대차 횡변위에 의한 회전각 성분에 좌우됨을 알 수 있다.

$$\theta_1 = \frac{U}{L_1} \gg \frac{V}{L_2} = \theta_2 \quad (3)$$

즉, 상대 회전각은 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\theta \approx \theta_1 = \frac{U}{L_1} \quad (4)$$

3. 센터피봇 상대 회전각의 계측의 원리

3.1 변위 센서의 설치

차체와 대차 사이의 횡변위를 계측하기 위해 LVDT(Linear

Voltage Displacement Transducer)를 활용하였다. 레이저 센서를 사용하여 변위를 계측할 수도 있으나 계측 지점 사이의 거리가 긴 경우에는 반사되는 레이저의 위치의 범위가 크므로 적용하기가 곤란하여 본 연구에서는 활용하지 않았다. 센터피봇 위치에서 차체와 대차의 상대 횡변위를 계측해야 하나, LVDT의 설치를 위해서는 공간상의 문제로 센터피봇을 중심으로 전후에 2개의 LVDT를 설치하여 횡변위를 계측하고 센터피봇 위치에서의 횡변위로 환산하였다. 차체와 대차의 상대 수직변위도 참고를 위해 계측하였다. Fig. 4는 상대 횡변위와 상대 수직변위를 계측하기 위한 LVDT의 위치를 나타내는데, 괄호안의 숫자는 센터피봇을 원점으로 한 각 LVDT의 좌표를 표시한다. LVDT의 암(arm)이 접촉할 수 있도록 별도의 지그를 만들어서 차체에 부착하였는데, Fig. 5~6는 LVDT의 설치 장면을 보여준다.

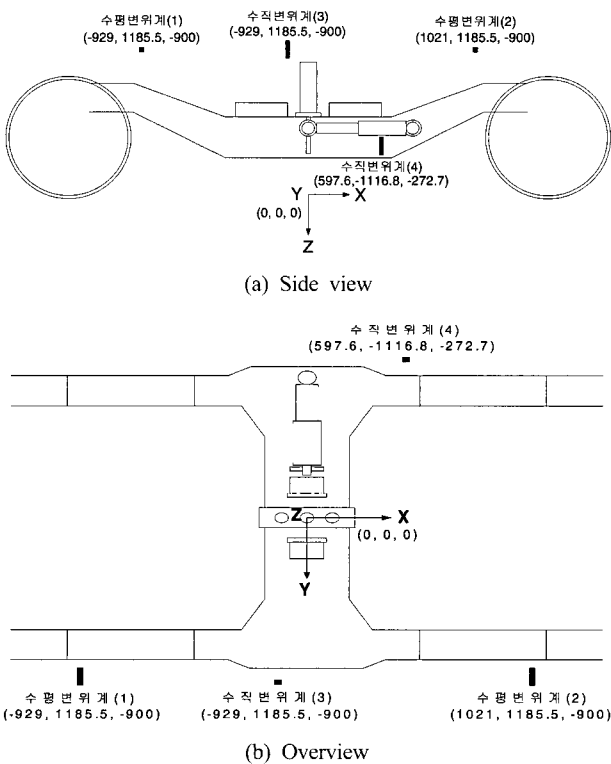


Fig. 4. Locations of LVDT

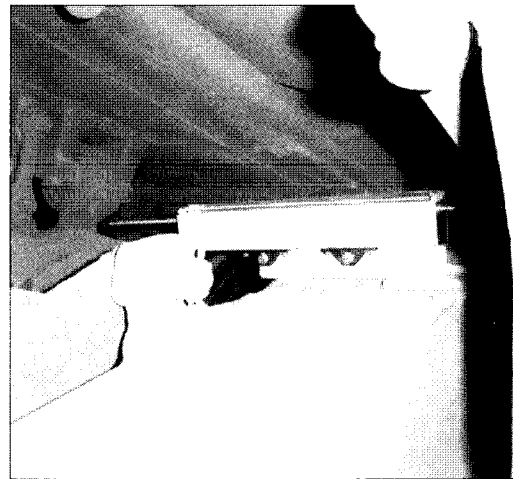


Fig. 5. Lateral LVDT

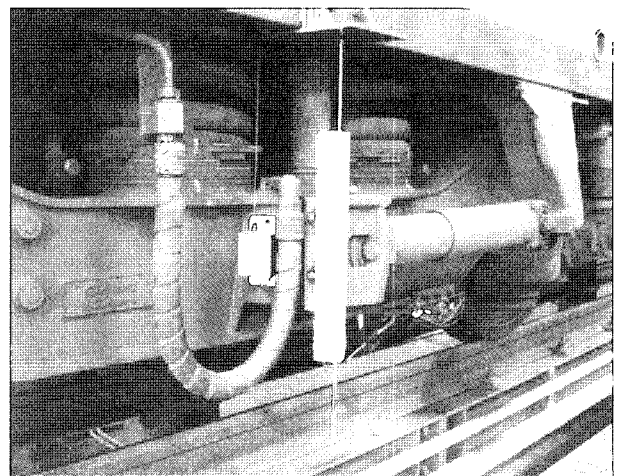


Fig. 6. Vertical LVDT

4. 변위 및 회전각의 계측

고속열차가 서울과 부산의 영업노선을 1왕복 운행하는 도중에 각 LVDT로부터 전달되는 신호를 수신하여 처리함으로써 차체와 대차의 상대변위를 계측하였다. LDVT의 전압신호는 데이터처리장치를 통해 텍스트로 변환되고 데이터저장장치에 시간과 함께 저장된다. 전압신호는 변위로 바로 환산되며, 센터피봇의 횡변위는 전후 LVDT의 변위 계측 결과로부터 선형적으로 내삽(interpolation)되어 얻어진다. 즉, Fig. 4를 참고하여 다음의 식 (4)와 같이 계산된다.

$$U = \frac{u_1x_2 - u_2x_1}{x_2 - x_1} \quad (5)$$

여기서,

u_1 = 1번 지점에서 계측된 횡변위

u_2 = 2번 지점에서 계측된 횡변위

x_1 = 1번 지점의 x좌표

x_2 = 2번 지점의 x좌표

각 지점의 변위가 얻어졌으므로 최종적인 상대 회전각은 식 (4) 및 (5)에 의해 구해진다.

5. 계측 결과 및 분석

대전-부산간 고속철도 구간에서 KTX를 이용하여 현차시험을 실시하여 차체와 대차간의 상대변위를 계측하였다. 대전과 동대구 구간은 고속신선이고 동대구와 부산간은 기존선인데, 대전역과 동대구역에 진입하는 일부 구간에도 기존선이 연결되어 있다. 상대 횡변위 계측 결과는 Fig. 7~8과 같다. Fig. 7 및 Fig. 8을 살펴보면 대전역 및 동대구역으로 진입하는 기존선 구간과 동대구와 부산 사이의 기존선 구간에서 20mm이상의 상대 횡변위가 발생함을 알 수 있고, 고속신선에서는 10mm이하의 상대 횡변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 최대 상대 횡변위는 42mm이고 KTX의 허용 횡변위는 60mm이다[3].

참고적으로 계측한 상대 수직변위는 Fig. 9와 같은데(최대치 11.2mm), 좌우측의 상대 수직변위의 차이를 고려하여 회전각 θ_2 을 계산하면 최대치가 0.4°가 된다. 즉, 상대 횡변위에 의한 회전각 θ_1 에 비해 식 (3)과 같이 무시할만한 수준이다.

상대변위 계측 결과를 기초로 구해진 센터 피봇의 상대 회전각 결과는 Fig. 10~11과 같다. Fig. 10 및 Fig. 11에 따르

면 상대 회전각도 기존선 구간에서 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 센터 피봇의 최대 회전각은 6.8°로서 동대구와 부산간의 기존선 구간에서 발생하였는데, KTX 센터피봇 스위벨의 허용 회전각 14°이다[3,4]. 따라서, 차체 횡동요에 의해 유발된 센터피봇의 횡경사에 의해 스위벨의 손상은 발생하지 않는 것으로 판정된다.

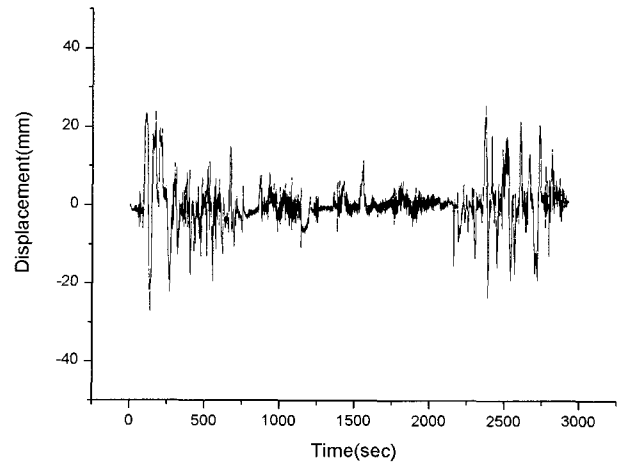


Fig. 7. Relative lateral displacement of carbody and bogie (Daejeon to Dongdaegu)

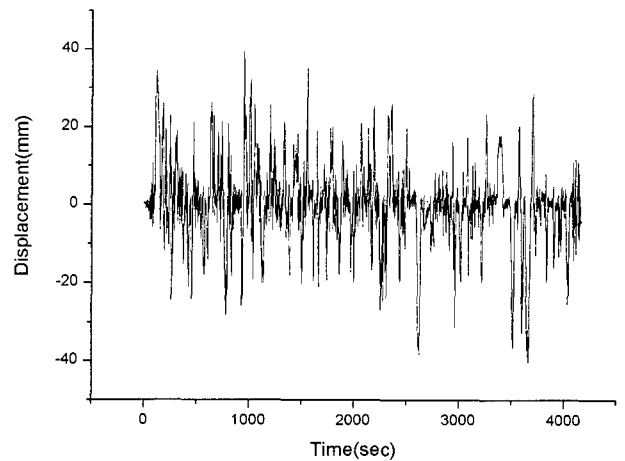


Fig. 8. Relative lateral displacement of carbody and bogie (Dongdaegu to Busan)

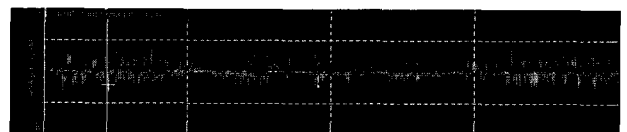


Fig. 9. Relative vertical displacement of carbody and bogie (Daejeon to Dongdaegu)

6. 결론

고속열차의 운행 중에 발생할 수 있는 차체의 횡동요에 의해 대차와의 연결 구조인 센터피봇의 손상이 우려되므로 안전성 검증이 필요하다. 본 연구에서는 센터피봇의 안전성 검증을 위해 상대 회전각을 계측하는 방법을 제시하였고, 이에 근거하여 실제 고속열차에 계측 장치를 설치하고 현차시험을 통해 상대 회전각을 계측하였다. 센터피봇의 상대 회전각은 차체와 대차의 상대 변위를 계측하고, 기하학적인 관계를 이용하여 구할 수 있도록 하였으며, 차체와 대차의 상대 횡변위에 의해 지배됨을 보였다. 계측 결과에 따르면 기존선 구간에서 상대 회전각이 크게 나타났으나, 허용 범위 이내임이 판정되었다. 따라서 센터피봇의 상대 회전각에 의해 스위벨의 직접적인 손상 가능성은 적지만, 기존선 일부 구간에서 발생하는 과도한 횡동요를 감소시킬 필요가 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. 강부병, 김영우, 왕영용 (2003), "KTX 차량 후미진동 해석(1)" 한국철도학회논문집, 1738-6225, 제6권, 2호, pp.122-128.
2. 장종기, 이승일, 최연선 (2004), "차륜담면 형상 변화에 따른 KTX 동특성", 한국철도학회논문집, 제7권, 제3호, pp.259-263.
3. GEC Alstom Transport S.A. (1996), "Technical Specification of Knuckle Joint", K611-11ZA17911-E1300-RC+T-101.
4. GEC Alstom Transport S.A. (1995), "Technical Specification Smooth Sealed Knuckle", K611-13ZC16941-E1300- RC+T-101.

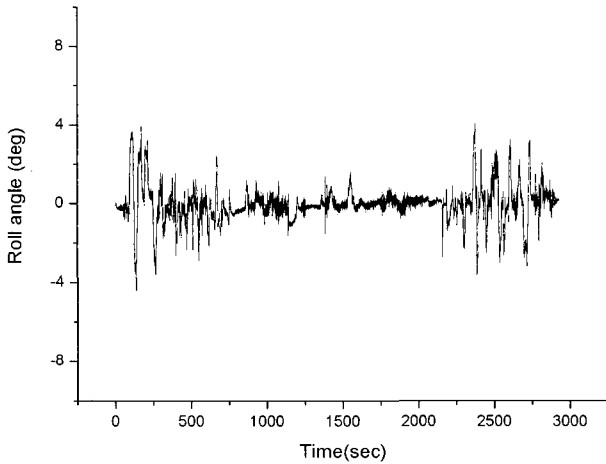


Fig. 10. Relative rotation of center pivot (Daejeon to Dongdaegu)

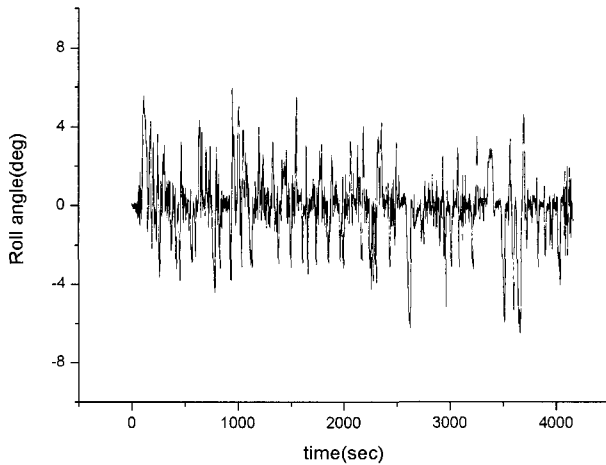


Fig. 11. Relative rotation of center pivot (Dongdaegu to Busan)