차체 틸팅에 따른 전복안전도 특성 평가
Investigation of Safety for Turnover in a Tilting Train by Carbody Tilting

김정석* 김남포*
Kim, Jung-Seok Kim, Nam-Po

ABSTRACT

In this study, we have performed investigation of safety for turnover in the tilting train. In the tilting train, the safety for turnover is one of the most important studies because the train incline the carbody inward curve during curve negotiation. Therefore, we have carried out dynamic analysis considering wind force and unbalanced lateral acceleration effects. From this study, we have evaluate the safety for turnover according to the design parameters of the tilting link mechanism.

1. 서론

틸팅은 곡선부 주행시 차체를 곡선의 내측으로 기울이게 하는 기술로 곡선부 주행시 발생하는 원심가속도의 횡방향 성분을 중력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시켜 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키는 기술이다. 따라서 곡선부에서 약 20~30%정도의 속도향상이 가능하다. 일반적으로 곡선부 속도제한은 궤도여건이나 차량의 성능에 따른 제한보다는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정지어진 것이다. 즉, 곡선부 주행시 승객이 느끼는 횡가속도가 0.08g를 초과하지 않도록 제한되어진 것이다. 이와 같이 틸팅차량은 곡선부를 일반차량보다 높은 속도로 주행하고 이에 따라 원심력이 속도의 제곱에 비례하여 증가되기 때문에 전복에 대한 위험도 가상대적으로 높아진다. 또한 틸팅방법에 따라서 차체틸팅에 의해 무게중심이 곡선부 외측으로 이동되기 때문에 일반차량에 비해 전복에 대한 복원 모멘트가 상대적으로 저하되기도 한다. 따라서 틸팅 차량의 설계개발에 있어서 전복에 대한 안전도는 면밀히 검토되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 현재 개발중인 한국형 고속 틸팅열차의 전복안전도를 평가하기 위해 틸팅 차량이 기존차량 대비 곡선부를 고속주행에 따른 초과 횡방향 원심 가속도의 영향과 차체 틸팅의 효과를 동시에 고려하였다. 본 연구에서는 동일한 곡선부를 기존차량의 속도로 통과할 때, 기존차량보다 30%향상된 속도로 통과할때 틸팅과 틸팅하지 않을 경우 및 측풍을 고려한 경우에 대해 전복안전도를 평가하였다.

2. 전복안전도

차량전복은 곡선통과시에 원심력 및 횡진동 가속도와 측면에서 부는 강한 바람에 의한 힘이 차량 중량에 의한 복원 모멘트보다 클 경우 발생한다. 곡선부 통과시 차량을 전복시키려는 요인은 정상 초과 원심력에 의한 전복모멘트, 횡방향 및 롤진동에 의한 동적 전복 모멘트 및 풍압에 의한 전복 모멘트이다. 국내에서 적용되고 있는 전복안전도에 대한 정의는 Fig. 1과 같이 원심력과 중력에 의한 영향만으로 전복안전도 식을 적용하고, 예측하기 어려운 진동이나 풍압 등에 의한 영향은 안전율에 포함하여 적용하고 있다.

---

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

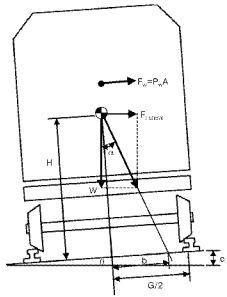

Fig. 1 곡선부에서 원심력과 중력의 합력관계도.

Fig. 1에서 H는 레일면에서 차량무게중심까지 거리, G는 좌우 차륜/레일 접촉점간 거리, $F_{Lateral}$은 미보상 횡가속도, F_w는 측풍에 의한 풍력을 의미한다. Fig. 1에서 b와 H사이의 관계는 식(1)과 같이 표현되고 $\tan\alpha$와 $\tan\theta$를 기하학적인 변수로 표현하면 식(2)-(3)과 같다.

$$b = H(\tan\alpha - \tan\theta) \tag{1}$$

$$\tan\alpha = \frac{F}{W} = \frac{V^2}{127R} \tag{2}$$

$$\tan\theta = \frac{C}{G} \tag{3}$$

Fig. 1에 근거해서 유도되는 전복안전도는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S_{turnover} = \frac{(G/2)}{b} \tag{4}$$

이 식에서 전복에 대한 안전율은 $b=\frac{G}{2}$에서 왼쪽 휠의 하중이 영이 되면서 전복이 시작되는데 이때 안전율은 1이고, b=0이면 안전율이 무한대 이다.
식(4)에 근거한 일반차량의 곡선부 제한속도에 근거한 전복에 대한 안전율은 표 1과 같다.

표 1 일반차량에 대한 전복안전율.

곡선반경	300R	400R	600R	800R
캔트량	100mm	110mm	110mm	110mm
제한속도	70km/h	85km/h	105km/h	120km/h
전복안전율	6.1	5.4	5.3	5.5

본 연구에서는 틸팅 차량이 곡선부를 최대 틸팅각으로 통과할 경우 차량의 전복안전도를 평가하는 것

어 복잡이다. 따라서 위 식(1)-(3)과 같은 정식인 관계식으로는 표현하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 동역학 모델을 통해서 아래와 같은 항목들을 고려한 틸팅차량의 전복안전도를 평가하였다.

① 차체 틸팅에 따른 무게중심의 수직 및 횡변위의 영향
② 0.2g에 해당하는 초과 원심력의 영향
③ 측풍에 의한 영향
④ 차체의 횡방향 및 롤 관성력의 영향

Fig. 2의 동역학 모델에서는 동력차 1량의 1/2을 모델링하였다. 본 모델에서는 차체, 2차 현수장치횡방향 댐퍼, 횡범퍼스탑, 차체 스톱퍼, 틸팅링크, 틸팅볼스타, 대차프레임 및 틸팅액츄에이터를 모델링하였다. 또한 동역학 모델은 캔트에 평행한 면위에 모델링하였고 횡방향 초과원심력과 측풍은 이 면에 평행하게 작용하도록 하였다.
틸팅차량의 전복안전도를 평가하기 위해 해석에 적용된 곡선조건은 완화곡선길이=75m, 곡선반경=300m, 캔트=100mm이다. 차량은 Fig. 3과 같은 곡선을 100km/h의 속도로 통과하는 조건을 부여하였다. 이 경우 곡선통과시 캔트변화율과 이러한 곡선을 통과할 때 차체의 경사각과 경사각속도조건을 나타낸 것이다. 본 연구에서 최악의 조건을 고려하기 위해 차체를 최대 틸팅각인 8도까지 최대 틸팅 각속도 4°/s 로 도달하도록 하였다. Fig. 4의 (b)에 나타낸 틸팅각과 각속도는 모두 본 열차 틸팅시스템의 최대조건으로 가장 극심한 상태이며 이것은 가장 극심한 틸팅조건에서 전복안전도를 평가하기 위해서이다.

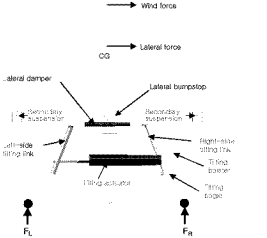

Fig. 2 틸팅차량 동역학 모델링.

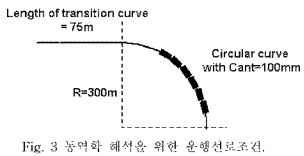

Fig. 3 동역학 해석을 위한 운행선로조건.

동역학 해석에서 작용된 초과횡가속도는 식(5)와 같으며 차량의 무게중심에 부고하였다.

$$F_{lateral} = 0.2gM_b[STEP(t,0,0,2,1) - STEP(t,4,0,6,1)] \quad (2)$$

여기서 0.2g는 초과원심력, M_b는 차체 중량을 의미한다.

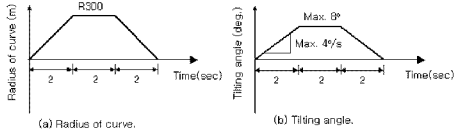

Fig. 4 캔트변화 및 틸팅각변화 이력.

본 연구에서는 식 (1)-(3)과 달리 캔트평면에서 차체의 양쪽 휠/레일 접촉에 발생하는 수직하중의 비를 이용해서 전복안전도를 평가하였다. 캔트평면에서 휠/레일 접촉부에서 작용하는 수직력은 Fig. 5와 같이 표현되고 차체가 곡선부 통과시 원심력과 중력의 합력은 게이지 중심에서 b만큼 떨어진 부분에 좌우 수직하중의 합의 크기로 작용하게 된다. Fig. 5에서 게이지 중심에 대한 모멘트에 합은 식(6)과 같이 표현된다.

$$\Sigma M = F_L \frac{G}{2} + (F_L + F_R)b - F_R \frac{G}{2} = 0 \tag{6}$$

$$b = \frac{|F_R - F_L|}{(F_R + F_L)} \frac{G}{2} \tag{7}$$

식(6)을 b에 대해서 정리하면 식(7)과 같이 표현된다.

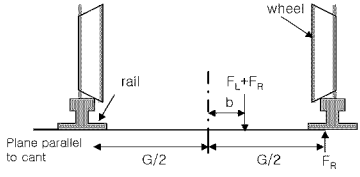

Fig 5 캔트평면에서 하중관계도.

본 연구에서는 식(7)을 식(4)에 대입하여 식 (8)과 같은 전복안전도식을 적용하여 평가하였다.

$$S_{unover} = \frac{(F_L + F_R)}{|F_R - F_L|} \tag{8}$$

3. 해석결과

Fig. 6과 7은 차체 틸팅없이 곡선을 초과횡가속도 0.2g가 발생하도록 통과할 경우의 좌우 휠/레일 접촉부에서 발생하는 수직력의 이력과 이때 전복안전도의 이력을 나타낸 것이다. 두 그림에서 초기 2초 동안은 원곡선 진입전 완화곡선통과 영역이고, 2-4초동안 원곡선 통과 영역으로 이 영역에서 초과

원심력이 0.2g이다. 그리고 4-6초 동안 원곡선 통과후 2초동안 완화곡선을 통과하는 영역을 의미한다. Fig. 6에서 좌우 수직하중은 대칭적인 형상을 보이고 있고 약 1.25초 정도에서 고주파의 성분이 나타나는데 이것은 대차의 법피스탑과 차체 스톱퍼가 충돌하면서 발생하는 충격하중성분이다. 실제 차량에서는 대차의 법피스탑은 고무로된 충격완화부가 설치되어 있어 이러한 현상은 완화될 것이다. 본 해석에서는 대차의 법피스탑과 차체 스톱퍼를 강체로 고려하였기 때문에 이러한 현상을 보이는 것이다.

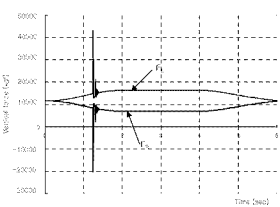

Fig. 6 틸팅하지 않을 경우 좌우수직하중 이력.

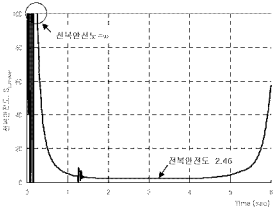

Fig. 7 틸팅하지 않을 경우 전복안전도 이력.

이러한 두 하중에 근거한 전복안전도는 Fig. 7과 같이 나타내었다. 초기 곡선진입직전에는 전복안전도가 무한대로 나타나고 원곡선 통과구간인 2~4초 구간에서 전복안전도가 최소값을 가짐을 알 수 있다. 이 결과는 식(4)의 이론식과 경향이 일치하고 물리적으로도 타당한 결과로 판단된다. 이 경우 최소 전복안전도는 약 2.46인데 이것은 일반차량에 비해 약 2.5배 낮은 값이다. 이것은 틸팅차량이 곡선부에서 기존차량에 비해 약 30%정도 고속으로 주행하기 때문에 초과원심력 0.2g의 영향 때문이다.

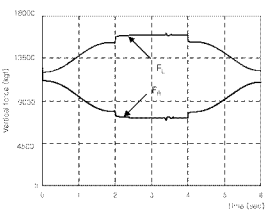

Fig. 8 틸팅시 좌우수직하중 이력.

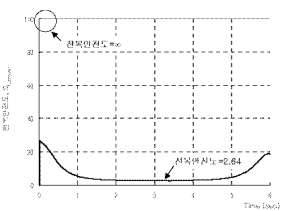

Fig. 9 틸팅시 전복안전도 이력.

Fig. 8과 9은 차체를 Fig.4(b)와 같은 조건으로 틸팅하면 곡선을 초과횡가속도 0.2g가 발생하도록 통과할 경우의 좌우 휠/레일 접촉부에서 발생하는 수직력의 이력과 이때 전복안전도의 이력을 나타낸 것이다. 이 경우도 역시 초기 곡선진입직전에는 전복안전도가 무한대로 나타나고 원곡선 통과구간인 2~4초 구간에서 전복안전도가 최소값을 가짐을 알 수 있다. 이 경우 최소 전복안전도는 약 2.64로 틸팅하지 않을 경우보다 전복안전도가 향상됨을 알 수 있다. 이것은 본 차량의 무게중심은 레일에서 1700mm에 위치하고 틸팅회전중심은 1527mm에 위치하는데 차체가 곡선내측으로 틸팅될 경우 무게중심 역시 내측으로 이동하기 때문이다.

Fig. 10과 11은 차체를 틸팅하면 측풍을 받을 경우이다. 본 연구에서는 측풍을 영향을 고려하기 위해 최대 풍속이 30m/s일때를 고려하였다. 이때 측풍에 의한 풍압은 식(9)와 같이 표현된다.

$$P_w = V_w \rho_{air} \gamma_{air} \quad (9)$$

여기서 V_w는 풍속, ρ_{air}는 공기밀도 및 γ_{air}는 공기저항계수를 의미한다. 본 연구의 경우 풍압은 0.378kN/m^{2}이고 측풍에 의한 힘은 F_w=$P_w A$로 측풍에 차체의 단면적으로 곱한 값이다. 차체의 틸팅과 측풍을 고려할 경우 최소 전복안전도는 약 1.53였다.

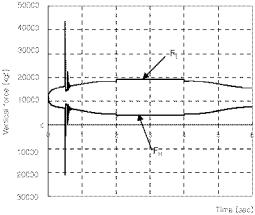

Fig. 10 측풍을 고려한 경우 수직하중 이력.

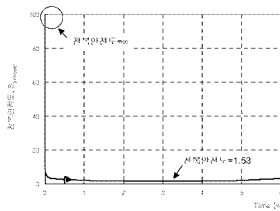

그림 11 측풍을 고려한 경우 전복안전도 이력.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 개발중인 한국형 고속 틸팅열차의 전복안전도를 틸팅 차량이 기존차량 대비 곡선부를 고속주행에 따른 초과 횡방향 원심 가속도의 영향, 차체 틸팅의 효과 및 측풍이 영향을 고려하여 평가하였다. 해석결과 틸팅하지 않은 상태로 곡선을 30%향상된 속도로 증가할 때 전복안전도는 약 2.5배 감소하였고 틸팅시에는 틸팅하지 않을 경우에 비해 약 7%증가 하였다. 측풍의 영향을 고려했을 경우에도 전복안전도가 1.53으로 전복에 안전성은 확보한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, 틸팅 시스템 실용기술개발, 철도청, 2004.
2. 한국철도기술연구원, 곡선부 고속주행용 대차설계기술개발, 한국철도기술연구원, 1999.

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업으로 지원된 "틸팅시스템 실용기술개발"과제의 연구결과의 일부입니다.