풍압력을 받는 철도차량의 전복 안전에 관한 이론 해석

Theoretical Analysis on Overturn Safety of Train affected by Wind Pressure

남성원*

Seong-Won Nam

Abstract Rolling stocks are often subjected to the effects of natural strong wind or wind pressure caused by the crossing train. These wind pressure cause the falling-off in running stability and overturn safety. It is sometimes reported that trains are blown over by a gust of wind. So, many countries enact regulations to secure the overturn safety for wind speed. In this study, theoretical equations of overturn safety based on multi-body model are derived and analyzed the difference between the result of the solid model and that of multi-body model. In case of multi-body model, it is assumed that the degrees of freedom for carbody and bogie are assigned an independent values respectively. The results show that the latter approach based on multi-body model can access the overturn safety of train and replace the conventional method by using commercial software which is accessing with decrement of wheel load.

Keywords : Wind pressure, Overturn, Safety, Solid model, Multi-body model

초 록 철도차량은 자연 강풍 뿐만 아니라 두 열차의 교행으로 인한 교행 풍압도 동시에 받는 경우가 종종 발생하며, 이러한 풍압에 의하여 철도차량의 주행 안정성이 저해될 뿐만아니라 전복의 원인이 되기도 한다. 또한, 해외에서는 강력한 돌풍에 의하여 철도차량이 전복되는 실제 사고 사례가 종종 보고되기도 한다. 따라서, 대부분의 국가에서는 풍속에 대한 차량 운전 규제를 통하여 안전성을 확보하고 있다. 본 연구에서는 다물체 모델에 기초한 철도차량의 전복안전성 이론식을 개발하였으며, 이를 강체모델의 결과와 비교하였다. 후자에서는 대차 및 차체를 별도의 자유도를 가진 것으로 간주하였다. 다물체 모델은 윤중 감소율을 평가하는데 사용 되어온 상용 프로그램을 이용한 기존의 방법을 대체하여 해석할 수 있음을 알 수 있다.

주요어 : 풍압, 전복, 안전성, 강체 모델, 다물체 모델

1. 서 론

철도차량은 운행중에 자연 강풍 뿐만아니라 상하행선 열차간의 교행으로 인한 열차 풍압도 동시에 받는 경우가 종종 발생하며, 이러한 풍압에 의하여 철도차량의 주행 안정성이 저해될 뿐만 아니라 때로는 열차 전복의 원인이 되기도 한다. 해외에서는 돌풍이나 강풍에 의하여 철도차량이 전복되는 사고 사례가 보고되기도 하여 이를 증명하고 있다. Table 1에 일본 및 유럽에서 발생한 강풍 관련 철도 주요 사고 사례들을 나타내었다.

표에서 알 수 있듯이, 강풍에 의한 열차 전복 사고는 해양 국가 뿐만아니라 내륙 국가에서도 발생하고 있으며, 차량 속도와 무관하게 발생하지만, 선로 조건의 경우, 절개지 이외의 교량 및 성토 구간에서 많이 발생한 것으로 나타났다. 이는 교량 및 성토 구간과 같이 바람의 영향을 열차가 직접 받는 선로 조건에서 위험성이 증가하며, 선로 좌우의

절개지는 일종의 방풍벽 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 또한, 일본의 경우는 대부분의 사고가 표준궤보다 작은 협궤에서 발생하여 궤간의 크기가 열차 전복 안전에 주요한 요소중 하나임을 말해준다. 본 연구에서는 철도차량이 주행중 받는 자연 횡풍과 교행 열차풍에 의한 전복 안전성의 검토 요소중 하나인 윤중 감소율을 분석할 수 있는 다물체 모델식을 개발하였으며, 결과를 정량적으로 검토하였다. 또한, 열차 모델로서 차량을 단일 물체로 고려한 강체 모델과, 차체 및 대차를 각각 분리하여 고려한 다물체 모델을 이용하여 비교 분석하였다.

2. 차량 전복 이론식

2.1 강체 모델

철도차량이 선로상을 주행중에 횡방향의 외력을 받아 전복되는 이론 계산식은 Fig. 1과 같이 차량을 강체 모델로 가정하면 다음과 같다. 강체 차량 모델에 작용하는 힘은 곡선 통과시의 원심력에 의한 힘, 차량 중량에 의한 힘, 횡풍 및 교행 풍압에 의한 힘으로 구성된다. 차량에 작용하는 힘의 역학 관계로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5244, E-mail : swnam@krri.re.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.537>

Table 1 Overturn accidents due to wind pressure[1]

Year	Country	Site	Damage of train	Remarks
1899	Japan	Yazaka	8-cars overturn	Pc-Fc mixed
1903	England	Morecombe	Pc-car overturn	30km/h speed
1925	Ireland	Owencarrow	Partial overturn	Banking track
1934	Japan	Ishiyama	9-cars overturn	10km/h (on bridge)
1986	Japan	Yobe	7-cars overturn	55km/h (on bridge)
1990	Swiss	Oberalpsee	All cars overturn	8m Banking track (stop)
1994	Japan	Nemuro	3-cars overturn	50km/h speed
1997	Belgium	Oostkerke	2-cars overturn	116km/h speed (in curve)
2003	Italy	Sarno	10-cars overturn	6-cars empty
2005	Japan	Uetsu	All cars overturn	Bridge-track access area
2006	Japan	Nobeoka	2-cars overturn	25km/h speed (in station)

Fig. 1 Rigid body model

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

$$b \leq \frac{G}{2} \cdot \frac{1}{s} \quad (2)$$

$$\tan \alpha = \frac{F}{W} = \frac{\frac{mV^2}{r} + pA}{mg} \quad (3)$$

$$\tan \theta = \frac{c}{G} \quad (4)$$

여기서, α 는 합력이 이루는 각도, θ 는 캔트각, A 는 차체 측면적, b 는 합력의 작용점 거리, c 는 캔트, H 는 차체 중심 높이, g 는 중력 가속도, G 는 궤간, m 은 열차무게, p 는 풍압, r 은 곡선 반경, V 는 차량 속도를 각각 나타낸다. 위의 식 (1)~(4)로부터 다음 식을 유도 할 수 있다.

$$b = H \left(\frac{\frac{mV^2}{r} + pA}{mg} - \frac{c}{G} \right) \quad (5)$$

횡풍압에 의한 차량 전복에 대한 조건은 다음 3가지 경우를 고려할 수 있다. ①외궤측 열차가 곡선 통과중에 내궤측 으로부터의 횡풍과 내궤측 열차와의 교행으로 인한 열차풍을 받는 경우 ②평탄선로를 주행중 횡풍과 교행 열차풍을 받는 경우 ③곡선에 내궤측 열차가 정차한 상태에서 외궤측 으로부터의 횡풍과 외궤측 열차와의 교행으로 인한 열차풍을 받는 경우이다. 위의 ①의 경우는, 횡풍, 내궤측 열차 교행 풍 및 원심력이 모두 외궤측 방향으로 작용하며, ②의 경우는, 직선이므로 캔트가 0이며, 곡선 반경이 ∞ 로, ③의 경우는, 차량이 정지한 상태이므로 열차속도 V 가 0이며, 횡풍의 작용 방향이 (-)로 작용한다. 어느 경우나 b 의 값이 안전율을 고려한 식 (2)보다 작으면, 열차 전복에 대하여 안전하다고 할 수 있다.

2.2 다물체 모델

대부분의 철도차량은 대차 위에 차체가 놓인 형태의 구조를 가지고 있으므로 차량에 가해지는 풍압력에 대하여 차체와 대차는 횡변위가 각각 다르게 작용할 것이라는 점을 고려하여 다음과 같이 더 세분화된 다물체 차량 모델에 대한 전복 위험을 평가할 수 있다[2].

Fig. 2에서 캔트가 있는 곡선을 주행중인 차량의 차체 측면으로 횡풍이 작용한다고 가정한다. 풍압력을 Y_W , 주행중의 차체 진동에 의한 관성력을 Y_V 라고 하면, 중력 및 원심력의 성분을 고려하여 차체 및 대차에 작용하는 레일면에 수평 및 수직인 힘, 그리고 차체 중심에 대한 모멘트는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = Y_W + Y_V + W_B \left(\frac{V^2}{Rg} \cos \theta - \sin \theta \right) \quad (6)$$

$$Z = W_B \left(\frac{V^2}{Rg} \sin \theta + \cos \theta \right) \quad (7)$$

$$Y' = W_T \left(\frac{V^2}{Rg} \cos \theta - \sin \theta \right) \quad (8)$$

Fig. 2 Multi body model

$$Z' = W_T \left(\frac{V^2}{Rg} \sin \theta + \cos \theta \right) \quad (9)$$

$$M = -Y_W e \quad (10)$$

여기서, W_B 는 차체 중량, W_T 는 대차 중량, R 은 곡선 반경, V 는 차량 속도, θ 는 캔트 각도, e 는 차체 중심과 횡풍에 대한 풍압 중심간 거리를 각각 나타낸다. 그림에서 모든 외력의 합력의 작용선이 외측 궤도보다 바깥을 통과하면 차량은 외측으로 전복된다. 합력이 외측측의 차륜과 레일의 접촉점을 통과할 때, 이 점 주위의 모멘트의 균형을 생각하면, 반대측 차륜이 레일에 미치는 윤중은 0이 되어야 하며, 이 상태가 전복한도이며, 그림에서 외측측으로 전복이 된다.

여기서, 차량 전복에 대한 위험률을 정의하고, 기호 D 로 표기하기로 한다. 위의 한도 상태에서는 $D=1$ 로 하며, 모멘트도 고려한 모든 외력의 합력의 방향이 궤간의 중앙을 통과할 때 $D=0$ 로 한다. 합력의 작용선이 궤간의 중앙에서, 1/4 만큼 외궤로 치우친 점을 통과할 때가 $D=0.5$ 이다. $D=0$ 에서는 좌우 윤중은 같고, $D=0.5$ 에서는 내외궤에 작용하는 윤중은 각각 평균 값의 50%만 증감하는 것이 된다. 즉, $D=1$ 에서는 내외궤에 작용하는 윤중은 0이 되고, 외측 궤도측의 윤중은 평균 윤중의 2배가 된다. 차량 전복에 대한 안전율은, 궤간의 1/2를, 궤간의 중앙점과 합력의 작용선이 레일면을 가로지르는 점과의 간격으로 나눈 몫으로, 이 값은 $1/D$ 과 같으며, $D=0.5$ 는 안전율 2를 의미한다고 할 수 있다. 따라서, 합력의 작용점 B점 주위의 모멘트는 0 이어야 하므로, 다음의 식이 성립한다.

$$\left(\frac{G}{2} D - y \right) Z + \frac{G}{2} D Z' - h_{GB} Y - h_{GT} Y' + M = 0 \quad (11)$$

여기서 G 는 차륜 접촉점 간격, h_{GB} 는 차체 중심 높이, h_{GT} 는 대차 중심높이를 각각 나타낸다. 식(6)~(10)을 (11)에 대입하면, D 에 관한 식으로 유도할 수 있는데, Kunieda[3]는

D 에 관한 식을 유도할 때 1량의 철도차량이 중앙을 중심으로 좌우 대칭이므로, 1/2량에 대하여 자연 횡풍만을 고려하여 유도하였으나, 일반대차를 사용하지 않는 경우나 KTX-산천의 동력 객차처럼 대칭이 아닌 경우도 있으므로 본 연구에서는 차량 1량 전체에 대하여 다음과 같이 유도하였다.

$$D = \frac{2h_G^* \left(\frac{V^2}{Rg} - \frac{e}{G} \right) + \frac{2h_G^*}{G} \left(1 - \frac{\mu}{1 + \mu h_G^*} \right) d_y + \frac{2h_{BC}^*}{GW} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 C_Y + P_I \right) S \quad (12)$$

$$h_{BC} = h_{GB} + e \quad (13)$$

$$h_G = \frac{W_B h_{GB} + W_T h_{GT}}{W} \quad (14)$$

여기서, u 는 풍속, S 는 차체 측면적, μ 는 대차/차체 중량비, W 는 차량 중량, h_G^* 및 h_{BC}^* 는 각각 차량 중심 유효높이 및 차체 풍압 중심 유효 높이로서 각각 (13)(14)로부터 구한다. 위에서 $D=1$ 에 되면, 전복한계로서 A점 주위 모멘트가 0이 된다. 만약 풍향이 바뀌어서 곡선 내측으로 전복하는 경우라면, 식 (12)의 우변 제 2항 및 3항의 부호가 (-)가 되며, 이 경우는 $D=-1$ 이 되어 C점 주위의 모멘트가 0이 된다는 것을 의미한다.

한편, Kunieda의 식과는 달리, 본 연구에서는 열차가 교행할 때 발생하는 풍압도 식(12)에서 고려하였는데, P_I 는 참고문헌[4]에서와 같이 궤도에 평행한 수직 구조물에 대한 풍압크기를 나타내는 식을 준용하였다 단 교행 열차이므로 열차간 상대속도의 크기를 고려하였으며, 차량 종류에 따라, 적절한 상수를 사용하여 보정하였다.

$$P_I = k_1 C_p \left(\frac{V}{3.6} \right)^2 \frac{1}{1600} \quad (15)$$

$$\text{여기서, } C_p = \frac{1.5}{(L_g + 0.25)^2} + 0.02$$

L_g 는 궤도 중심선으로부터 교행 차량까지의 거리를 나타내며, k_1 는 차량 종류에 따라 결정되며, 화물차량과 같은 경우는 1.0, 기존선 차량과 같은 경우는 0.85, 고속열차와 같은 유선형 차량의 경우는 0.6을 사용한다.

3. 해석 결과 및 분석

앞 절에서 유도한 강체 모델에 대한 수식 (5)와 다물체 모델에 대한 수식 (12)을 비교하기 위하여 KTX-산천 열차끼리 교행할 경우와 8200대 전기기관차가 견인하는 컨테이너 화물 열차와 교행할 때를 가정하여 차량의 횡풍압에 대한 전복 안전성을 검토하였다. 계산 조건으로는, 선로 중심 간격 4.3m, 선로 곡선 반경 3000m, 최대 캔트 180mm, 자연 횡풍 속도 20m/s, KTX 차량 속도 250km/h, 컨테이너 화물열차의 속도 120km/h 로 가정하였다. KTX 동력차의 경우, 대차 프레임은 2.42톤, 윤축 1셋 1.425톤, 대차 프레임 무게 중심 높이는 레일면으로부터 0.56m, 차체 무게는 54.96톤, 차

Table 2 Track data

Distance between track centers	4.3m
Radius of Curve	3000m
Cant	180mm
Wind velocity	20m/s
Train speed (KTX)	250km/h
Train speed (Freight)	120km/h

Table 3 KTX train data

	P-car	M-car	T-car
Bogie weight (ton)	2.42	3.02	3.02
Height of center of bogie weight(m)	0.56	0.56	0.56
Carbody weight (ton)	54.96	38.56	22.67
Height of center of carbody weight (m)	1.72	1.54	1.64
Carbody lateral area (m ²)	70.05	68.26	56.03
Height of center of wind force for carbody (m)	2.015	1.925	1.8795

체 무게 중심 높이는 레일면으로부터 1.72m, 차체 측면적은 70.05m², 차체 풍압 중심 높이는 2.015m이며, KTX 동력 객차의 경우, 대차프레임은 3.02톤, 윤축 1셋 1.608톤, 대차프레임 무게 중심 높이는 레일면으로부터 0.56m, 차체 무게는 38.56톤, 차체 무게 중심 높이는 레일면으로부터 1.54m, 차체 측면적은 68.26m², 차체 풍압 중심 높이는 1.925m이다. KTX 객차는, 대차프레임은 3.02톤, 윤축 1셋 1.608톤, 대차프레임 무게 중심 높이는 레일면으로부터 0.56m, 차체 무게는 22.67톤, 차체 무게 중심 높이는 레일면으로부터 1.64m, 차체 측면적은 56.03m², 차체 풍압 중심 높이는 1.8795m이다. 컨테이너 화차의 경우, 윤축 2셋을 포함한 대차 무게는 4.65톤, 대차 무게 중심 높이는 0.48m, 차체 무게는 9.2톤, 차체 무게 중심 높이는 0.845m이며, 컨테이너의 체원은(길이×폭×높이(12.031×2.348×2.695)m, 무게 3.94톤이며, 8200대 전기기관차의 차량 무게는 약 88톤, 대차 무게는 13.16톤, 차체 무게는 61.68톤이며, 대차의 무게 중심 높이는 0.6475m, 차체의 무게 중심 높이는 1.9m, 차체의 측면적은 61.18m²로 가정하였다.

Table 2에 선로 조건과 Table 3에 KTX-산천 차량 조건을 각각 나타내었다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 전복 위험도 값이 1인 경우는 외궤측 차량이 곡선궤도 바깥으로 전복되는 경우이며, 이 값이 -1인 경우는 내궤측 차량이 곡선궤도 안쪽으로 전복되는 것을 의미한다. Fig. 4~Fig. 9에 계산 결과를 표시하였다. 각각의 그림에서 횡축은 차량 속도를 나타내며, 종축은 전복 위험도를 나타낸다. ■ 기호는 다물체 모델을 적용했을 경우의 외궤측 차량이 바깥으로 전복될 위험도를 나타낸 것이며, ● 기호는 내궤측 차량이 곡선 안쪽 방향으로 전복될 위

Fig. 3 Overturn cases for two trains

Fig. 4 Overturn risk(KTX P-car)

험도를 나타낸 것이다. 강체 모델을 적용한 경우는, ▲ 기호가 외궤측 차량이 바깥 방향으로 전복될 위험도를, ▼ 기호는 내궤측 차량이 곡선 안쪽 방향으로 전복될 위험도를 각각 표시하였다. KTX-산천 열차가 250km/h로 서로 교행할 경우에 동력차(Fig. 4), 동력객차(Fig. 5) 및 객차(Fig. 6)가 받는 전복 위험도는 차량 형태에 따라 다소 차이가 있지만, 외궤측 차량의 경우는 대부분이 0~0.7 사이의 값을 가진다. 외궤측 차량은 곡선 통과시 원심력과 20m/s의 자연 횡풍, 두 열차의 교행에 따른 열차풍압의 방향이 모두 외궤측 방향이므로, 원심력이 차량속도의 2승에 비례하여 증가하므로 차량 속도가 증가할수록 전복 위험도가 증가함을 알 수 있다. 이에 비하여 내궤측 차량은 차량 속도가 작을 경우에 전복 위험도가 큰 값을 가지는데, Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 내궤측 차량은 자연 횡풍과 열차 교행 풍압이 모두 곡선 안

Fig. 5 Overturn risk(KTX M-car)

Fig. 7 Overturn risk(KTX-Locomotive)

Fig. 6 Overturn risk(KTX T-car)

Fig. 8 Overturn risk(KTX-Container)

쪽 방향으로 작용하고 있으므로 차량 속도가 크면 원심력이 바깥 방향으로 작용하여 이들 힘과 상쇄 작용을 하여 전복 안전도가 작아지지만, 차량 속도가 작으면 외측으로 작용하는 원심력도 작아지므로 내측 차량은 차량속도가 작을 때에 전복 위험율이 더 큰 경향을 나타낸다.

KTX-산천 열차가 250km/h로 주행하고, 8200대 기관차가 견인하는 컨테이너 화물열차가 120km/h로 교행할때의 전복 위험도를 각각 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 두 열차의 상대 속도는 370km/h로서, KTX-산천 열차끼리의 교행때보다 130km/h가 작기 때문에 전복 위험도도 비교적 작게 나타남을 알 수 있다. 8200대 전기기관차의 경우(Fig. 7), 차량 전체 무게가 약 88톤으로, KTX-산천 동력차와 객차보다 각각 1.34배, 2.5배 무겁기 때문에 횡풍과 교행 열차풍압의 영향을 덜 받기 때문인 것으로 사료된다. 컨테이너 화물 차량의 경우(Fig. 8), 차량 공차 중량이 가볍고, 차체 풍압 중심이 높기 때문에 원심력의 영향은 작고, 속도 증가에 따른 교행 풍압의 영향이 커져서 내측 차량은 다른 차량과 달리 거의 일정한 전복 위험율을 나타낸다.

Fig. 9 KTX-산천 P-car가 외궤에 있을 경우에, 자연 횡풍의 有無와 직선 및 곡선 선로에서의 전복 위험도를 비교하였다. 자연 횡풍이 없을 경우에는 직선 및 곡선 모두 전복

Fig. 9 Overturn risk(KTX P-car)

안전도 값이 더 작아짐을 알 수 있다. 차량 속도가 200km/h 이하에서는 직선 선로에서의 위험도가 더 크지만, 속도가 증가하여 250km/h 이상에서는 곡선 선로에서의 위험도가 더 커지는 경향을 나타낸다. 250km/h 이상에서는 곡선에 따른 켄트, 원심력의 영향이 증가하지만, 고속철도 선로에서는 기존 선에 비하여 곡선 반경을 더 크게 설계하므로 차량 전복에 대하여 곡선 효과가 미미해질 것으로 판단된다. 그림에서 알

수 있듯이 직선 및 곡선 선로 모두 횡풍 유무에 상관없이 차량 전복 위험도는 1.0보다 훨씬 작은 값을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도차량이 주행중 받는 자연 횡풍과 교행 열차충에 의하여 전복 안전성의 정량적 크기를 검토하였다. 열차 모델로서 차량을 단일 물체로 고려한 강체 모델과, 차체 및 대차를 각각 분리하여 고려한 다물체 모델식을 이용하여 비교 하였다. 강체 모델은 적용하기에 간편한 반면, 차량에 끼치는 모든 힘의 작용점을 동일한 차량 중심점에 작용한다고 가정하여 구성하였으며, 다물체 모델에서는 대차 차체를 분리하여 좀 더 현실적으로 수식을 구성하였으나, 각 파라메타에 대한 정확한 정보를 얻기 어려운 측면이 있다. 수식에 대한 적용 사례로서, 현재 우리나라에서 가장 고속으로 주행하고 있는 차량인 KTX-산천과 열차풍압 및 자연 횡풍의 영향을 많이 받을 것으로 예상되는 기관차 견인 공차 컨테이너 화물열차를 선택하여 해석을 하였다. 강체 모델 및 다물체 모델의 적용 결과, 외궤측 차량은 차량속도가 증가할수록 바깥 방향으로의 전복 위험도가 증가하며, 내궤측 차량은 차량 속도가 작을때에 곡선 안쪽 방향으로의 전복 위험도가 커짐을 알 수 있었다. 두 해석법을 비교하면, 각각의 모델에 대한 수식 유도 과정에서 가정이 다르기 때문에 정량적인 값은 차이를 나타내지만, 정성적인 패턴은 유사하여 상호 보완적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도시설공단의 연구 용역인 “철도 건설 경쟁력 확보를 위한 제반 연구”와 한국철도기술연구원의 주요 사업인 “레일 방식 초고속 철도 핵심 기술 개발” 사업의 보조로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S.W. Nam (2011) Theoretical Analysis on Turnover Safety of Train affected by Wind Pressure., *Proc. of Korean Society for Railway in Spring*., pp. 1-6 (in Korean).
- [2] S.W. Nam (2009) Parametric Study of the Effects of Train Wind on Turnover Safety., *Journal of the Korean Society for Railway*., 6(12), pp. 961-966 (in Korean).
- [3] M. Kunieda (1972) Theoretical Study on the Mechanics of Overturn of Railway Rolling Stock, *RTRI Report*, 793, pp. 177-186 (in Japanese).
- [4] UIC Code 779-1 (1996) Effect of the slipstream of passing trains on structures adjacent to the track.
- [5] Development of Derail Safety Assessment and Prevention Technology, (2008), *KRRI Report* (in Korean).
- [6] Standard of Railroad Technology : Civil Engineering, (2002), *Research Society for Civil Engineering and Technology* (in Japanese).

접수일(2012년 7월 31일), 수정일(2012년 10월 8일),
게재확정일(2012년 10월 16일)

Seong-Won Nam : swnam@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1, Worum, Uiwang-city,
Gyeonggi-do, 437-757, Korea