

철도차량의 윤중 감소가 탈선계수에 미치는 영향 연구

구정서*† · 오현석*

* 서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과

Study of Influence of Wheel Unloading on Derailment Coefficient of Rolling Stock

Jeong Seo Koo*† and Hyun Suk Oh*

* Department of Rolling Stock System, Seoul National University of Science and Technology.

(Received June 19, 2012 ; Revised September 27, 2012 ; Accepted September 28, 2012)

Key Words: Derailment Coefficient(탈선계수), Nadal's Formula(나달식), Wheelset(윤축), Wheel Unloading(윤중 감소), Domestic Derailment Regulation(국내 탈선규정), Wheel Load(윤중)

초록: 본 논문에서는 윤중감소를 고려한 이론적 새로운 탈선계수 모델을 제시한다. 본 탈선계수 모델은 열차 충돌 원인 탈선현상을 예측할 수 있는 단일 윤축의 이론적 탈선모델을 바탕으로 도출한다. 현재 국내 탈선규정에서는 플랜지 각이 60° 이고 마찰계수가 0.3인 조건을 나달식에 적용하여 탈선계수를 구한 후 안전율을 적용하여 0.8을 규정하고 있으나, 플랜지 각이 변경되면 이론적 설명이 부족하게 된다. 따라서 제시한 탈선계수 이론모델을 이용하여 탈선계수 규정 값 0.8을 이론적으로 접근해본다. 또한 국내탈선규정에서 윤중 감소율을 50%까지 허용하고 있으나 명확한 규정근거를 제시하고 있지 않다. 따라서 윤중 규정 50%감소와 탈선계수 규정 값 0.8과의 상관 관계를 앞서 제시한 탈선계수 이론모델을 이용하여 이론적으로 규명한다. 마지막으로 동역학 시뮬레이션을 이용하여 탈선계수 이론모델의 타당성을 입증한다.

Abstract: A new theoretical derailment coefficient model of wheel-climb derailment is proposed to consider the influence of wheel unloading. The derailment coefficient model is based on the theoretical derailment model of a wheelset that was developed to predict the derailment induced by train collisions. Presently, in domestic derailment regulations, a derailment coefficient of 0.8 is allowable using Nadal's formula, which is for a flange angle of 60° and a friction coefficient of 0.3. However, theoretical studies focusing on different flange angles to justify the derailment coefficient of 0.8 have not been conducted. Therefore, this study theoretically explains a derailment coefficient of 0.8 using the proposed derailment coefficient model. Furthermore, wheel unloading of up to 50% is accepted without a clear basis. Accordingly, the correlation between a wheel unloading of 50% and a derailment coefficient of 0.8 is confirmed by using the proposed derailment coefficient model. Finally, the validity of the proposed derailment coefficient model is demonstrated through dynamic simulations.

- 기호설명 -

α : 플랜지 여각(rad)
 a : 서스펜션 지지점과 휠 중심점 사이의 거리(mm)
 b : 궤간(mm)
 h : 휠의 반경(mm)
 β : h/b
 γ : a/b
 Q : 횡압(kN)

P : 윤중(kN)
 μ : 마찰계수
 F : 윤축의 횡방향 하중(kN)
 W_L : 좌측 윤축의 수직하중(kN)
 W_R : 우측 윤축의 수직하중(kN)
 R_L : 좌측차륜의 답면에 발생하는 반력(kN)
 R_R : 우측차륜의 답면에 발생하는 반력(kN)
 R_F : 우측차륜의 플랜지-레일 접촉으로 발생하는 반력(kN)
 d_R : 우측차륜의 플랜지-레일 접촉면에서 접선 상방향 변위(mm)

† Corresponding Author, koojs@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

대량 운송수단 중의 하나인 열차는 사고가 발생하면 대부분 큰 사고로 이어져 많은 인명과 재산피해가 발생하기 때문에 사고 방지를 위해 많은 연구와 안전기준이 마련되어 왔다.⁽¹⁻⁴⁾

최근 본 연구팀은 주행 중 철도차량의 윤축과 레일의 역학적 작용을 이론적으로 분석하여 차륜 타고오름(wheel-climb) 메카니즘을 정상형태, 타고오름 형태, 전복 형태, 이들의 복합 형태 등으로 구분하여, 정상상태, 타고오름(Climb-up) 탈선, 타고오름/전복(Climb/roll-over) 탈선, 전복(Roll-over) 탈선 유형 등 4가지로 정의한 후, 가상시험모델에 적용하여 열차 충돌 후 탈선거동을 예측하고 평가하였다.^(4,5) 이 연구는 충돌 후 유발되는 탈선거동을 예측하기 위하여 제안된 이론이지만, 본 논문을 통하여 기존의 주행 중 탈선을 평가하는데도 유용하며 국내외 탈선규정에 명시된 윤중 감소와 탈선계수 관계를 규명하는데 유용함을 보이려고 한다.

현재 국내 규정에서 주행 중 허용 탈선계수 값(Q/P)은 0.8로 규정하고 있고 동시에 차륜의 윤중 감소율을 50%까지 허용하고 있다.⁽⁶⁾ 그러나 해당 규정의 부록에서도 ‘탈선계수 0.8은 플랜지 각이 60° 이고 마찰계수가 0.3인 조건에서 나달(Nadal) 식으로 구한 값 0.94에 안전율을 적용한 것’으로 규정하고 있을 뿐 윤중 감소와 탈선계수의 상관 관계를 잘 설명하지 못하고 있다. 더구나 최근 많이 사용되는 플랜지 각 65°, 70° 에 마찰계수 0.3을 적용하면 탈선계수 값은 각각 1.12, 1.34가 되어 0.8은 너무 보수적인 값이 되고 만다.

본 논문에서는 충돌 후 탈선거동을 평가하는 단일 윤축 탈선이론을 기존의 탈선이론 모델에 맞도록 수정하여 새로운 탈선계수를 제안하고, 현재 사용되는 탈선규정의 나달(Nadal)식, 바인스톡(Weinstock)식과 비교하여 규정의 허용 탈선계수 0.8에 대한 근거가 나달 식 등으로부터 설명될 수 없고, 윤중 감소를 고려한 본 연구의 탈선계수로 설명될 수 있음을 보인다.

마지막으로 단일윤축 모델의 동역학적 시뮬레이션 검증을 통해 새로 제안한 탈선계수와 윤중 감소 영향 예측결과의 타당성을 입증한다.

2. 단일윤축의 탈선계수

2.1 단일윤축의 탈선계수 이론 모델

큰 외력이나 주행 중 불안정 거동으로 철도차

량의 윤축에 급격한 수직/수평하중 변동이 발생하면 탈선을 일으킬 수 있다. 궤도틀림, 차륜의 수직/수평하중의 조합, 차륜-레일 접촉부위의 마찰계수, 차륜 플랜지의 각도, 차륜의 공격각 등에 따라 여러 가지 탈선유형이 나타날 수 있다.

철도차량의 탈선은 크게 타고오름 형태와 미끄러져오름 형태, 전복 형태, 이들이 복합된 형태로 구분할 수 있으나, 본 논문에서는 타고오름 형태를 근간으로 전복 형태와 이들이 복합된 형태를 포함하여 타고오름 탈선유형으로 명명하였다.

본 절에서는 Fig. 1과 같은 단일윤축 모델을 이용하여 타고오름 탈선유형에 대한 탈선계수 이론 모델을 제안하였다.

Fig. 1은 차륜이 타고오를 때 차륜담면과 레일이 접촉을 유지하면서 주행하는 정상상태를 보여주고 있다. 플랜지와 레일이 접촉을 유지하고 있는 오른쪽 차륜에 대한 정적평형방정식을 각 방향성분에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sum F_H = Q - R_f \cos \alpha + \mu R_f \sin \alpha - \mu R_R = 0 \tag{1}$$

$$\sum F_V = P - R_f \sin \alpha - \mu R_f \cos \alpha - R_R = 0 \tag{2}$$

식 (1), (2)를 정리하면 식 (3)과 같은 탈선계수를 구할 수 있다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{R_f \cos \alpha - \mu R_f \sin \alpha + \mu R_R}{R_f \sin \alpha + \mu R_f \cos \alpha + R_R} \tag{3}$$

또 <부록>에 수록된 정상상태의 윤축이론모델에서 다음의 식을 알 수 있다.

$$R_R = (1 + \gamma) W_R - \gamma W_L + \beta F - R_f (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \tag{4}$$

$$R_f = \frac{F - \mu (W_L + W_R)}{\cos \alpha (1 - \mu^2) - 2\mu \sin \alpha} \tag{5}$$

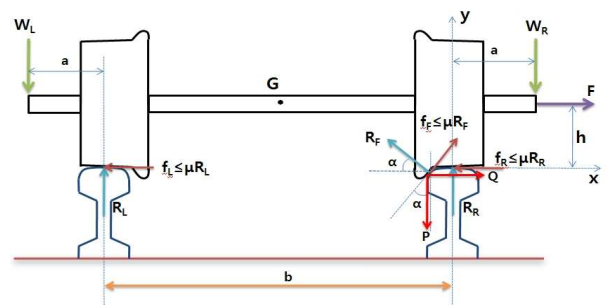


Fig. 1 Free body diagram of a wheel-climb derailment

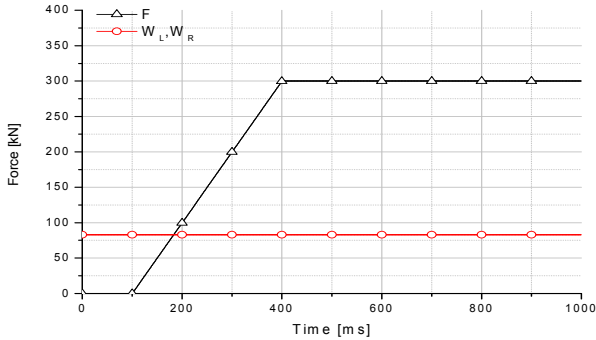


Fig. 2 Input data for no wheel unloading

여기서, $\beta = \frac{h}{b}$, $\gamma = \frac{a}{b}$ 이다.

식 (4)와 (5)를 대입하여 식 (3)을 정리하면 식 (6)과 같은 타고오름 탈선유형에 대한 탈선계수가 구해진다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{F(1 + \mu\beta) - \mu W_L(1 + \gamma) + \mu\gamma W_R}{W_R(1 + \gamma) - \gamma W_L + \beta F} \quad (6)$$

식 (6)의 탈선계수는 횡력, 좌우 윤중의 크기, 마찰계수, 휠의 반경, 궤간, 서스펜션 지지 점과 휠 중심점 사이의 거리, 플랜지 각 등의 함수로 이루어져 있어서, 기존의 나달식이나 바인스톡식에서 고려되지 않았던 기계적 인자들이 탈선에 영향을 미치는 것을 나타낸다.

2.2 기존 탈선계수와 새로운 탈선계수의 비교

식 (7)은 타고오름 탈선시의 나달 식을 보여주고, (7,8) 식 (8)은 타고오름 탈선시의 바인스톡 식을 보여주고 있다.(9)

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan(90 - \alpha) - \mu}{1 + \mu \tan(90 - \alpha)} \quad (7)$$

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan(90 - \alpha)(1 + \mu^2)}{1 + \mu \tan(90 - \alpha)} \quad (8)$$

차량에 윤중 감소가 없는 일반 주행상태를 대상으로 앞에서 제안한 탈선이론모델의 탈선계수를 구하고, 기존의 탈선판별에 사용되고 있는 나달식 및 바인스톡식과 비교하여 제안한 탈선계수와와의 관계를 알아본다.

탈선 조건을 만들기 위해 축중(axle load)을 166kN으로 가정하고, 양쪽 레일의 중심간 거리는 1492mm, 차륜반경은 460mm, 서스펜션 지지점과 휠 중심점 사이의 거리는 254mm를 부여하였다. Fig. 2와 같이 양쪽 차륜에 동일한 힘을 받는 상

Table 1 Critical Derailment coefficients for wheel-climb conditions

Flange angle	μ	Nadal's formula	Weinstock's formula	Current study		
				Climb-up	Climb/roll-over	Roll-over
60°	0.1	1.39	1.49	1.39	N/A	N/A
	0.2	1.14	1.34	1.14	N/A	N/A
	0.3	0.94	1.24	0.94	N/A	N/A
	0.4	0.79	1.19	0.79	N/A	N/A
65°	0.1	1.68	1.78	N/A	N/A	1.62
	0.2	1.36	1.56	1.36	N/A	N/A
	0.3	1.12	1.42	1.12	N/A	N/A
	0.4	0.94	1.34	0.94	N/A	N/A
70°	0.1	2.08	2.18	N/A	N/A	1.62
	0.2	1.64	1.84	N/A	N/A	1.62
	0.3	1.34	1.64	1.34	N/A	N/A
	0.4	1.12	1.52	1.12	N/A	N/A

태에서 탈선이 발생하도록 한쪽에 횡력을 충분히 부여하여 탈선계수 값을 구하였다.

앞에서 제안한 타고오름 탈선계수 식 (6)에 Fig. 2와 같이 좌우 윤중 및 횡력을 입력하여 탈선계수를 구하고, 나달식과 바인스톡 식으로 구한 탈선계수와 함께 비교하면 Table 1과 같다. 플랜지 각이 60° 인 경우는 본 탈선계수와 나달식이 일치하지만 타고오름 탈선이 어려운 플랜지 각 65°, 70°의 경우는 낮은 마찰계수 조건에서 타고오름 탈선대신에 전복탈선이 발생한다.

2.3 윤중 감소량이 탈선계수에 미치는 영향

열차는 주행시 궤도틀림이나 풍력 등 여러 가지 요인에 의해 윤중량이 변한다. 윤중량의 변화는 탈선에 영향을 미치므로 국내에서는 윤중 감소량을 50%까지 허용한다고 규정하고 있고, 이를 기준으로 연구들이 진행되어 왔다.(10) 단일윤축 모델에서 윤중을 50%와 60% 감소시켜 제안한 타고오름 탈선계수 이론모델로 탈선계수를 구하고 탈선규정 값 0.8과의 관계를 분석 평가한다.

2.3.1 좌측 윤중이 50% 감소한 경우

좌측 윤중(W_L)이 50% 감소한 경우의 탈선계수를 구해본다. Fig. 3과 같이 좌우 윤중과 횡력을 입력한 후, 앞에서 구한 식 (6)의 타고오름 탈선 이론모델로 한계탈선계수를 구하면 Table 2와 같다.

Table 2를 보면 좌측 윤중이 50% 감소한 경우

Table 2 Critical wheel-climb derailment coefficients for the 50% unloading of W_L

Flange angle	μ	Nadal's formula	Weinstock's formula	Current study		
				Climb-up	Climb/roll-over	Roll-over
60°	0.1	1.39	1.49	N/A	N/A	0.9
	0.2	1.14	1.34	N/A	N/A	0.9
	0.3	0.94	1.24	N/A	N/A	0.9
	0.4	0.79	1.19	0.79	N/A	N/A
65°	0.1	1.68	1.78	N/A	N/A	0.9
	0.2	1.36	1.56	N/A	N/A	0.9
	0.3	1.12	1.42	N/A	N/A	0.9
	0.4	0.94	1.34	N/A	N/A	0.9
70°	0.1	2.08	2.18	N/A	N/A	0.9
	0.2	1.64	1.84	N/A	N/A	0.9
	0.3	1.34	1.64	N/A	N/A	0.9
	0.4	1.12	1.52	N/A	N/A	0.9

Table 3 Critical wheel-climb derailment coefficients for the 50% unloading of W_R

Flange angle	μ	Nadal's formula	Weinstock's formula	Current study		
				Climb-up	Climb/roll-over	Roll-over
60°	0.1	1.39	1.49	1.39	N/A	N/A
	0.2	1.14	1.34	1.14	N/A	N/A
	0.3	0.94	1.24	0.94	N/A	N/A
	0.4	0.79	1.19	0.79	N/A	N/A
65°	0.1	1.68	1.78	1.68	N/A	N/A
	0.2	1.36	1.56	1.36	N/A	N/A
	0.3	1.12	1.42	1.12	N/A	N/A
	0.4	0.94	1.34	0.94	N/A	N/A
70°	0.1	2.08	2.18	2.08	N/A	N/A
	0.2	1.64	1.84	1.64	N/A	N/A
	0.3	1.34	1.64	1.34	N/A	N/A
	0.4	1.12	1.52	1.12	N/A	N/A

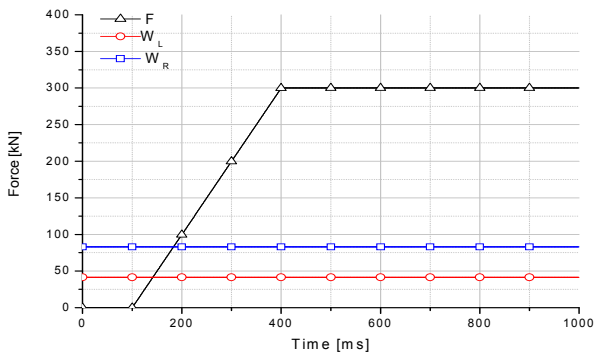


Fig. 3 Input data for the 50% unloading of W_L

에는 플랜지 각 60°, 마찰계수 0.4인 경우에만 탈선계수 0.79에서 타고오름 탈선이 발생하며, 그 외에는 전복 탈선이 발생함을 예측할 수 있다. 이때 탈선계수 값은 0.9로 일정함을 알 수 있다.

2.3.2 우측 윤증이 50% 감소한 경우

우측 윤증(W_R)이 50% 감소한 경우의 탈선계수를 구해본다. Fig. 4와 같이 좌우 윤증과 횡력을 입력 후, 앞에서 구한 식 (6)의 타고오름 탈선이론 모델로 한계탈선계수를 구하면 Table 3과 같다.

Table 3을 보면 우측 윤증이 50% 감소한 경우에는 타고오름 탈선이 일어날 수 있음을 예측할 수 있고, 이때 탈선계수 값은 나달식과 같음을 알 수 있다.

2.3.3 윤증 감소량과 탈선계수와의 관계

앞의 방법과 동일한 방법으로 윤증을 60%까지

Table 4 Derailment coefficients for the wheel unloadings

Flange angle	μ	Nadal's formula	0% decrease	W_L 50% decrease	W_L 60% decrease
60°	0.1	1.39	1.39	0.9	0.69
	0.2	1.14	1.14	0.9	0.69
	0.3	0.94	0.94	0.9	0.69
	0.4	0.79	0.79	0.79	0.69
65°	0.1	1.68	1.62	0.9	0.69
	0.2	1.36	1.36	0.9	0.69
	0.3	1.12	1.12	0.9	0.69
	0.4	0.94	0.94	0.9	0.69
70°	0.1	2.08	1.62	0.9	0.69
	0.2	1.64	1.62	0.9	0.69
	0.3	1.34	1.34	0.9	0.69
	0.4	1.12	1.12	0.9	0.69

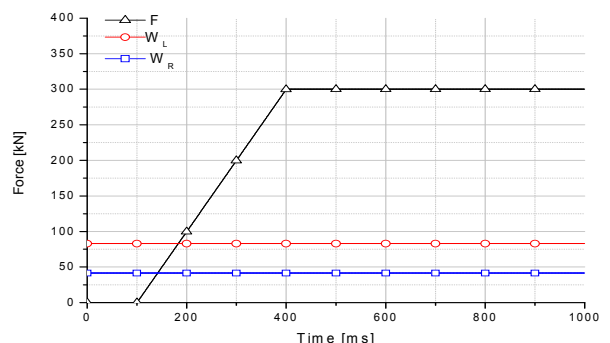


Fig. 4 Input data for the 50% unloading of W_R

감소시켜 탈선계수 규정값 0.8과 비교해본다. Table 4는 윤증 감소가 없을 경우(0%)와, 좌우 윤

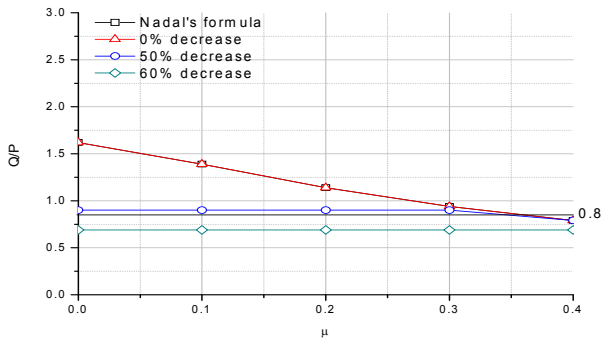


Fig. 5 Derailment coefficients for the wheel unloading of flange angle 65°

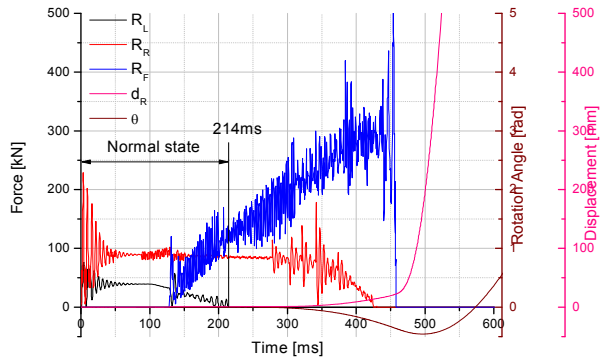


Fig. 6 Results of Recurdyn($\alpha = 20^\circ$, $\mu = 0.2$)

중을 각각 50%, 60% 감소시킨 후 앞서 제안한 타고오름 탈선계수 이론식을 이용해 구하고, 최초로 일어나는 탈선계수를 정리한 것이다.

Table 4는 윤중을 50%, 60% 감소시킨 경우, 우측 윤중이 감소한 경우보다 좌측 윤중이 감소한 경우가 탈선이 먼저 진행되기 때문에 좌측 윤중이 감소한 경우만 정리하였다.

Fig. 5는 Table 4의 값들 중 플랜지 각이 65° 일 때의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 보면 윤중이 50% 감소한 경우에는 탈선규정 값 0.8을 만족하지만 윤중이 60% 감소한 경우에는 탈선계수가 0.69로써 탈선규정 값 0.8보다 낮다. 따라서 탈선규정 값 0.8을 기준으로 윤중 감소량은 50%까지 허용될 수 있음을 알 수 있다.

3. 새로운 탈선계수 이론모델의 검증

앞에서 제안한 이론모델의 타당성을 검증하기 위해 Functionbay사의 다물체동역학 S/W Recurdyn으로 단일윤축을 시뮬레이션 하여 탈선계수 이론식을 검증한다.⁽¹¹⁾ 좌측 또는 우측 윤중을 50% 감소시킨 각각의 경우에 대해 시뮬레이션 하고 본 연구에서 제안한 타고오름 탈선 이론모델로 구한

Table 5 Derailment coefficients by the results of Recurdyn

Flange angle	μ	Simulations by Recurdyn			
		Climb-up	Climb/roll-over	Roll-over	Relative errors
60°	0.1	N/A	N/A	0.93	3.2%
	0.2	N/A	N/A	0.96	6.3%
	0.3	N/A	N/A	0.94	4.3%
	0.4	0.79	N/A	N/A	0%
65°	0.1	N/A	N/A	0.91	1.1%
	0.2	N/A	N/A	0.92	2.2%
	0.3	N/A	N/A	0.94	4.3%
	0.4	N/A	N/A	0.92	2.2%
70°	0.1	N/A	N/A	0.91	1.1%
	0.2	N/A	N/A	0.91	1.1%
	0.3	N/A	N/A	0.95	5.3%
	0.4	N/A	N/A	0.95	5.3%

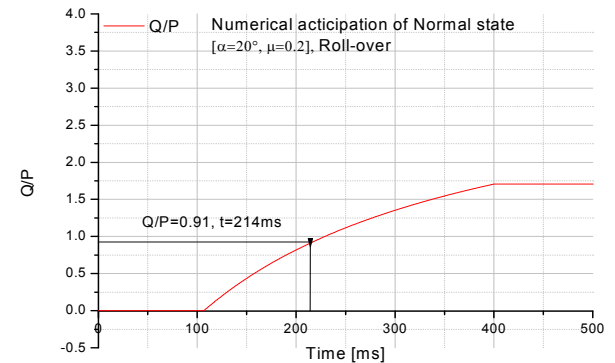


Fig. 7 Derailment coefficient($\alpha = 20^\circ$, $\mu = 0.2$)

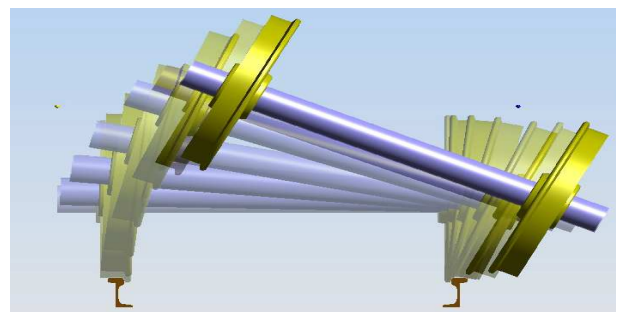


Fig. 8 Derailment behavior of the Roll-over($\alpha = 20^\circ$, $\mu = 0.2$)

한계탈선계수와 비교하였다. 추가로 다양한 경우에 대하여도 탈선 시뮬레이션으로 검증하였으나 여기서는 생략한다.

3.1 좌측 윤중이 50% 감소한 경우

Fig. 3과 같이 좌측 윤중이 50% 감소된 좌우측 윤중값과 횡력을 입력하고, 차륜과 레일 사이에 회

Table 6 Derailment coefficients by the results of Recurdyn

Flange angle	μ	Simulations by Recurdyn			
		Climb-up	Climb/roll-over	Roll-over	Relative errors
60°	0.1	1.39	N/A	N/A	0%
	0.2	1.14	N/A	N/A	0%
	0.3	0.94	N/A	N/A	0%
	0.4	0.79	N/A	N/A	0%
65°	0.1	1.68	N/A	N/A	0%
	0.2	1.36	N/A	N/A	0%
	0.3	1.12	N/A	N/A	0%
	0.4	0.94	N/A	N/A	0%
70°	0.1	2.08	N/A	N/A	0%
	0.2	1.64	N/A	N/A	0%
	0.3	1.34	N/A	N/A	0%
	0.4	1.12	N/A	N/A	0%

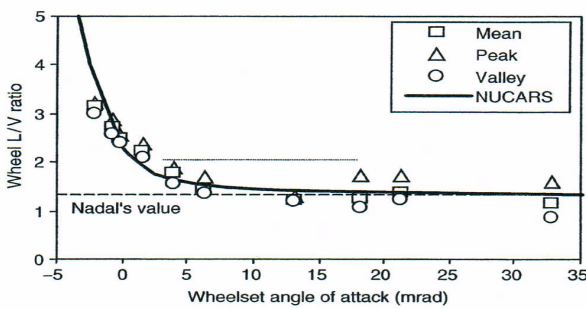


Fig. 9 Effect of wheelset angle of attack on wheel L/V (Q/P) ratio limit⁽⁹⁾

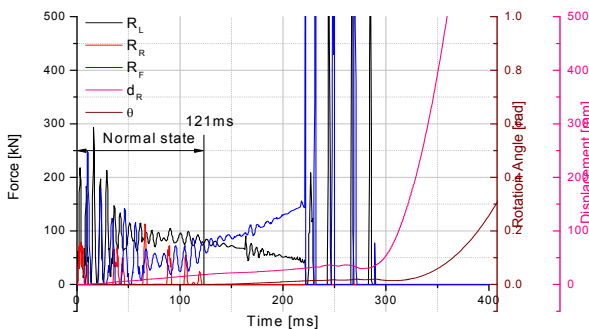


Fig. 10 Results of Recurdyn ($\alpha=30^\circ$, $\mu=0.3$)

전 접촉을 발생시키기 위해 레일 길이방향으로 윤축을 초기속도 30km/h로 굴러 시뮬레이션 하였다.

Fig. 6은 플랜지 각이 70° 이고 마찰계수가 0.2 인 경우의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 214ms에서 정상상태가 종료되고 <부록>의 탈선 조건식을 통해 판단하면 전복 탈선이 발생하였

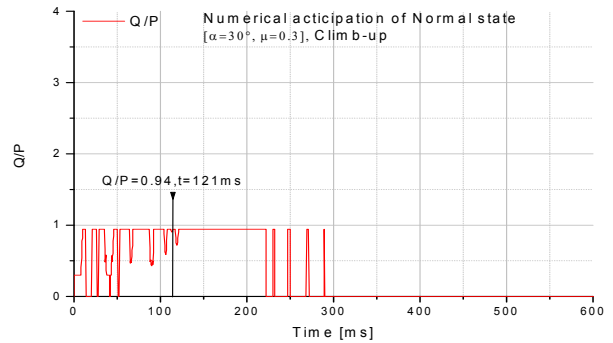


Fig. 11 Derailment coefficient ($\alpha=30^\circ$, $\mu=0.3$)

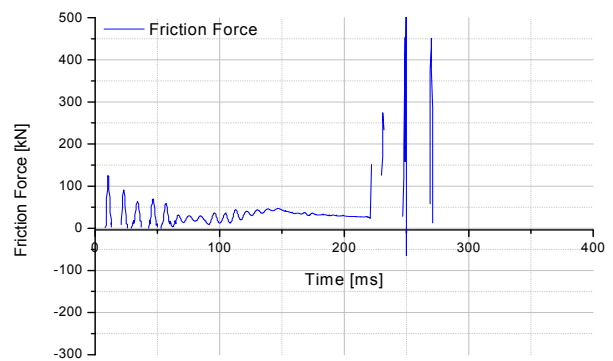


Fig. 12 Friction force of the Flange ($\alpha=30^\circ$, $\mu=0.3$)

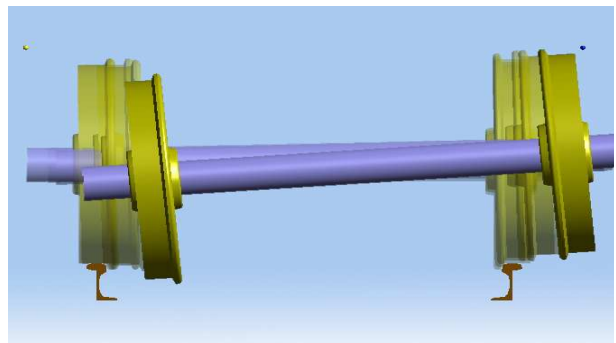


Fig. 13 Derailment behavior of the Climb-up ($\alpha=30^\circ$, $\mu=0.3$)

고, 이때 탈선계수를 구해보면 Fig. 7에서 0.91로 구해진다. 또 Fig. 8을 통하여 전복 탈선 거동을 확인할 수 있다.

Table 5는 다양한 플랜지 각과 마찰계수에 대하여 시뮬레이션 한 결과이다. Table 2의 이론적 탈선계수 값을 시뮬레이션 결과 값과 비교하였을 때 최대 오차율이 6.3%로 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이경우의 오차는 식 (6)을 유도할 때 우측 차륜-레일 접촉 부위를 한 점으로 단순화하여 모멘트를 구하였기 때문으로 판단된다.

3.2 우측 윤중이 50% 감소한 경우

우측 윤중이 50% 감소한 경우 Table 3에서 이론적으로 타고오름 탈선발생을 예측할 수 있다. Fig. 9와⁽⁹⁾ 같이 타고오름 탈선은 공격각을 10 mrad 이상 부여하였을 때 나달식의 값과 유사한 값을 구할 수 있으므로 공격각을 20 mrad을 부여한 후, 시물레이션 하였다. 공격각을 입력하게 되면 공격각에 의해 추가적인 횡력이 발생하므로 W_L , W_R , F 대신에 시물레이션 해석 후 차륜-레일 접촉부의 P와Q를 직접 읽어서 탈선발생 시점의 탈선계수를 구하였다.

Fig. 4와 같이 우측 윤중이 50% 감소된 좌우측 윤중과 횡력을 입력하고 차륜-레일 사이의 회전 접촉을 발생시키기 위해 윤중을 레일 방향으로 초기속도 30km/h로 굴러 시물레이션 하였다.

Fig. 10은 플랜지 각이 60° 이고 마찰계수가 0.3 인 경우의 시물레이션 결과를 보여주고 있다. 214ms 에서 정상상태가 종료되고 <부록>의 탈선 조건식으로 판단하면 타고오름 탈선이 발생하고, 이때 탈선계수는 Fig. 11로부터 0.94로 구해진다. Fig. 12를 보면 마찰력이 양의 방향으로 작용하여 타고오름 탈선이 발생하였고, Fig. 13에서 타고오름 탈선거동을 확인할 수 있다.

Table 6은 다양한 플랜지 각과 마찰계수에 대하여 시물레이션 한 결과이다. Table 3의 이론적 탈선계수 값과 Table 6의 시물레이션 결과 값을 비교하였을 때 거의 오차 없이 잘 일치하였다.

4. 결 론

본 논문은 단일 윤중의 탈선유형별 타고오름 탈선계수 이론모델을 제안하였고, 제안한 이론모델을 이용하여 윤중 감소와 탈선계수 관계를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 윤중에 작용하는 횡력, 좌우 윤중, 마찰계수, 휠의 반경, 궤간, 서스펜션 지지점과 휠 중심점 사이의 거리, 플랜지 각 등의 함수로 이루어진 새로운 탈선계수를 제안하였다.

(2) 새로운 타고오름 탈선계수 이론모델을 적용하여 분석한 결과, 좌우측 윤중 감소가 없는 경우는 플랜지 각이 60° 이면 나달식과 일치하지만 타고오름 탈선 발생이 어려운 플랜지 각 65°, 70°에서는 낮은 마찰계수 (0.1 또는 0.2) 조건에서 나달의 타고오름탈선 대신에 전복탈선이 발생한다.

(3) 좌측 윤중 감소가 50% 인 경우, 플랜지 각 60°, 마찰계수 0.4 조건에서만 Q/P 가 0.79이고 다른 조건에서는 0.9에서 전복 탈선이 발생한다.

(4) 또한 우측 윤중 감소가 50% 인 경우는 나달식의 결과와 정확히 일치하며 플랜지 각 70°, 마찰계수 0.3, 0.4에서 Q/P가 각각 1.34, 1.12로 규정의 탈선계수 0.8과는 상당히 큰 차이를 보인다.

(5) 따라서 열차는 우측 윤중이 감소하는 경우보다 좌측 윤중이 감소하는 경우가 더 낮은 한계탈선계수 Q/P를 나타내며, 이때 전복 탈선이 발생한다는 것을 예측 할 수 있었다.

(6) 규정의 윤중 감소 50% 허용과 허용 탈선계수 0.8은 밀접히 연계되어 있으며 제안된 타고오름 탈선계수이론에 의하여 더 이상의 윤중 감소에 대한 한계탈선계수 Q/P도 구할 수 있다. 만약 좌측 윤중 감소가 60% 발생한다면 P/Q는 0.69 이하라야 안전하다.

(7) 제안된 타고오름 탈선계수 이론모델의 예측 값이 동역학 시물레이션 해석 값과 상당히 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No.2012R1A1A2007030).

참고문헌

- (1) Korean Ministry of Construction and Transportation, 2007, "Crashworthiness Requirement for Rolling Stock Safety," MOCT Notification NO. 2007-278.
- (2) Zeng J. and Wu, P., 2008, "Study on the Wheel/rail Interaction and Derailment Safety," *Wear*, Vol. 265, No. 9-10, pp. 1452~1459.
- (3) Yang, Y. B. and Wu, Y. S., 2002, "Dynamic Stability of Trains Moving over Bridges Shaken by Earthquakes," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 258, No. 1, pp. 65~94.
- (4) Cho, H. J. and Koo, J. S., 2012, "A Numerical Study of the Derailment Caused by Collision of a Rail Vehicle Using a Virtual Testing Model," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 50, No. 1, pp. 79~108.
- (5) Koo, J. S. and Choi, S. Y., 2012, "Theoretical

Development of a Simplified Wheelset Model to Evaluate Collision-induced Derailments of Rolling Stock," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, No. 13, pp. 3172~3198.

- (6) Korean Ministry of Construction and Transportation, 2010, "Regulations Regarding Rolling Stock Safety Standard," Promulgation No. 280,
- (7) Profillidis, V. A., 2006, "Railway Management and Engineering(3rd ed.)," Ashgate, Vermont, pp. 283~288.
- (8) Shabana, A. A., Zaazaa K. E., Sugiyama H., 2007, "Railroad Vehicle Dynamics," CRC Press, New York, pp. 6~20.
- (9) Iwnicki, S., 2006, "Handbook of Railway Vehicle Dynamics," CRC Press, New York, pp. 210~217.
- (10) Eum, K. Y., Bae, J. H. and Choi, C. Y., 2011, "Evaluation of Train Running Safety During Construction of Temporary Bridge on Existing Railway," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 3, pp. 234~239.
- (11) Functionbay, Recurdyn, www.functionbay.com.

<부 록>

A. 타고오름 탈선모드와 탈선계수

단순 플랜지 형상을 가진 단일 윤축모델을 이용하여 타고오름 유형의 탈선에 관한 정상상태 (Fig. A1), Climb-up탈선 (Fig. A2), Climb&roll-over 탈선 (Fig. A3), Roll-over 탈선 (Fig. A4)로 구분하고 각각의 이론식과 탈선조건을 정리하였다.⁽⁵⁾

A1. 타고오름 탈선에서 정상상태 조건들

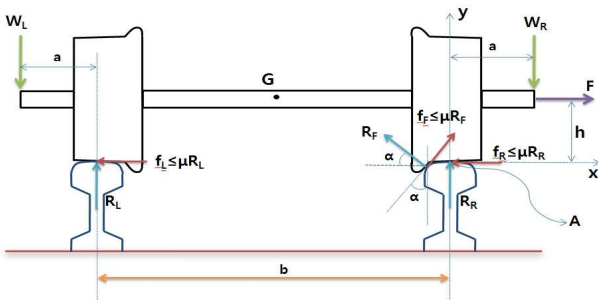


Fig. A1 Free body diagram of a wheel-climb derailment (Normal state)

$$R_L = (1 + \gamma)W_L - \gamma W_R - \beta F > 0 \tag{A1}$$

$$R_R = (1 + \gamma)W_R - \gamma W_L + \beta F - R_F(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) > 0 \tag{A2}$$

$$R_F = \frac{F - \mu(W_L + W_R)}{\cos\alpha(\mu^2 - 1) - 2\mu\sin\alpha} \geq 0 \tag{A3}$$

A2. 타고오름 탈선에서 Climb-up 조건들

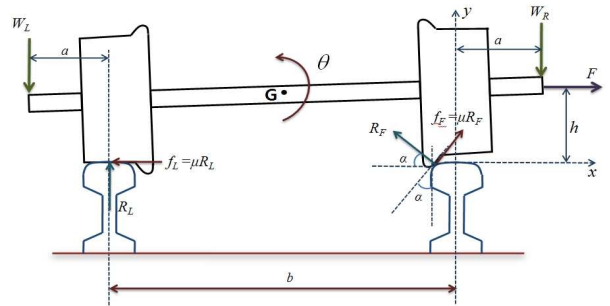


Fig. A2 Free body diagram of a wheel-climb derailment (Climb-up)

$$d_R = \iint a_R dt > 0 \tag{A4}$$

여기서,

$$a_R = \frac{1}{m_I} \left[\frac{F(\sin\alpha + \mu\cos\alpha + 2\mu\beta\sin\alpha + \mu^2\beta\cos\alpha - \beta\cos\alpha) - W_L(\mu\sin\alpha + \mu^2\cos\alpha + 2\mu\gamma\sin\alpha + \mu^2\gamma\cos\alpha - \gamma\cos\alpha) + W_R(2\mu\gamma\sin\alpha + \mu^2\gamma\cos\alpha - \cos\alpha + \mu\sin\alpha - \gamma\cos\alpha)}{m_I} \right]$$

$$m_I^* = m_I \left\{ (1 - \mu^2)\cos\alpha - 2\mu\sin\alpha \right\} + m \left\{ 1 - \frac{\cos^2\alpha}{2} + \left(\frac{\mu}{2} - \beta \right) \sin\alpha\cos\alpha - \mu\beta\cos^2\alpha \right\}$$

$$m_I = \frac{I_G\cos\alpha}{b^2} - \beta m\sin\alpha + \beta^2 m\cos\alpha - \frac{m}{4}\cos\alpha$$

$$R_L = (1 + \gamma)W_L - \gamma W_R - \beta F - a_R m_I > 0 \tag{A5}$$

$$R_F = \frac{1}{(\cos\alpha - \mu\sin\alpha)} \left[\frac{F - \mu\{(1 + \gamma)W_L - \gamma W_R - \beta F\}}{a_R \{\mu m_I - m(\sin\alpha - \beta\cos\alpha)\}} \right] > 0 \tag{A6}$$

A3. 타고오름 탈선에서 Climb/roll-over 조건들

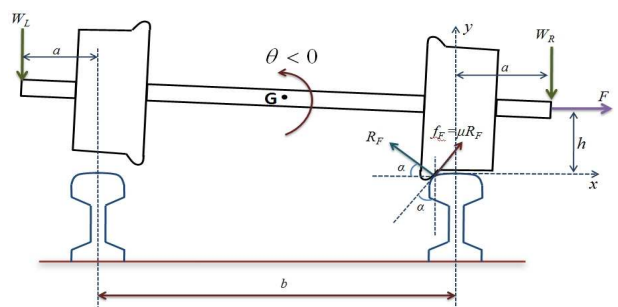


Fig. A3 Free body diagram of a wheel-climb derailment (Climb/Roll-over)

$$\theta = \iint \ddot{\theta} dt < 0 \quad (A7)$$

여기서,

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I^*} \left[\left(\gamma + \frac{1}{2} \right) (W_L - W_R) - \left\{ (W_L + W_R) \sin \alpha + F \cos \alpha \right\} \times \left\{ \beta \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha - \mu \beta \sin \alpha - \frac{\mu}{2} \cos \alpha \right\} \right]$$

$$I^* = \frac{I_G}{b} + \left(\beta \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha - \mu \beta \sin \alpha - \frac{\mu}{2} \cos \alpha \right) \times \left(h \cos \alpha - \frac{b}{2} \sin \alpha \right) m$$

$$R_F = \left[\begin{array}{l} (W_L + W_R) \sin \alpha + F \cos \alpha \\ + m \left(h \cos \alpha - \frac{b}{2} \sin \alpha \right) \ddot{\theta} \end{array} \right] > 0 \quad (A8)$$

$$d_R = \iint a_R dt > 0 \quad (A9)$$

여기서,

$$a_R = \frac{1}{m \sin \alpha} \left[F - R_f \cos \alpha + \mu R_f \sin \alpha + m h \ddot{\theta} \right]$$

$$\theta = \iint \ddot{\theta} dt < 0 \quad (A10)$$

여기서,

$$\ddot{\theta} = \frac{b}{I_A} \left[(1 + \gamma) W_L - \beta F - \gamma W_R \right],$$

$$I_A = m \left(h^2 + \frac{b^2}{4} \right) + I_G$$

$$R_F = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{(1 - \mu^2) \cos \alpha - 2\mu \sin \alpha} \times \\ \left\{ -\mu (W_L + W_R) + F + m \left(\frac{\mu b}{2} + h \right) \ddot{\theta} \right\} \end{array} \right] > 0 \quad (A11)$$

$$R_R = W_L + W_R - \left[\begin{array}{l} \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{(1 - \mu^2) \cos \alpha - 2\mu \sin \alpha} \times \\ \left\{ -\mu (W_L + W_R) + \right. \\ \left. \left\{ F + m \left(\frac{\mu b}{2} + h \right) \ddot{\theta} \right\} \right\} \end{array} \right] - m \frac{b \ddot{\theta}}{2} > 0 \quad (A12)$$

A4. 타고오름 탈선에서 Roll-over 조건들

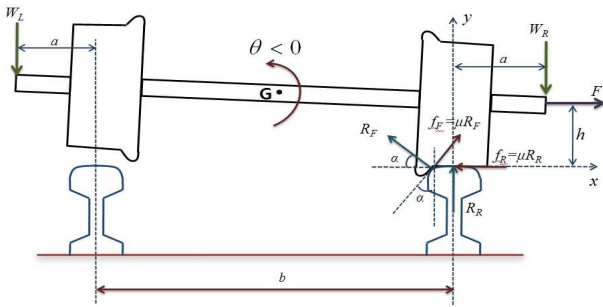


Fig. A4 Free body diagram of a wheel-climb derailment (Roll-over)