

틸팅차량 주행에 따른 기존선 궤도의 주행안정성 평가

Stability Evaluation of Track on Conventional Line According to Traveling Tilting Train

박용걸[†] · 엄기영* · 최정열** · 성덕룡***

Yong-Gul Park · Ki-Young Eum · Jung-Youl Choi · Deok-Yong Sung

Abstract A tilting train, which was developed to run the curve section without reducing the speed and compromising the riding quality, can improve the speed so as to reduce the travel time, compared to the existing trains. Then the force generated by the train operation to the track is in proportion to train operation speed, which means the track shall bear the increased force as much as the increase in train operation speed. Particularly, wheel load and lateral wheel load generated by train operation and distributed to the rail tend to cause the track to suffer the strain and furthermore the severe disaster such as derailment. To deal with such problem and ensure the train will run safety and stably, the tolerance in wheel load change, lateral wheel load and derailment coefficient was determined for quantitative evaluation of the train operation stability. In this study, derailment coefficient of inner and outer rail at existing curve section of tilting train was determined to evaluate the curve radius, possibility of acceleration and the need of rail improvement, which was then compared with the existing traditional train and high speed train. Conducting the quantitative evaluation of dynamic wheel load and lateral wheel load of each train, which was based on field survey, derailment coefficient and static & dynamic wheel load change, which serve the evaluation criteria of train operation stability, were determined for comparison with the standards, thereby analyzing the stability of the tilting train.

Keywords : Tilting train, Curve section, Train operation stability, Static & dynamic wheel load

요 지 기존선 속도향상을 위해 개발된 틸팅열차는 기존열차에 비하여 승차감의 저하 없이 곡선부를 더욱 빠르게 주행할 수 있기 때문에 전체 운행시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 주행열차에 의해 궤도에 발생하는 힘은 주행속도의 함수로 표현되므로 주행속도가 증가하는 만큼 궤도가 부담해야 할 힘의 크기도 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 틸팅차량의 기존선 곡선부 주행 시 내·외측 레일의 탈선계수를 산정하여, 곡선반경 증속 여부, 선로개량 유·무에 따른 주행안정성을 평가하였으며, 기존에 운행중인 일반열차와 고속열차의 주행안정성을 비교, 분석하였다. 연구결과, 측정대상 구간에서 측정된 동적 윤증을 이용하여 산출한 동적 윤증 감소량은 차체진동을 고려한 차량 전복에 대한 동적윤증 감소한계치를 모두 만족하는 것으로 나타나 향후 틸팅차량 투입시 대상구간에서의 윤증 감소에 따른 열차탈선의 위험은 없을 것으로 판단된다.

주요어 : 틸팅열차, 곡선부, 열차 주행안정성, 정·동적 윤증

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사

E-mail : ygpark@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6575 FAX : (02)971-6575

* 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

** 정회원, (주)대한콘솔탄트 철도부 궤도팀 사원, 공학석사

*** 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 박사과정

1. 서론

기존선 속도향상을 위해 개발된 틸팅열차는 기존열차에 비하여 승차감의 저하 없이 곡선부를 더욱 빠르게 주행할 수 있기 때문에 전체 운행시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다.

그러나 일반적으로 주행열차에 의해 궤도에 발생하는 힘은 주행속도의 함수로 표현되므로 주행속도가 증가하는 만큼 궤도가 부담해야할 힘의 크기도 증가하게 된다. 특히 곡선부의 경우, 열차의 주행속도에 따라 레일에 전달되는 윤종과 횡압 크기에 따라 궤도의 변형을 유발하는 원인이 되며, 열차 탈선과 같은 대형사고를 유발할 수 있다.

이에 대해서 열차의 주행안정성을 확보할 수 있도록 윤종 감소율, 횡압한도 및 탈선계수의 허용한계를 설정해 두어 주행 안정성을 정량적으로 평가 또는 검토하도록 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 틸팅차량의 기존선 곡선부 주행 시 내·외측 레일의 탈선계수를 산정하여, 곡선반경(R400, R600, R3000), 증속 여부, 선로개량 유·무에 따른 주행안정성을 평가하였으며, 기존에 운행중인 일반열차(무궁화)와 고속열차(KTX)의 주행안정성과 비교, 분석하였다.

현장측정을 통해 획득한 기존선 곡선부 궤도의 동적응답을 바탕으로 틸팅열차에 의해 발생하는 윤종과 횡압을 정량적으로 평가함으로써 주행안정성의 평가기준이 되는 탈선계수와 정, 동적 윤종감소율을 산정하여 기준치와의 비교 및 검토를 통하여 틸팅열차의 주행안정성을 평가하고자 한다

2. 현장측정

2.1. 측정구간의 차량 현황

측정구간을 통과하는 열차는 크게 틸팅열차(TTX), 무궁화호, 화물열차, 고속열차(KTX)로 구분되며, 틸팅차량과 유사 속도대역으로 주행하는 일반차량과의 궤도성능 비교·분석을 통해 향후 틸팅차량의 기존선 투입시 궤도에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. Fig. 1은 측정구간을 통과하는 각 차량의 제원을 나타낸 것이다.

2.2 측정구간 제원

기존선에서의 틸팅차량 및 일반차량에 의한 궤도부담력 검토를 위해 틸팅차량의 시험선 구간인 충북선(구간 A~C)과 호남선(구간 D)에서 정밀 궤도측정을 수행하였다. Table 1은 측정구간의 궤도현황을 나타낸 것이며, 전경은 Fig. 2와 같다.

2.3 윤종

윤종계이지 설치위치는 측정구간의 내·외측 레일에 Fig. 3

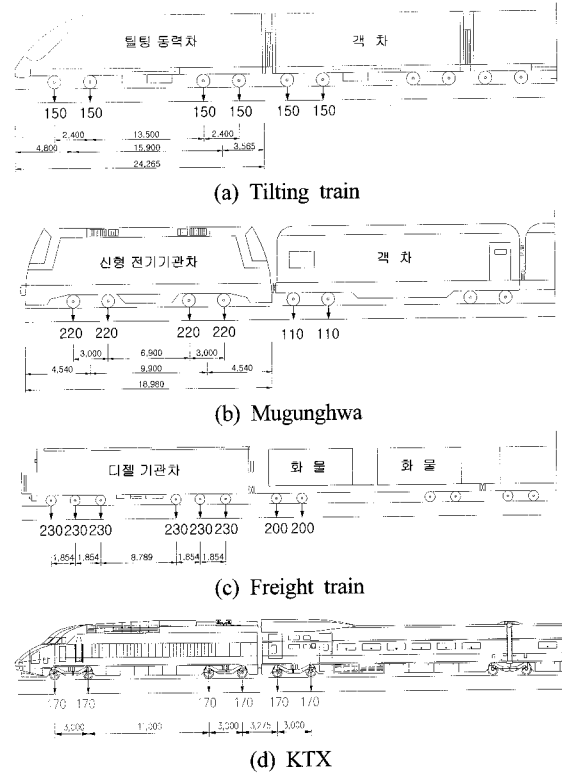


Fig. 1. Properties of measured vehicles (unit : kN, mm)

Table 1. Properties of test site

구분	충북선			호남선
	A	B	C	D
곡선반경(R)	400m	600m	600m	3,000m
레일	50kg N 정척레일	50kg N 장대레일	50kg N 정척레일	50kg N 장대레일
침목	목침목	PC침목	목침목	PC침목
체결구	스파이크	Pandrol e-clip	스파이크	Pandrol e-clip
캔트(c)	120mm	120mm	120mm	70mm

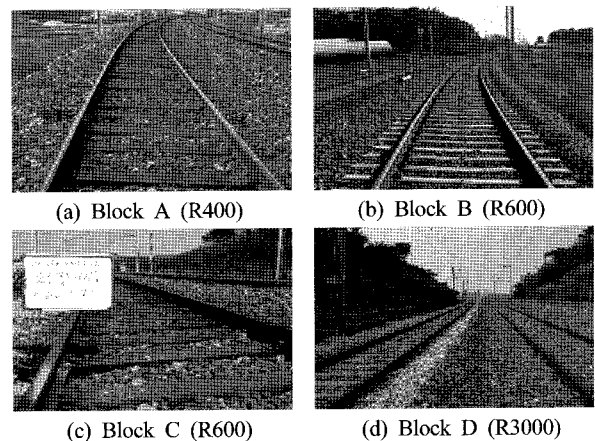


Fig. 2. View of test site

과 같이 침목간 중심에서 각각 100mm 떨어진 위치에 레일복부의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 결선된 윤중게이지를 부착하여 측정한다. 계측시 열차는 고속으로 주행하므로 실제 발생한 윤중을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생되지 않도록 충분한 수집율(Sampling Rate)을 설정하였다. 그리고 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 로패스 필터링과 하이패스 필터링 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다.

레일에 부착한 변형률 게이지를 통하여 직접 측정한 값은 윤중에 비례하여 발생하는 변형률 데이터로써 데이터 수집장비(Data Acquisition System)를 통하여 얻은 변형률을 실제 작용하는 윤중의 절대량으로 환산하기 위하여 윤중 검정(Calibration)을 수행하고 이때 얻어진 정적 윤중 데이터를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 환산윤중을 도출함으로써 하중단위의 동적 윤중값을 구한다. Fig. 3과 같이 윤중게이지를 레일에 부착하고, 유압잭을 이용하여 Fig. 4와 같이 0kN에서 40~50kN까지 정적하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생한 계측값을 기록한다. 이때 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복하였다.

Fig. 5는 재하시간 변화에 따른 내·외측 레일에 재하한 정적 작용하중(데이터 수집장치에 저장된 변형률 데이터)을 도시한 그림과 측정 변형률을 레일에 작용한 윤중으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과(예)를 나타낸다.

2.4 횡압

횡압게이지 부착위치는 곡선구간을 주행하는 열차에 의해 레일 및 궤도에 발생하는 동적횡압을 파악하기 위해 곡선구간 내·외측 레일에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 레일에 발생하는 횡압을 측정하기 위한 횡압게이지 설치전경 및 부착도는 Fig. 6과 같다.

횡압측정은 Fig. 6과 같이 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 플랜지 내·외측에 변형률 게이지를 부착하고 결선면 레일 종방향 힘의 영향을 배제시켜 전단변형률로써 측정할 수 있다. 그 위치는 레일복부와 플랜지 사이의 우각부에는 변형률 게이지가 들어가지 않으므로 될 수 있는 한 복부에 가깝게 부착한다. 윤중게이지는 레일 복부상의 중립축에 부착이 가능하기 때문에 완전한 전단변형 측정이 될 수 있지만, 횡압게이지는 중립축에 부착이 곤란하기 때문에 이와 같이 배치한다.

또한, 횡압의 경우도 동적윤중 산정과 동일한 방법으로 횡압검정 및 선형회귀분석을 통해 산출된다. Fig. 7은 횡압 검정(Calibration)을 수행하는 전경을 나타낸다.

Fig. 8은 재하시간 변화에 따른 곡선구간 내·외측 레일의

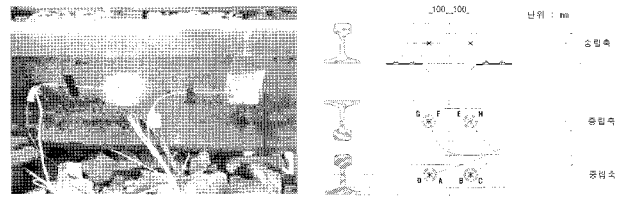


Fig. 3. Attachment of wheel load gages



Fig. 4. View of wheel load calibration

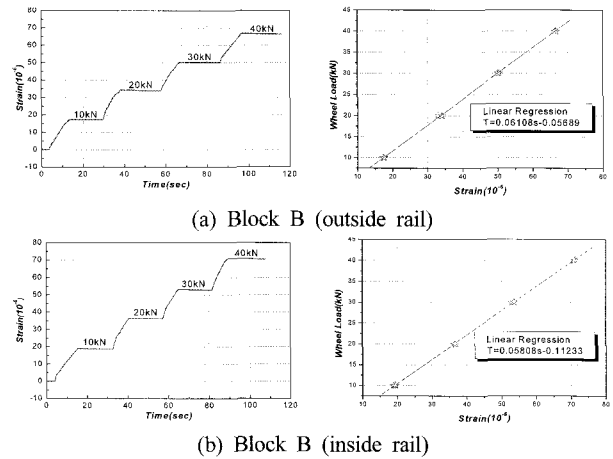


Fig. 5. Example of measured wheel load strain & linear regression result

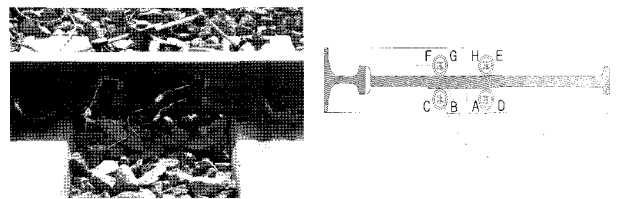


Fig. 6. Attachment of lateral wheel load gages



Fig. 7. View of lateral wheel load calibration

정적 작용하중 및 측정 변형률을 레일에 작용한 횡압으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과(예)를 나타낸다.

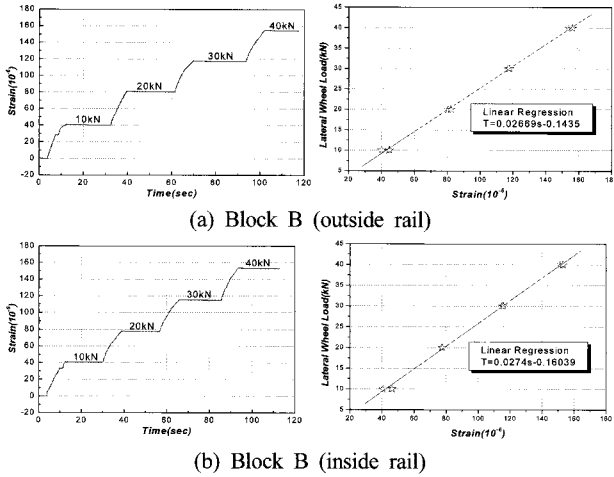


Fig. 8. Example of Measured lateral wheel load strain & linear regression result

3. 주행안정성 평가

3.1 탈선계수에 의한 주행안정성 평가

탈선이 시작될 때에 차륜은 플랜지부에서 레일과 한 점에서 접촉하면서 레일을 올라타게 된다. 이때에 차륜과 레일 간의 작용력을 Fig. 9에 나타내었다.

그림에서 Q를 횡압, P를 윤중이라고 칭하고, T_y 는 차륜의 구름접촉(Rolling contact)에 의해 발생하는 접촉력이다. 차륜의 어택각(Attack angle)이 (+)일 때, 접촉력 T_y 는 차륜이 레일을 타고 오르는 방향으로 작용하여, 이 값이 최대가 되더라도 마찰력 μN (μ : 마찰계수)을 초과하는 경우는 없다.

Fig. 9와 같은 상태에 있어서의 횡압과 윤중의 비를 구하면, 공통접평면이 수평면이 되는 각(접촉각)을 α 라고 할 때에 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - (T_y/N)}{1 + (T_y/N) \tan \alpha} \quad (1)$$

식 (1)의 Q/P 값은 윤중의 어택각이 커지고, 접촉력 T_y 가 마찰력 μN 에 달했을 때에 가장 작은 값을 취하며, 이러한 극한상태에 있어서 다음의 식을 얻을 수 있다.

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

식 (2)는 나달(Nadal)의 식으로 불리는 것으로, 올라타기 발생하는 최소의 Q/P (한계 탈선계수) 값을 구하는 데에 이용되어 왔다. Q/P는 차륜 플랜지 각이 작고 접촉면의 마찰계수가 클수록 작게 되는 것, 즉 올라타 탈선을 일으키기 쉬운 것을 알 수 있다. 일본의 JR에서는 종래부터 이 식을 토대로 차륜 플랜지 각 60° , $\mu=0.2$ 를 대입하여 얻어지는 계산치인

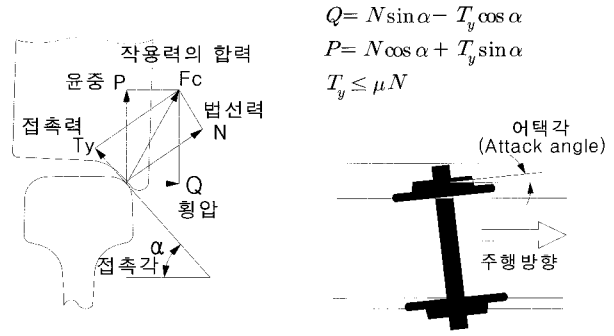


Fig. 9. Interaction force of wheel/rail contact

Table 2. Coefficient of derailment for Tilting train's axle (R600, Block A, V=60km/h)

(단위 : kN, mm)												
구 분	M _{cp}				M				T			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
외측 윤중	64.0	60.7	64.9	67.2	56.3	53.7	54.4	52.4	56.2	54.2	54.0	52.4
외측 횡압	12.5	-6.6	11.1	-6.4	14.5	-6.4	10.7	-5.2	11.5	-6.5	10.7	-6.0
탈선 계수	0.20	-0.11	0.17	-0.10	0.26	-0.12	0.20	-0.10	0.20	-0.12	0.20	-0.11
내측 윤중	65.0	67.4	71.4	70.2	63.6	64.1	63.9	64.2	57.5	64.1	64.1	60.8
내측 횡압	19.5	-3.0	22.3	-3.5	23.5	0.2	23.7	-4.9	19.8	0.4	22.5	37.0
탈선 계수	0.30	-0.04	0.31	-0.05	0.37	0.00	0.37	-0.08	0.34	0.01	0.35	0.06
구 분	T _h				M				M _{cp}			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
외측 윤중	54.5	49.6	50.1	49.6	53.8	53.8	51.9	54.2	61.3	56.4	55.0	60.3
외측 횡압	14.0	-6.0	10.4	-5.1	14.6	-6.3	9.1	-5.0	16.6	-7.3	10.0	-5.2
탈선 계수	0.26	-0.12	0.21	-0.10	0.27	-0.12	0.18	-0.09	0.27	-0.13	0.18	-0.09
내측 윤중	59.8	63.0	59.0	60.8	59.9	61.7	59.5	62.3	72.2	77.7	69.7	67.1
내측 횡압	23.0	-3.0	21.4	-3.5	22.0	22.0	-4.1	27.0	-6.6	24.4	24.5	-4.1
탈선 계수	0.38	-0.05	0.36	-0.06	0.37	0.36	-0.07	0.43	-0.09	0.31	0.35	-0.06

$Q/P=1.03$ 에 약 20%의 여유를 보아 0.8을 탈선에 대한 안전성 평가를 위한 탈선계수의 기준값으로 채용하고 있다.

본 연구에서도 탈선계수 Q/P의 기준 값으로 기준답면차륜 ($\alpha=60^\circ$)의 경우에 0.8을 적용하였다.

Table 2는 구간 A(R600)를 60km/h로 주행하는 틸팅차량의 각 차축에서 발생된 외측 레일과 내측 레일의 윤중, 횡압

측정치를 이용하여 산정한 탈선계수의 일례를 보여주고 있다.

1) 곡선반경에 따른 탈선계수 산정

곡선부를 주행하는 틸팅차량(TTX)에 의해 발생하는 내·외측 레일의 윤증과 횡압 측정데이터를 이용하여 구간 A(R400)와 구간 C(R600)에 대한 탈선계수를 산정하였으며, 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

구간 A(R400) 및 구간 C(R600) 모두 최대 외측 윤증 및 횡압이 동력차에서 발생하였으며 구간 A(R400)의 경우 최대 탈선계수는 내측 레일의 동력객차에서 0.53으로 측정되었다. 이는 임계탈선계수 0.8 보다는 작은 값이지만 대상선로의 궤도상태를 감안할 때 다소 큰 값이므로 이러한 구간에서의 속도증가는 열차주행안정성 확보를 위해 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

또한 구간 C(R600)는 구간 A(R400)에 비하여 탈선계수가 상당히 작은 것으로 나타나 주행안정성 확보에는 큰 무리가 없을 것으로 판단되나 최대 외측 윤증의 크기가 구간 A(R400)와 유사한 수준으로 나타나 곡선부 증속에 신중해야 할 것으로 판단된다. 또한 궤도상태 불량구간에서의 증속을 위해서는 대상구간에 대한 선로개량을 통한 선로안정화 작업이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

Table 3. Coefficient of derailment for radius

구 간	구간 A(R400)	구간 C(R600)	
차 종	TTX	TTX	
속 도	79km/h	76km/h	
외측윤증 (kN)	동 력 차	90.10	84.10
	동력객차	76.20	70.80
	객 차	74.90	72.20
외측횡압 (kN)	동 력 차	37.40	7.20
	동력객차	32.10	5.90
	객 차	33.40	5.90
탈선계수	동 력 차	0.42	0.09
	동력객차	0.42	0.08
	객 차	0.45	0.08
내측윤증 (kN)	동 력 차	61.90	61.30
	동력객차	52.20	54.60
	객 차	58.50	56.90
내측횡압 (kN)	동 력 차	30.90	7.20
	동력객차	27.80	6.50
	객 차	30.20	6.00
탈선계수	동 력 차	0.50	0.18
	동력객차	0.53	0.12
	객 차	0.52	0.11

2) 선로개량 유·무에 따른 탈선계수 산정

곡선부를 주행하는 틸팅차량(TTX)에 의해 발생하는 내·외측 레일의 윤증과 횡압 측정 데이터를 이용하여 선로개량 유·무에 따른 탈선계수를 산정하였으며, 그 결과를 Table 4에 정리하였다.

Table 4를 보면 선로개량 유·무와 무관하게 최대 외측 윤증 및 횡압이 동력차에서 발생하였으며 최대 탈선계수는 선로개량을 하지 않은 구간의 내측레일 동력차에서 0.18이 측정되었다.

또한 선로개량 유·무에 따른 탈선계수의 차이는 뚜렷하지 않았으나 선로개량을 하지 않은 구간의 내측 레일 동력차에서 선로개량 시행구간의 탈선계수 보다 약 2배 정도 큰 값이 산출되었다.

선로개량 유·무에 따른 뚜렷한 탈선계수 차이가 나타나지 않은 이유는 곡선부 주행속도가 비교적 낮고 틸팅차량의 운행횟수 제약으로 인해 충분한 데이터 획득을 하지 못해 정량적인 탈선계수의 비교, 검토가 용이하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

3) 틸팅차량 증속 여부 및 차량종류별 탈선계수 산정

틸팅차량의 증속 여부 및 차량종류별 탈선계수를 산정하기

Table 4. Coefficient of derailment for track improvement

구 간	구간 B(R600)	구간 C(R600)	
차 종	TTX	TTX	
속 도	78km/h	76km/h	
선로개량	시행	미시행	
외측윤증 (kN)	동 력 차	78.70	84.10
	동력객차	65.30	70.80
	객 차	66.20	72.20
외측횡압 (kN)	동 력 차	5.90	7.20
	동력객차	5.50	5.90
	객 차	5.20	5.90
탈선계수	동 력 차	0.07	0.09
	동력객차	0.08	0.08
	객 차	0.08	0.08
내측윤증 (kN)	동 력 차	62.50	61.30
	동력객차	58.20	54.60
	객 차	53.30	56.90
내측횡압 (kN)	동 력 차	5.70	7.20
	동력객차	5.70	6.50
	객 차	5.20	6.00
탈선계수	동 력 차	0.09	0.18
	동력객차	0.10	0.12
	객 차	0.10	0.11

위해 측정개소 중 유일하게 선로개량을 시행하였고, 증속 시험 운행을 실시한 곡선반경 600m인 구간 B와 곡선반경 3000m인 구간 D에서의 열차종류 및 속도별 동적 윤중과 횡압 측정데이터를 이용하여 탈선계수를 산정하였으며, 그 결과를 Table 5와 Table 6에 정리하였다.

Table 5와 같이 틸팅차량과 유사한 속도대역으로 주행한 화물열차의 경우 외측 레일에서의 탈선계수가 틸팅차량의 경우보다 약 2배 정도 크게 나타나 틸팅차량의 주행안정성은 해

당속도(60km/h)에서 비교적 양호한 것으로 분석되었으며, Table 5와 Table 6에서의 각 경우별 내외측 레일의 탈선계수가 모두 임계탈선계수 0.8에도 크게 미치지 못한 것으로 나타났다. 또한 틸팅차량 증속에 따른 탈선계수의 변화는 뚜렷하지 않으며 기존 운행열차와 유사한 수준의 탈선계수가 산출되어 대상 선로에서의 틸팅차량 투입에 따른 주행안정성 확보에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.2 윤중 감소량에 의한 평가

탈선계수가 커지면 탈선하기 시작하지만 실제 탈선사례에서는 횡압이 클 때보다 윤중 감소가 클 때에 탈선된 경우가 많다. 그래서 윤중의 감소하는 정도를 나타내는 지표로서 윤중 감소율을 정하고, 이것을 안전을 평가 방법으로써 채용하고 있다. 정적윤중 감소는 완곡선에서의 궤도의 평면성틀림, 차량재하의 편재, 곡선에서의 캔트의 과잉 등에 의해 차륜에 비교적 장시간에 걸쳐 발생하는 윤중 감소를 말하며 차체의 동요에 의해 발생하는 동적 윤중 감소와는 구별하여 안전성을 판정할 필요가 있다. 또한 동적윤중 감소는 차량의 동요 등에 의해 발생하는 비교적 단시간의 윤중 감소를 말하고 이 음매충격 등에 의해 발생하는 극히 단시간의 윤중 감소도 여기에 포함된다. 윤중 감소율은 탈선계수와 더불어 탈선에 대한 안전성을 판정하기 위한 기본적인 목표로 하고 있고 탈선계수와 윤중 감소율 모두가 목표치를 초과하는지 여부를 검토할 필요가 있다. 윤중 감소율은 좌우양륜을 가지는 한 윤축의 힘의 균형으로 정의할 수 있다. 윤축중심에 탈선을 조장하는 방향으로 횡하중 F_y 가 작용하고, 정지윤중을 $P_o = W_o / 2$ (W_o : 축중), 윤중의 정지윤중으로부터의 감소치를 $\Delta P_L = P_o - P_L$ 이라고 할 때에 탈선방향 차륜의 윤중 감소율은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 5. Coefficient of derailment for speed of tilting & vehicle types(I)

구 간		구간 B(R600)			
차 종		화 물	TTX	TTX	무궁화
속 도		63km/h	60km/h	100km/h	100km/h
외측 윤중 (kN)	동 력 차	102.40	67.10	78.80	159.50
	동력객차	-	56.20	72.20	-
	객 차	-	56.00	66.80	76.80
외측 횡압 (kN)	동 력 차	40.90	12.60	8.90	19.50
	동력객차	-	14.40	8.70	-
	객 차	-	11.50	7.80	8.90
탈선 계수	동 력 차	0.40	0.19	0.11	0.12
	동력객차	-	0.26	0.12	-
	객 차	-	0.21	0.12	0.12
내측 윤중 (kN)	동 력 차	117.20	71.40	73.50	109.00
	동력객차	-	63.70	67.50	-
	객 차	-	63.90	56.20	47.70
내측 횡압 (kN)	동 력 차	44.30	22.10	12.10	12.60
	동력객차	-	23.70	10.60	-
	객 차	-	22.50	11.80	6.90
탈선 계수	동 력 차	0.38	0.31	0.16	0.12
	동력객차	-	0.37	0.16	-
	객 차	-	0.35	0.21	0.14

Table 6. Coefficient of derailment for speed of tilting & vehicle types(II)

구 간		구간 D(R3000)					
차 종		무궁화	새마을	TTX	TTX	TTX	KTX
속 도		118 km/h	120 km/h	125 km/h	136 km/h	150 km/h	154 km/h
외측 레일 탈선 계수	동 력 차	0.22	0.20	0.20	0.21	0.19	0.22
	동력객차	-	-	0.22	0.21	0.19	0.23
	객 차	0.25	0.23	0.23	0.22	0.22	0.25
내측 레일 탈선 계수	동 력 차	0.14	0.15	0.19	0.20	0.27	0.30
	동력객차	-	-	0.20	0.21	0.26	0.29
	객 차	0.17	0.18	0.21	0.21	0.27	0.28

$$\frac{\Delta P_L}{P_o} = \frac{\lambda_L - \lambda_R}{\lambda_L + \lambda_R} - \frac{F_y}{P_o} \times \frac{1}{\lambda_L + \lambda_R} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\tan \alpha_L - \mu_L}{1 + \mu_L \tan \alpha_L}, \quad \lambda_R = \frac{\tan \alpha_R + \mu_R}{1 - \mu_R \tan \alpha_R} \quad (4)$$

λ_L 과 λ_R 의 한계치는 식 (4)에서 구할 수 있다. 윤중 감소율은 횡하중이 없는 경우($F_y=0$)의 기본단면을 가정하여 $\alpha_L = 60^\circ$, $\tan \alpha_R = 1/20$ 이라고 하면, 차륜/레일 간 마찰계수 $\mu = 0.2$ 일 때에 $\Delta P_L / P_o$ 의 한계치가 약 0.64가 된다는 점에서 0.6(60%)을 정적인 경우의 목표치로 하고 있다. 마찰계수의 가정이나 횡하중이 없다고 가정한 경우에도 반드시 여유가 있는 값은 아니지만, 안전성 확보 면에서 탈선계수와 함께 병용되어 오고 있다. 또한 일반적인 주행시험에서 관측되는 동적인 윤중 감소에 대해서는 실제 현상을 감안하여 종래부터

의 실적이 있는 0.8(80%)이 이용되고 있다. 본 연구에서는 캔트 체감에 의한 정적윤중 감소율의 기준값으로서 0.6을, 차체 진동을 고려한 차량전복에 대한 동적윤중 감소율의 기준값으로서 0.8을 적용하였다. 식 (5)와 식 (6)은 이러한 감소 한계치를 나타낸다.

$$\frac{W_0}{2} - P_{st} \geq \frac{W_0}{2} \times 0.6 \quad (5)$$

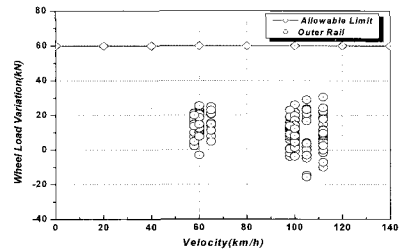
$$\frac{W_0}{2} - P_{dy} \geq \frac{W_0}{2} \times 0.8 \quad (6)$$

여기서,

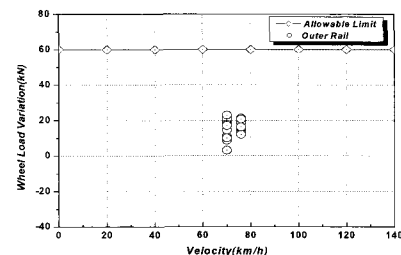
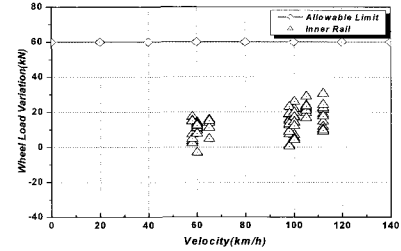
W_0 : 축중(kN), P_{st} : 정적 윤중(kN), P_{dy} : 동적 윤중(kN)

식 (5)와 식 (6)에 의하면 틸팅열차의 경우 축중이 150kN이므로 정적윤중 감소 한계치는 45kN, 동적윤중 감소 한계치는 60kN이 된다. Fig. 10은 곡선부를 주행하는 틸팅차량에 의해 발생하는 내·외측 레일의 윤중측정 데이터를 이용하여 차체 진동을 고려한 차량 전복에 대한 안정성 판단기준인 동적윤중 감소량 산정 결과를 나타낸 것이다.

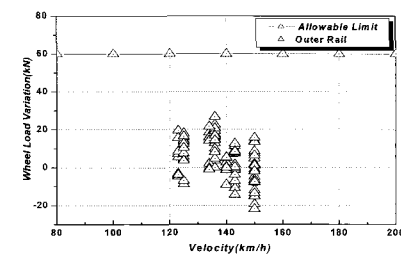
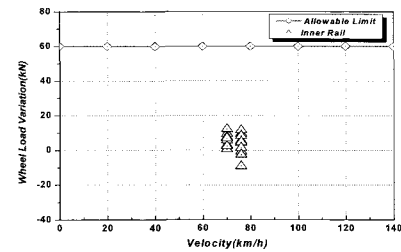
Fig. 11은 구간별, 속도별 동적 윤중 감소량 중 최대 값만을 따로 정리한 것으로서 측정대상 구간에서 측정된 동적윤중을 이용한 동적 윤중 감소량은 차체진동을 고려한 차량 전복에 대한 동적 윤중 감소한계치(60kN)를 모두 만족하는 것으로 나타나 향후 틸팅차량 투입시 대상구간에서의 윤중 감소에 따른 열차탈선의 위험은 없을 것으로 판단된다.



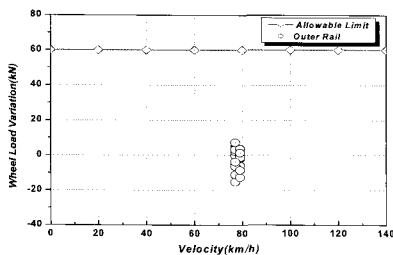
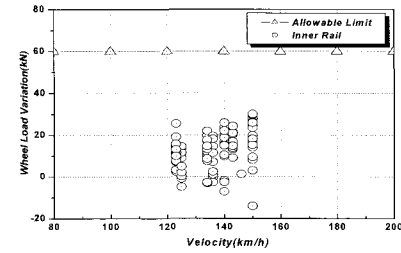
(b) Block B (R=600)



(c) Block C (R=600)



(d) Block D (R=3000)



(a) Block A (R=400)

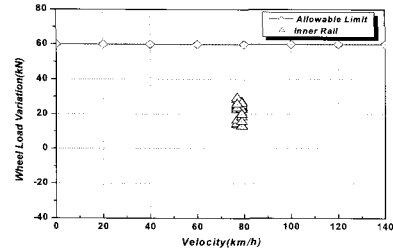


Fig. 10. Result of wheel load variation(I)

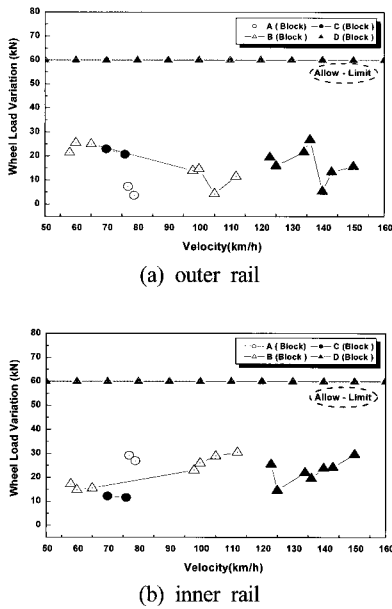


Fig. 11. Result of wheel load variation(II)

4. 결론

본 연구에서는 틸팅차량의 기존선 곡선부 주행 시 내·외측 레일의 탈선계수를 산정하여 곡선반경, 증속 여부, 선로개량 유무에 따른 주행안정성을 평가하였으며, 기존에 운행중인 일반열차와의 주행안정성을 비교, 분석하였다.

- (1) R400 구간 및 R600 구간 모두 최대 외측 윤중 및 횡압이 동력차에서 발생하였으며, R400의 경우 최대 탈선계수는 내측 레일의 동력객차에서 0.53으로 측정되었다. 이는 임계탈선계수 0.8 보다는 작은 값이지만 대상선로의 궤도상태를 감안할 때 다소 큰 값이므로 이러한 구간에서의 속도증가는 열차주행안정성 확보를 위해 신중을 기해야 할 것으로 판단된다. 또한 R600 구간은 R400 구간에 비하여 탈선계수가 상당히 작은 것으로 나타나 주행안정성 확보에는 큰 무리가 없을 것으로 판단되나 최대 외측 윤중의 크기가 R400 구간과 유사한 수준으로 나타나 곡선부 증속에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.
- (2) 선로개량 유·무와 무관하게 최대 외측 윤중 및 횡압이 동력차에서 발생하였으며 최대 탈선계수는 선로개량을 하지 않은 구간의 내측레일 동력차에서 0.18이 측정되었다. 또한, 선로개량 유·무에 따른 탈선계수의 차이는 뚜렷하지 않았으나 선로개량을 하지 않은 구간의 내측 레일 동력차에서 선로개량 시행구간의 탈선계수 보다 약 2배 정도 큰 값이 산출되었다. 선로개량 유·무에 따른 뚜렷한

탈선계수 차이가 나타나지 않은 이유는 곡선부 주행속도가 비교적 낮고 틸팅차량의 운행횟수 제약으로 충분한 데이터 획득을 하지 못해 정량적인 탈선계수의 비교, 검토가 용이하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

- (3) 선로개량을 시행한 구간의 경우 틸팅차량과 유사한 속도대역으로 주행한 화물열차의 외측 레일 탈선계수가 틸팅차량의 경우보다 약 2배 정도 크게 나타나 틸팅차량은 해당속도(60km/h)에서 비교적 안정적인 것으로 분석되었으며, 임계탈선계수 0.8에도 만족하였다.
- (4) 측정대상 구간에서 측정된 동적 윤중을 이용하여 산출한 동적 윤중 감소량은 차체진동을 고려한 차량 전복에 대한 동적윤중 감소한계치를 모두 만족하는 것으로 나타나 향후 틸팅차량 투입시 대상구간에서의 윤중 감소에 따른 열차탈선의 위험은 없을 것으로 판단된다.

5. 향후 연구과제

보다 많은 측정개소에서 충분한 데이터를 획득하여 기존선의 궤도 상태를 정량적으로 파악하고 틸팅차량 주행에 따른 궤도의 거동한계기준을 수립하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 건설교통부의 건설교통기술연구개발 사업의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국전산구조공학회 논문집, 고속철도 교량의 동특성 해석을 위한 준3차원 차량/궤도/교량 상호작용 해석기법 개발, 제16권 제2호, pp.141-151.
2. 한국철도기술연구원, 2003, 기존선 궤도의 충격계수 산정에 관한 연구.
3. 서사범, 최신철도선로(Modern Railway Track), 도서출판BG북갤러리, 2003.
4. Japan, 三浦中, 1995 궤도구조의 동특성의 구축 RTRI Report Vol.9, No.12,
5. 박용걸 외, 2006, 자갈도상궤도의 동적거동에 관한 연구, 한국철도학회 논문집. Vol.9 No.4.
6. 박용걸 외, 2006, 지하철 자갈도상 궤도의 충격계수 평가, 한국철도학회 논문집, Vol.9, No.6.

(2007년 10월 10일 논문접수, 2007년 11월 23일 심사완료)