

# 틸팅열차의 주행거동과 방향틀림에 대한 수치해석적 고찰

## Characteristics of the Running behavior for Tilting train due to Alignment based on Numerical analysis

임윤식\*      최일윤†  
Yun-Sik Lim      Il-Yoon Choi

### ABSTRACT

Vehicle dynamic behavior should be investigated to establish the track irregularity criteria because they have an impact on vehicle dynamic behavior. The tilting train which have been developed in Korea will be operated on the conventional line. Therefore, it should be checked that the track irregularity criteria of conventional line is still available for the new vehicle. In this paper, the influence of alignment on running behavior and safety for tilting train was instigated by numerical analysis. The wavelength and amplitude of alignment were considered in scenario of this numerical analysis. This research is based on just numerical analysis and the final result which include measurement will be published in the future.

### 1. 서 론

궤도틀림은 차량의 주행안전성 및 승차감에 영향을 미치는 주요 영향인자이며, 궤도틀림 허용기준치는 궤도유지보수 비용 즉 경제성과 매우 밀접한 관계가 있다. 최근 개발된 틸팅차량은 일반철도 노선의 상업운행에 투입을 준비중이며, 일반철도의 궤도틀림 허용기준이 틸팅열차 주행안전성과 승차감에 적합한지 여부를 검토가 필요하다. 본 논문에서는 고저틀림, 방향틀림, 비틀림, 수평, 궤간 등 궤도틀림 중에서 방향틀림이 틸팅열차의 주행안전성에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 조사하였다. 수치해석에서는 방향틀림의 과장 및 진폭을 다양하게 변화시켜 그 영향을 검토하였다. 본 연구는 고속검측차 특성을 고려한 궤도 검측결과 분석연구[1] 수치해석의 방법을 기초로 하여 수행되었으며, 본 연구의 결과는 수치해석 결과만을 바탕으로 하였다. 현장계측 결과를 반영한 최종 연구성과는 추후에 발표할 예정이다.

### 2. 수치해석방법 및 해석시나리오

방향틀림 영향분석을 위한 수치해석은 철도차량 동특성 해석 상용프로그램인 VAMPIRE 프로그램을 이용하였으며, 틸팅차량 1량 편성의 180km/h 주행에 대하여 수치해석을 수행하였다. 전체 해석구간은 500m로 하였으며, 50m지점부터 방향틀림에 평균이 zero이고 표준편차가 0.02인 백색잡음을 추가하였다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 신교통인프라연구실, 선임연구원  
E-mail : iychoi@krri.re.kr  
TEL : (031)460-5347 FAX : (031)460-5032

\* 한국철도기술연구원, 신교통인프라연구실, 연구원

100m지점부터 방향틀림의 모델링은 반과장의 궤도틀림을 갖는 것으로 하였으며, 방향틀림의 진폭 및 과장의 크기를 다음 표1과 표2에 나타내었고, 그림1과 같이 모델링하였다. 또한, 방향틀림이 단독으로 존재하지 않고 반복적으로 발생하는 경우에는 차량의 거동에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 방향틀림의 형상을 반과장 뿐만 아니라 주기과장에 대해서도 해석을 수행하였다.

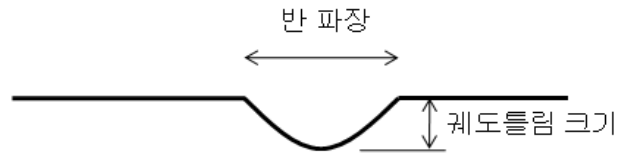


그림 1 방향틀림의 모델링 방법

표 1 방향틀림 해석시나리오 반주기 과형

과장(m)	궤도틀림 크기(mm)						
	7*	8*	9*	10*	12*	14*	16*
1.2	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
2.4	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
3.6	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
4.8	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
6	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
8	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
10	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
12	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
15	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
20	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
25	7.74	8.85	9.96	11.06	13.27	15.49	17.70
30	9.33	10.67	12.00	13.33	16.00	18.67	21.33
40	14.00	16.00	18.00	20.00	24.00	28.00	32.00
50	20.29	23.19	26.09	28.99	34.78	40.58	46.38
70	37.23	42.55	47.87	53.19	63.83	74.47	85.11
100	73.68	84.21	94.74	105.26	126.32	147.37	168.42

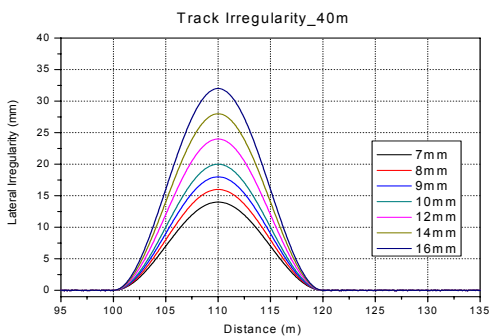
주) 상기 표에서 “\*”는 10m 대칭현을 갖는 검측차에서 검측되는 궤도틀림값을 의미하며, 각 column의 과장별 궤도틀림 값은 10m 대칭현 검측차로 측정하는 경우 동일한 검측값을 갖게 된다.

표 2 방향틀림 해석시나리오 주기 파형

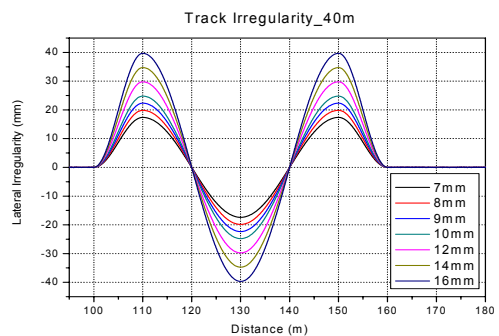
과장(m)	궤도틀림 크기(mm)						
	7*	8*	9*	10*	12*	14*	16*
1.2	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
2.4	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
3.6	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
4.8	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
6	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
8	4.67	5.33	6.00	6.67	8.00	9.33	10.67
10	3.50	4.00	4.50	5.00	6.00	7.00	8.00
12	3.75	4.29	4.82	5.36	6.43	7.50	8.57
15	4.67	5.33	6.00	6.67	8.00	9.33	10.67
20	7.00	8.00	9.00	10.00	12.00	14.00	16.00
25	8.66	9.90	11.14	12.38	14.85	17.33	19.80
30	11.20	12.80	14.40	16.00	19.20	22.40	25.60
40	17.37	19.85	22.33	24.81	29.78	34.74	39.70
50	25.00	28.57	32.14	35.71	42.86	50.00	57.14
70	44.03	50.31	56.60	62.89	75.47	88.05	100.63
100	82.35	94.12	105.88	117.65	141.18	164.71	188.24

주) 상기 표에서 “\*”는 10m 대칭현을 갖는 검측차에서 검측되는 궤도틀림값을 의미하며, 각 column의 과장별 궤도틀림 값은 10m 대칭현 검측차로 측정하는 경우 동일한 검측값을 갖게 된다.

해석에 고려한 과장은 1.2m 과장의 단과장 영역에서부터 100m 과장의 장과장 영역을 포함하였으며, 방향틀림 크기는 10m 현정시법 검측차에서 측정되는 값을 기준으로 각 과장대역에서의 실제 방향틀림 크기를 환산하여 Vampire 입력파일을 작성하였다. 해석시나리오를 나타낸 표 1과 표2에서 40m 반과장과 주기 파장의 예를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2에서 범례에 표시된 값은 검측차에서 검측치를, 그래프의 Y축의 값은 실제 궤도에서 발생하는 과장별 실제 궤도틀림 크기 값을 의미한다. 즉, 40m 과장을 갖는 반과장 궤도틀림을 10m대칭 현정시법 검측차로 검측하게 되면, 실제값의 1/2로 검측된다.



(a) 반주기 방향틀림\_40m과장



(b) 반복주기 방향틀림\_40m과장

그림 2 방향틀림 모델링 예 (40m과장)

### 3. 수치해석 결과분석

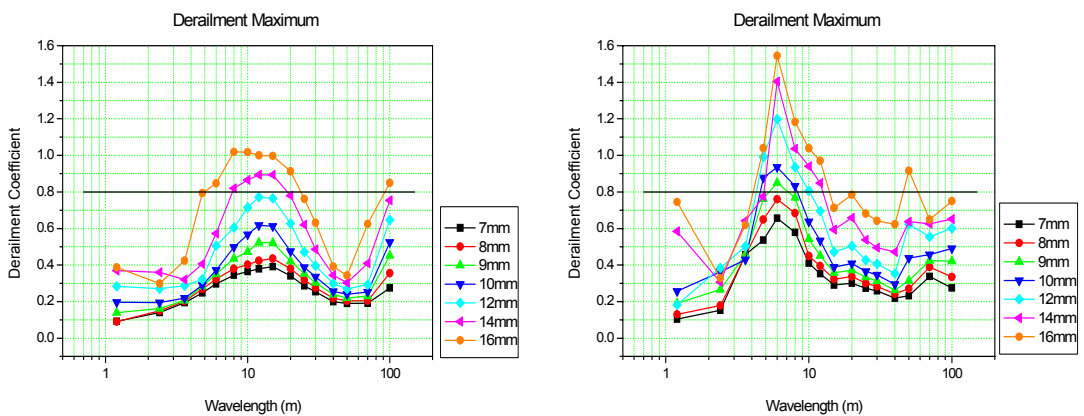
차량의 주행안전성과 승차감과 관련하여 UIC518[2] 기준에 Normal Method와 Simplified Method으로 허용기준치가 제시되어 있다. 엄밀한 의미에서 UIC518[2] 은 차량의 승인조건으로 사용되는 기준이나, 국내에는 궤도틀림 허용기준 설정과 관련된 안전 및 승차감기준이 없는 상황이므로 UIC518[2] 기준을 준용하였다. 수치해석결과는 UIC518[2] 에 제시된 기준에 따라 다음 표 3과 같이 탈선계수, 횡압, 대차 횡가속도, 차체 횡가속도, 차체 수직가속도 및 차체수평가속도에 대하여 각각 항목별로 신호처리를 수행하였다.

표 3 신호처리방법 및 관련 기준[2]

UIC 518 기준	허용기준	해석결과에 적용된 신호처리방법
탈선계수	0.8	2m이상 이동평균
횡압	57kN	2m이상 이동평균
대차 횡가속도	11m/s <sup>2</sup>	10Hz 저역통과(LP) 필터링
차체 횡가속도	3.0m/s <sup>2</sup>	10Hz 저역통과(LP) 필터링
차체 수직가속도	2.5m/s <sup>2</sup>	10Hz 저역통과(LP) 필터링

#### (1) 탈선계수

탈선계수를 살펴보면, UIC518[2] 기준에는 20Hz 이상의 Low Pass Filter와 2m 이상의 이동평균 값을 사용하도록 규정되어 있다. 본 연구결과에서는 보다 안전측의 결과를 제시하기 위하여 수치해석결과에 대한 필터링은 수행하지 않았으며, 2m 이동평균의 값을 전체 구간에 대해 구하였다. 또한, 각 차륜별로 이동평균치의 최대값을 구한 후, 이들 차륜에서 최대치를 추출하여 다음 그림에 나타내었다. 그림에서 X축은 궤도틀림의 파장, Y축은 탈선계수를 의미하며, 굵은 선으로 표시한 0.8의 값은 허용기준치를 나타낸다. 범례에 나타난 7mm~16mm의 값은 현장의 궤도에 발생한 진폭이 아니라, 10m현정시법 검측 차에 의하여 측정된 실제 방향틀림 값을 의미함에 주의할 필요가 있다.



(a) 반과장

(b) 반복 궤도틀림

그림 3 방향틀림이 탈선계수에 미치는 영향

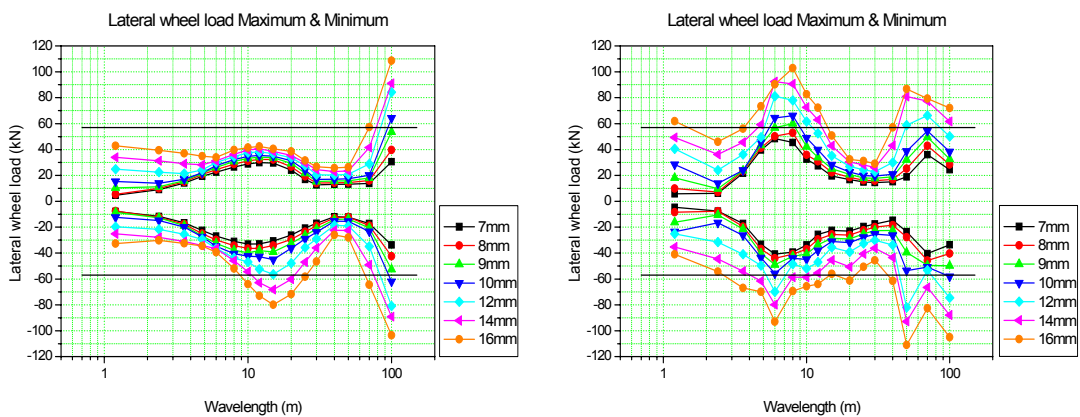
반과장 방향틀림 경우에 대한 해석결과인 그림 3(a)에서는 해석시 고려한 전체 과장대역에서 10m현정 시법 검측기준 12mm까지 관련 허용기준을 만족하였다. 과장대역별로 보면 약 10~20m 과장대역에서 탈선계수의 값이 비교적 크고, 40~50m 과장대역에서는 탈선계수가 감소하는 현상을 보였다.

방향틀림이 반복하여 존재하는 경우의 해석결과인 그림 3(b)에서는 방향틀림이 단독으로 존재하는 경우보다 탈선계수의 값이 다소 증가함을 알 수 있었다. 이는 방향틀림이 단독으로 존재하지 않고 반복적으로 발생하는 경우에는 차량의 거동에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 반복틀림효과 영향에 의한 것으로 판단된다. 탈선계수 허용기준인 0.8에서는 방향틀림 크기 8mm까지 허용기준을 만족하였고, 과장대역별로는 5~10m 영역에서 탈선계수가 크게 증가한 것으로 나타났다.

결과를 종합해 보면 탈선계수의 값은 비교적 높게 나타났고, 이는 방향틀림이 승차감 및 주행안전성과 상관성이 다소 높으며 방향틀림 허용기준을 엄격하게 관리하여야 할 필요가 있음을 시사한다.

## (2) 궤도 횡압

궤도 횡압의 경우도 탈선계수와 마찬가지로 UIC518[2] 기준에는 20Hz 이상의 Low Pass Filter와 2m 이상의 이동평균 값을 사용하도록 규정되어 있으나, 안전측의 결과를 제시하기 위하여 수치해석결과에 대한 필터링은 수행하지 않았으며, 2m 이동평균의 값을 전체 구간에 대해 구하여 그림 4에 나타내었다.



(a) 반과장

(b) 반복 궤도틀림

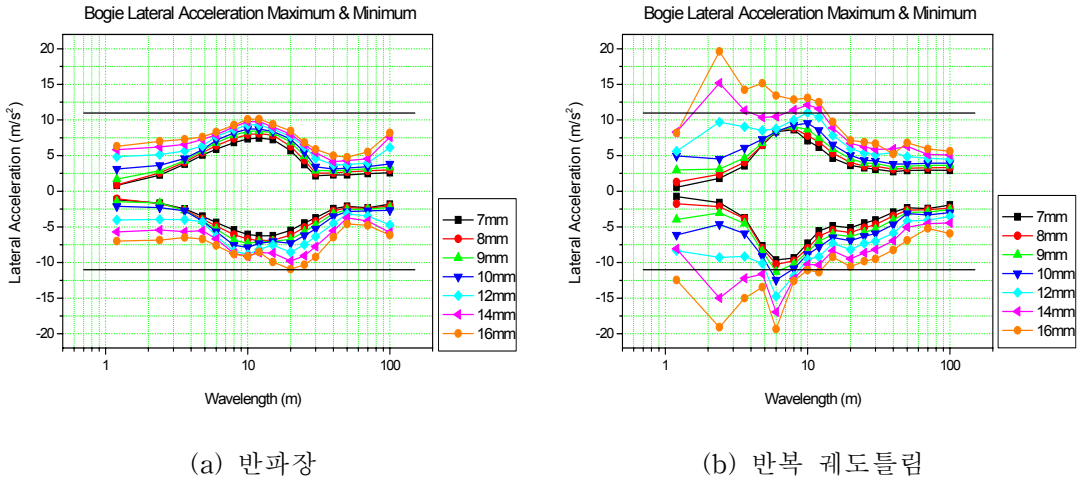
그림 4 방향틀림이 궤도 횡압에 미치는 영향

반과장 방향틀림에서는 10~20m의 단과장영역에서 상대적으로 궤도 횡압이 크게 나타났으며, 40~50m 과장대역에서의 궤도 횡압이 감소하였다. 특히, 100m 장과장영역에서의 궤도 횡압이 크게 증가하였다. 100m 장과장을 제외하고는 10m 현정시법 검측치 기준으로 방향틀림 12mm 범위에서는 궤도 횡압 허용기준을 만족하였다.

한편, 방향틀림이 반복되어 나타나는 경우의 궤도 횡압은 반과장 방향틀림이 단독으로 존재하는 경우보다 다소 큰 값을 보이고 있다. 과장대역별 효과를 살펴보면, 5~10m 영역의 과장대역에서 궤도 횡압이 증가하였으며, 특히 50m와 100m 과장에서 궤도 횡압이 크게 나타났다. 과장대역별 궤도 횡압의 분포 특성은 반과장과는 다소 상이한 특성을 보이고 있다. 10m 현정시법 검측치 기준으로 방향틀림 크기 8mm까지 허용기준을 만족하였고, 6~8m 과장대역으로 제외한 영역에서는 약 10mm 크기까지 허용기준을 만족하고 있다.

### (3) 대차 횡가속도

횡방향 대차가속도의 수치해석결과에 대하여 10Hz Lowpass의 신호처리를 수행한 후, 방향틀림 파장별/크기별 각 대차의 횡방향 대차가속도의 최대치와 최소치를 추출하여 그림 5에 정리하였다.



(a) 반파장

(b) 반복 궤도틀림

그림 5 방향틀림이 대차 횡가속도에 미치는 영향

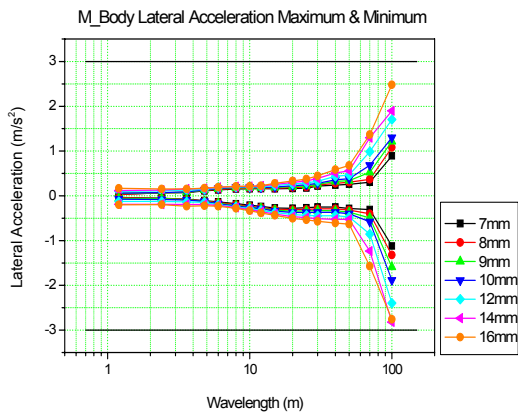
방향틀림의 파장과 진폭이 대차 횡가속도에 미치는 영향을 살펴보면, 8~20m 파장대역에서의 반파장 방향틀림이 대차 횡가속도에 미치는 영향이 상대적으로 크게 나타났지만, 반파장 방향틀림의 경우에는 수치해석을 수행한 모든 해석시나리오에서 허용기준을 만족하였다.

한편, 반복 방향틀림에 의한 대차 횡가속도 분포 특성을 살펴보면, 약 20m 이내의 파장대역에서 대차 횡가속도의 값이 증가하였으며 20m 이상의 파장대역에서는 점차 대차 횡가속도가 감소하였다. 10m 현정시법 검측치 기준으로 8mm이내에서는 모든 파장대역에서 관련 허용기준을 만족하였으며, 6m 파장의 경우를 제외한다면 10mm까지 허용기준 이내에 분포하였다.

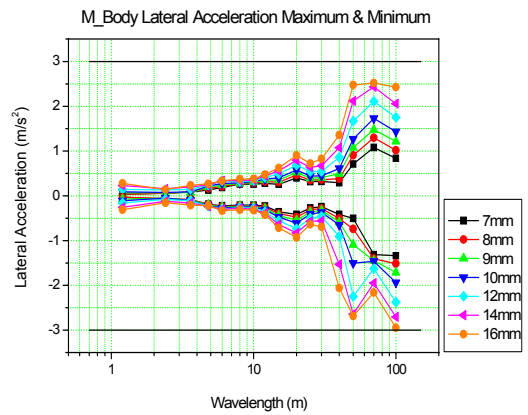
### (4) 차체 횡가속도

차체 횡가속도의 수치해석결과에 대하여 10Hz Lowpass의 신호처리를 수행한 후 방향틀림 파장별/크기별 차체횡가속도의 최대치 및 최소치를 그림 6에 정리하였다. 반파장 방향틀림에 따른 차체 횡가속도의 최대치/최소치는 주행안전 관련 허용기준을 모두 만족하고 있으며, 100m 장파장대역에서의 응답이 증가하는 경향을 보였다.

한편, 반복 방향틀림에 따른 차체의 횡가속도는 반파장의 경우 보다 다소 증가하였으나, 모든 파장대역에서 허용기준을 만족하였다.



(a) 반과장



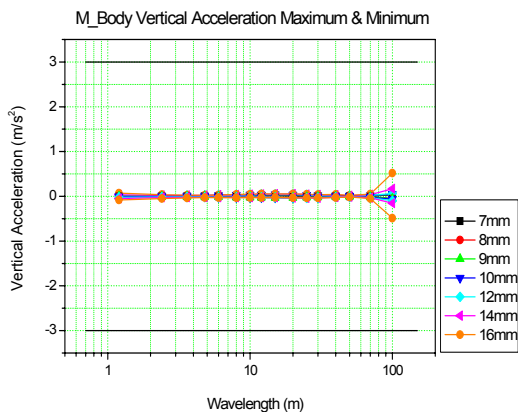
(b) 반복 궤도틀림

그림 6 방향틀림이 차체 횡가속도에 미치는 영향

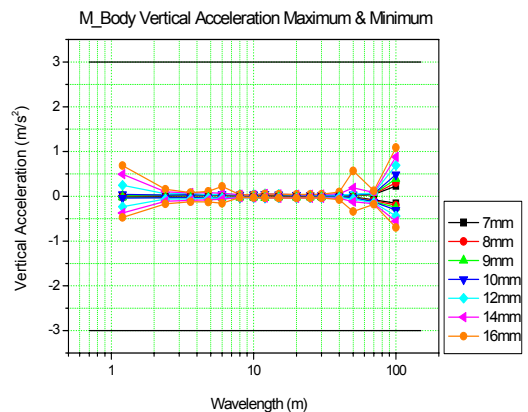
(5) 차체 수직가속도

차체 수직가속도의 수치해석결과를 10Hz의 Lowpass의 신호처리를 수행한 후 방향틀림 과장별/크기별 차체수직가속도의 최대치 및 최소치를 다음 그림 7에 나타내었다.

탈선계수, 궤도횡압, 대차횡가속도 및 차체횡가속도의 경우와는 달리 차체 수직가속도는 방향틀림의 영향이 상대적으로 매우 작은 것으로 평가되었다. 반과장 및 반복 방향틀림의 모든 해석시나리오에서 차체 수직가속도는 허용기준 보다 상당히 작은 값을 보였다. 따라서, 방향틀림 기준설정 단계에서 차체 수직가속도에 대한 검토는 큰 의미가 없을 것으로 판단된다.



(a) 반과장



(b) 반복 궤도틀림

그림 7 방향틀림이 차체 수직가속도에 미치는 영향

#### 4. 결 론

틸팅차량의 일반철도 구간에서의 영업운행에 대비한 해당 노선의 궤도틀림 유지관리 허용기준을 마련하고자 수치해석을 수행하여 방향틀림과 차량거동과의 상관성을 분석하였다.

방향틀림 허용기준을 산정하기 위해서는 궤도틀림의 파장과 진폭이 차량의 주행안전성과 승차감에 미치는 영향을 파악하여야 한다. 방향틀림의 경우, 현정시법 검측원리를 이용하고 있는 국내 현황을 고려하여 수치해석시나리오를 작성하였다. 즉, 파장별 방향틀림의 크기를 궤도에서 발생한 값을 기준으로 하지 않고, 궤도틀림 검측차량에서 검측되는 값을 기준으로 해석시나리오를 작성하여 수치해석을 수행하였다.

현장에서 발생 가능한 방향틀림을 반과장으로 가정한다면, 방향틀림은 10m현정시법 기준으로 12mm까지는 주행안전기준을 만족하는 것으로 평가되었다. 그러나, 방향틀림이 반복적으로 존재하는 경우에 대한 수치해석결과에 의하면 모든 대역에서 허용기준을 만족하기 위해서는 10m현정시법 기준으로 방향틀림이 8mm이내가 되어야 한다. 4.8~8m의 일부 파장대역을 제외하고는 방향틀림이 약 10mm에서도 관련 허용기준을 만족하고 있다.

방향틀림은 차체수직가속도를 제외한 탈선계수, 차체횡가속도, 대차 횡가속도 및 궤도횡압에 많은 영향을 미치고 있었다. 즉, 방향틀림은 틸팅열차의 주행안전성과 매우 밀접한 관련이 있는 중요 인자로 평가되었으며, 방향틀림 허용기준을 엄격하게 관리하여야 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 고저틀림과 방향틀림 허용기준을 같은 값으로 설정하여 관리하고 있는 현행의 기준은 비합리적인 것으로 판단되며, 향후 합리적 개선방안 마련이 요구된다.

다만, 본 연구는 수치해석에 의한 잠정적인 결론임을 상기할 필요가 있으며, 최종결과는 향후 틸팅차량 주행시험결과 등을 추가적으로 검토하여 제시할 예정이다.

#### 참고문헌

1. 고속검측차 특성을 고려한 궤도 검측결과 분석연구, 한국철도시설공단, 2010
2. UIC CODE 518, Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality, 2005