

기존선의 선형조건을 고려한 틸팅차량의 허용속도 평가

Allowable Speed of Tilting Car in the Conventional Line

유영화¹, 엄주환¹, 엄기영²

Young-Hwa You, Ju-Hwan Um, Ki-Young Eum

Keywords : Tilting Car(틸팅차량), Conventional Line(기존선), Gravitational Center(중력중심), Cant(켄트)

Abstract

A quantitative analysis on the amounts of cant and lateral displacement of gravitational center due to the introduction of high-speed tilting car was carried out, based on the current alignment of the conventional line. In addition, the maximum allowable speed in curve and the level of improvement in maximum speed of tilting car were evaluated through the comparison with the maximum speed of locomotive. It was found that the tilting car produces an equivalent amount of cant, which corresponds to 47.5 % of current actual cant. This effect could be explained by the fact that 1.34 m, which is the height of gravitational center of tilting car from the rail level, is much lower than that of locomotive and thus guarantees much higher level of safety in curve. The equivalent amount of cant due to the lateral displacement of gravitational center followed by tilting in curve was 2.4 mm. It was small but not enough to be neglected and must be included in calculating the maximum speed in curve. It could be concluded that the 15 % speed-up of the conventional line is reasonable under the current condition of alignment.

1. 서론

철도는 대중교통수단으로 가장 일찍이 개발되어 근대산업의 발전에 기여해 왔다. 그러나 20세기 중반이후부터는 자동차와 항공 산업의 발달로 이 분야에 대한 투자가 집중되면서 상대적으로 철도시설은 낙후되는 등의 정체화의 길을 걷고 있는 실정이다. 현재에 이르러서는 산업의 고도화 및 분업화로 인한 교통수요의 급속한 증가와 다양화로 대량수송, 고속성, 안전성, 정시성, 에너지 효율성 및 환경오염방지 측면 등에서 탁월한 장점을 갖는 철도의 역할과 중요성에 대한 인식이 새롭게 부각되고 있다.

철도가 새로운 도약기에 들어서고 있는 있지만, 그동안의 기술적, 사회적인 환경변화로 과거와는 다르게 지금까지 없었던 새로운 문제에 직면하였고, 철도경영과 철도기술의 요구사항은 크게 변화되었다. 경제

의 고도성장은 소득의 향상과 대도시 인구집중을 초래하였고, 경제의 질과 양적인 면에서의 폭발적인 성숙, 생활수준의 향상 및 가치관의 다양화로 철도를 둘러싼 환경도 크게 변화하게 되었다^[1,2].

철도의 고품질화는 이와 같은 환경변화에 부응하여 타 교통수단에 대한 경쟁력을 확보함과 동시에 지역간 균형발전을 자연스럽게 유도할 수 있으며, 철도와 관련한 새로운 기술의 도입과 개발을 통하여 향후의 범세계화에 부응하고, 외국 의존적인 국내 철도관련 기술수준의 향상과 독자적인 기술의 개발과 정착을 유도하기 위해서는 반드시 이루어져야 할 과제이다^[3,4].

이와 같은 노력의 일부로서 기존 노선의 속도향상을 위해서, 곡선구간이 많고 상대적으로 교통수요가 많지 않은 구간에 틸팅차량을 투입 운행하기 위한 방안이 추진되고 있다^[5]. 틸팅차량은 차체의 자세제어에 의해 승차감의 큰 저하 없이 일반차량보다 곡선부를 빠른 속도로 주행할 수 있는 장점이 있는 차량으로서, 곡선부가 많은 노선에서의 운행시간 단축 효과가 큰 특징

*1 정회원, 한국철도기술연구원, 인프라기술개발팀, 선임연구원

*2 정회원, 한국철도기술연구원, 인프라기술개발팀장, 선임연구원

이 있다⁶⁾. 이에 대하여 본 연구에서는 기존 노선(중앙선)의 선형현황을 바탕으로 틸팅차량의 투입으로 인한 캔트량 증가효과와 곡선부 주행 시 틸팅각도에 의한 외방편기량의 정량적 평가를 통한 곡선부의 최고 허용속도를 산정하도록 한다. 또한 기존차량의 곡선부 최고주행속도와의 비교/분석을 통하여 속도향상 효율을 분석함으로써 향후 기존선의 주행속도 향상방안 연구를 위한 기초 자료를 제시하는 데 그 목적이 있다.

2. 틸팅차량의 특성 및 제원

2.1 개요

기존선에 투입을 목적으로 개발이 진행되고 있는 고속틸팅열차의 설계최고속도와 최고운행속도는 각각 200 km/h와 180 km/h이다. 이 열차의 주행을 위한 선로 구축물은 표준궤간 1435 mm에 대해서 운행선로의 최소곡선반경 250 m 이상 및 캔트의 최대치로서 160 mm를 설정하고 있다.

Fig. 1에는 기존선에 투입될 예정인 기본편성 6량으로 구성된 고속 틸팅열차를 나타내고 있으며 이 차량에 대한 성능과 제원을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 틸팅차량의 성능 및 제원

틸팅방식		링크방식의 강제 틸팅방식
속도	설계최고속도	200 km/h
	최고운행속도	180 km/h
최대 틸팅 각도		8°~9°
최대 틸팅 각속도		4 %/sec
차량 중량	제어차 공차중량(Tc)	46 tonf
	구동차 공차중량(M1)	52 tonf
	구동차 공차중량(M2)	47 tonf
	최대차축 허용하중(W2)	15 tonf
고정 축간거리		2,600 mm 또는 3,000 mm
승차 감	최고 운행속도로 주행 시	○ 가속한계 : 1.0 m/s ² 이하 ○ 저크(Jerk)한계 : 0.7 m/s ³ 이하
	곡선 통과 시	○ 수평방향의 가속도 : 0.8 m/s ² 이하 ○ 롤링 각속도 : 5 %/sec 이하
탈선 계수	허용 탈선계수의 한계값	평균 0.8 미만
	순간 최대값	1.2 미만

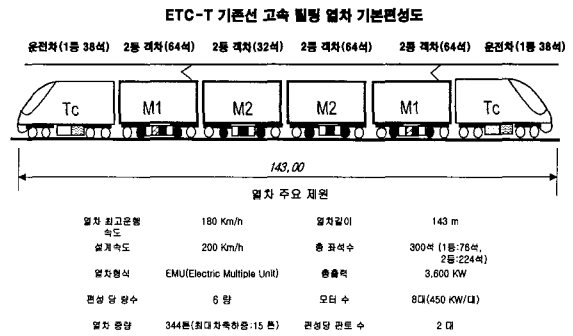


Fig. 1 고속 틸팅열차 기본편성도

Table 2 틸팅 차량의 구조 부분별 질량과 무게 중심고

구분	항 목	차 종			비고	
		Tc	M1	M2		
중량조건	W ₀ (공차)(tonf)	46	52	47		
	W ₂ (만차)(tonf)	51	60	55		
차체 질량특성	자체질량 (tonf)	공차	33.5	35	30	
		만차	38.5	43	38	
	무게 중심고 (m)	공차	1.6	1.5	1.5	
		만차	1.6	1.5	1.5	
대차 후레임 질량특성	대차 후레임 질량 (tonf)	2.06	3.618		2조	
	무게 중심고(m)	0.55	0.48			
틸팅 볼스타 질량특성	틸팅 볼스타 질량(tonf)	0.5			2조	
	무게 중심고(m)	0.6				
운축 세트 질량특성	운축세트 질량 (tonf)	1.6	1.9		4조	
	무게 중심고(m)	0.43	0.43			
	운축 반경(mm)	860				

2.2 무게 중심고의 산정

Table 2에 나타난 차체의 각 부분별 질량과 무게 중심고를 사용하여 틸팅차량 전체에 대한 무게 중심고는 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n m_i h_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

여기서 H : 틸팅차량의 무게 중심고
 m_i : 각 구조 부분별 질량
 h_i : 각 구조 부분별 무게 중심고
 n : 각 구조 부분의 개수

식 (1)을 사용하여 무게 중심고(H)를 구한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 차량별 무게 중심고

차량구분		Tc	M1	M2
무게 중심고	공차	1.315	1.177	1.142
H(m)	만차	1.344	1.221	1.195

Table 3으로부터 알 수 있는 바와 같이, 각 차량별로 무게 중심의 높이가 다른 것이 일반적이며 더욱이 편성된 열차는 각 차량들이 조합되어 구성되기 때문에 각각의 차량에 대해서 별도의 무게 중심고를 적용하기는 곤란하다.

일반적으로 선로의 제반 조건이 동일한 것으로 가정할 때, 무게 중심고가 낮은 차량은 무게 중심고가 높은 차량에 비해서 레일 외방으로의 전복에 대한 안전율이 높다. 따라서 본 과제에서는 무게 중심고가 높은 차량 즉, 차량 Tc의 만차인 경우를 기본적으로 적용하도록 하며, 무게 중심고가 낮은 차량에 대해서는 충분한 안전율을 갖는 것으로 간주한다.

3. 틸팅차량과 선로선형과의 상관관계

3.1 틸팅차량의 곡선부 통과 메커니즘

Fig. 2에서와 같이 경사각 α 로 기울어진 곡선부 궤도를 속도 $v(\text{km/h})$ 로 통과하는 질량 m 인 틸팅차량에 작용하고 있는 외력의 경사면에 대한 수평 및 수직평형을 생각하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$P_1 + P_2 = \frac{mv^2}{R} \sin \alpha + mg \cos \alpha \quad (2)$$

$$Q = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha - mg \sin \alpha \quad (3)$$

또한 차량의 무게중심에 대한 모멘트평형으로부터

$$P_1(G/2 + d) - P_2(G/2 - d) + QH = 0 \quad (4)$$

여기서 G : 궤간(mm)
 m : 차량의 질량
 d : 무게 중심의 외방 편기량(mm)
 H : 차량의 무게 중심고
 R : 곡선반경(m)

위 식 (2)~(4)를 P_1 과 P_2 에 대하여 정리하면 다음 식 (5) 및 식 (6)과 같이 된다.

$$P_1 = \left(\frac{1}{2} - \frac{d}{G} \right) \left(\frac{mv^2}{R} \sin \alpha + mg \cos \alpha \right) - \frac{QH}{G} \quad (5)$$

$$P_2 = \left(\frac{1}{2} + \frac{d}{G} \right) \left(\frac{mv^2}{R} \sin \alpha + mg \cos \alpha \right) + \frac{QH}{G} \quad (6)$$

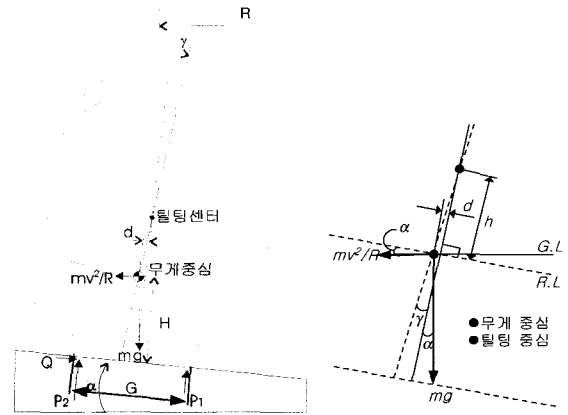


Fig. 2 곡선부에서 틸팅차량의 무게중심에 대한 평형관계

곡선부에서 차량의 전복 안전성 평가를 위한 방법으로 널리 사용되고 있는 1/3법칙(One-Third Rule)^[8]을 적용하여, 전복 안전성을 확보하기 위한 제한속도를 구하면 다음과 같다. 1/3법칙은 차량에 작용하는 원심력과 중력의 벡터합이 궤간의 1/3이내에 들어야 안전하다는 기준으로 국내에서 적용하고 있는 안전율 3 이상에 해당하는 것이다. 1/3 법칙에 의한 안전성 한계는 $P_2=2P_1$ 이며 이를 식 (5)와 (6)에 대입하면 아래의 식 (7)과 같이 제한속도(km/h)를 구할 수 있다.

$$V_{max} = 3.6 \sqrt{\frac{gH \sin \alpha - g(6d - G)/6 \cdot \cos \alpha}{(6d - G)/(6R) \cdot \sin \alpha + H/R \cdot \cos \alpha}} \quad (7)$$

여기서 α : 곡선부 궤도의 경사각(degree)
 g : 중력가속도(9.8m/sec²)

식 (7)에 의하면, 곡선부 통과 최고속도는 차량 무게 중심의 높이 H 와 무게중심의 외방 편기량 d 에 의해서 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 틸팅각(γ)으로 인한 편기량

틸팅차량이 곡선부를 주행하는 경우 틸팅효과에 의해서 무게 중심이 외방으로 이동하게 되는 편기현상이 발생한다. 이와 같은 틸팅으로 인한 무게 중심의 외방 편기량을 고려하기 위해서는 외방으로의 편기량과 이로 인한 캔트 감소량 ΔC 와의 관계를 정립할 필요가 있다.

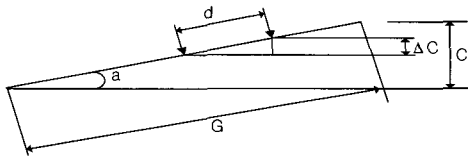


Fig. 3 편기에 따른 설정캔트 감소 효과

Fig. 3으로부터 다음 식이 성립한다.

$$\Delta C = \frac{Cd}{G}, \quad d = htan\gamma \quad (8)$$

여기서 C : 설정 캔트(mm)

h : 틸팅 중심고와 무게 중심고의 차이

γ : 틸팅 각도(degree)

식 (8)에 의하면, $C=100$ mm, $G=1500$ mm, $C_a=100$ mm 및 최대 틸팅각 $\gamma=8^\circ$ 의 조건에서 $d=(1600-1344)\tan 8^\circ \approx 36$ mm 이므로, $\Delta C=2.4$ mm 이 된다.

3.3 틸팅차량으로 인한 최대캔트량의 향상 효과

곡선부 정차 시에, 곡선 외측으로부터의 바람에 의한 차량의 내측 전도에 대한 안전과 차체의 경사로 인한 승차감을 고려하여, 차량의 내측 전도에 대한 안전율을 3으로 하는 경우, 캔트량의 한계, 즉 최대 캔트량은 다음 식을 만족해야 한다.

$$C \leq \frac{G^2}{6H} \quad (9)$$

기존 차량의 경우, $G=1,500$ mm 및 $H=2,000$ mm이

므로 기존 선로의 곡선부에서의 최대 캔트는 187.5 mm 이고, 틸팅 차량의 경우에는, $G=1,500$ mm, $H=1,344$ mm를 적용하고 편기량에 의한 캔트 감소효과를 고려하면, 최대 캔트는 279.0 mm이다. 따라서 전복에 대한 안전성을 기준으로 한 경우, 기존 차량과 틸팅 차량의 최대 캔트 차이가 91.5 mm이므로 기존차량에 비해서 틸팅차량으로 인한 최대 캔트량의 향상 효과는 약 48.8 %이다. 단, 주행 중인 열차의 전복에 대한 안전은 틸팅각을 고려하면, 최대 캔트량은 276.6 mm가 되어 곡선부 캔트 향상효과는 47.5 %로 된다. 이 효과는 대상 틸팅차량의 대표적인 장점중의 하나로서 무게 중심고가 기존차량의 2 m에 비해서 크게 낮다는 사실에서 그 원인을 찾을 수 있다.

4. 기존선에 대한 틸팅차량의 주행속도

4.1 현 선로조건에 대한 곡선부 최고속도

본 연구에서 조사한 기존선의 선로조건과 국유철도 건설규칙^[7]을 근거로 하여 틸팅 차량의 최고 주행속도를 평가하면, 곡선반경 $R=400$ m, 설정캔트=100 mm 및 캔트부족량(C_a)=100 mm인 경우, 기존 차량의 곡선부 최고 통과속도는 다음 식 (10)에 의해서 82.3 km/h 이 얻어진다.

$$(V_{max})_1 = \sqrt{\frac{C+C_a}{11.8}} \cdot \sqrt{R} \quad (\text{km/h}) \quad (10)$$

한편, 틸팅차량의 경우에는, 엄밀 식인 (7)식으로부터 틸팅각 $\gamma=8^\circ$ 로 가정하고 외방 전복에 대한 안전율을 3으로 하는 경우, 틸팅차량의 곡선부 최고 통과속도 (V_{max})₂는 편기량을 고려한 경우와 편기량을 무시한 경우에 각각 107.8과 114.0 km/h를 얻을 수 있다. 이 결과로부터 편기량이 클수록 주행속도는 작아지며, 따라서 편기량을 고려하는 것이 보다 안전측임을 알 수 있다.

곡선반경 $R=400$ 과 $C=100$ mm인 경우에 틸팅각과 최고속도와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 이 결과는 외방 전복에 대한 안전율을 3으로 한 경우 즉, 틸팅 차량의 최대 캔트부족량을 276.6 mm로 가정한 경우의 최고속도이다.

국유철도 건설규칙에서 규정하고 있는 승객의 승차감 기준(횡가속도)을 고려하면 최대캔트부족량은 120 mm로 제한된다. 따라서 승차감 기준을 고려한 캔트 부족량 120 mm와 47.5 %의 캔트향상효과 및 편기량

을 고려할 경우, R400인 곡선부에서 틸팅차량의 최고 주행속도는 식 (10)에 의해서 94.8 km/h로 된다. 따라서 현재의 선로 조건하에서는 틸팅차량 투입으로 인하여 기존차량 대비 약 15 %의 속도향상이 가능한 것으로 나타났다.

열차의 안전을 측면에서 검토할 경우, 식 (11)에 의해서 안전율을 산정할 수 있으며, 현 선로조건을 기준으로 한 기존차량과 틸팅차량의 안전율(Safety Factor)을 계산하면, 곡선반경 400 m와 캔트 100 mm 일 때 안전율은 각각 5.6과 8.4가 얻어진다.

$$SF = \frac{G^2}{2CH} \quad (11)$$

따라서 틸팅차량의 경우에 기존차량과 동일한 안전율을 갖기 위한 등가의 캔트량(C_{eq})은 식 (11)에 의해서 149.5 mm이다. 여기에 편기량에 의한 캔트 감소를 고려하면, $C_{eq}=147.1$ mm로 되어 안전을 개념으로부터 계산한 캔트향상효과도 동일함을 알 수 있다.

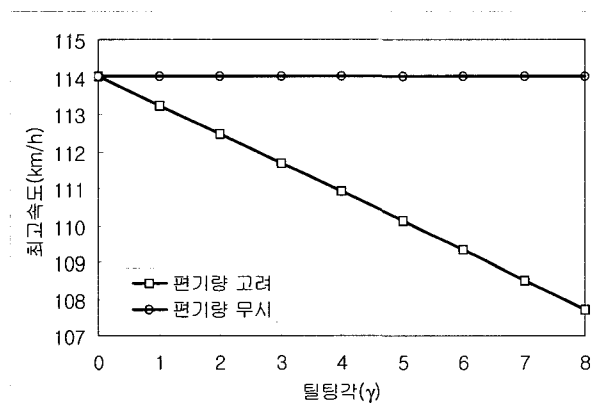


Fig. 4 틸팅각도에 따른 최고속도의 변화

4.2 곡선반경에 따른 최고속도의 산정

기존선(중앙선)에 대해서 조사한 선형자료를 근거로, 국유철도규칙에서 정한 횡가속도가 0.08g를 초과하지 않는 범위 내에서 곡선반경과 설정캔트별 최고속도를 산정하여 Table 4에 정리하였다. 여기서 계산에 사용된 설정캔트는 기존선의 보선 사무소에서 관리하고 있는 현장 캔트이다. 영주 구간 전체에서 곡선부 구간만을 대상으로 하였을 때, 기존 차량의 최고속도의 평균인 88.3 km/h에서 틸팅차량의 최고속도의 평균은 101.1 km/h로서 평균 14.5 %의 속도향상을 도모할 수 있는 것으로 분석되었으며, 제천구간

의 곡선부의 경우, 기존 차량의 최고속도의 평균인 91.4 km/h에서 틸팅차량의 최고속도의 평균은 104.5 km/h로서 평균 14.3 %의 속도향상을 도모할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 원주구간의 경우에는 97.1 km/h에서 111.1 km/h로 14.4 %의 속도향상이 가능한 것으로 나타났다. 따라서 기존선(중앙선)구간에 틸팅차량을 투입할 경우 캔트량 수정 없이 약 14.4 %의 속도향상이 가능한 것으로 나타났다. Table 4는 현재 기존선(중앙선)의 곡선반경과 설정캔트에 따른 기존차량과 틸팅차량의 최고 통과속도를 계산하여 정리하였고, Fig. 5는 캔트량에 따른 최고속도의 향상 백분율을 나타낸 그림이다. Table 4와 Fig. 5로부터 알 수 있는 바와 같이 캔트량이 증가 할수록 속도향상의 백분율은 증가하며 이 증가율은 곡선반경에 관계없이 일정하다. 따라서 속도향상의 효율은 설정캔트량에 크게 의존하기 때문에 틸팅차량의 투입효율은 곡선부에서 최대로 발휘될 수 있음을 알 수 있다.

Table 4 곡선반경과 캔트에 따른 최고속도

곡선반경 R(m)	설정캔트 (mm)	최고속도(km/h)		속도향상 (%)
		기존 차량	틸팅 차량	
400	70	75.9	86.5	14.0
	80	78.1	89.4	14.4
	90	80.3	92.1	14.8
	100	82.3	94.8	15.1
	110	84.4	97.4	15.4
	120	86.4	99.9	15.7
500	70	84.9	96.7	14.0
	90	89.7	103.0	14.8
	100	92.1	106.0	15.1
600	110	94.3	108.9	15.4
	50	87.3	98.6	12.9
	60	90.2	102.4	13.5
	70	93.0	106.0	14.0
	80	95.7	109.5	14.4
700	90	98.3	112.8	14.8
	100	100.8	116.1	15.1
	70	100.4	114.5	14.0
	80	103.3	118.2	14.4
800	60	104.2	118.2	13.5
	70	107.4	122.4	14.0
	80	110.5	126.4	14.4
	100	116.4	134.1	15.1

Table 5는 국유철도 건설규칙^[7]에서 정하고 있는 최대 캔트량 160 mm를 부설캔트량으로 설정할 경우, 기존의 캔트조건에 대한 기존차량과 틸팅차량의 속도향상의 효율을 나타내고 있다. 이 표로부터 알 수 있

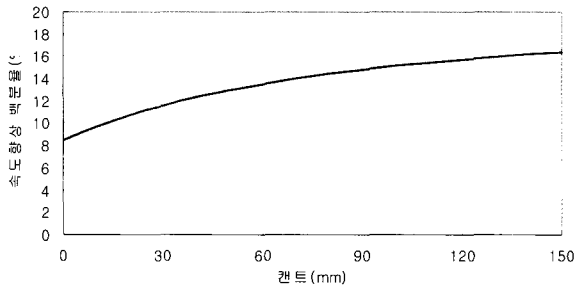


Fig. 5 칸트량에 따른 속도향상 백분율

는 바와 같이 곡선 반경이 1000 m 미만인 경우, 현재의 칸트량을 160 mm로 할 때 평균 30 % 이상의 속도 향상을 구현할 수 있음을 알 수 있다.

Table 5 부설칸트(160 mm)에 따른 속도향상 효과

R(m) (칸트)	칸트 보정량 (mm)	기존차량 최고속도 (km/h)		틸팅차량 최고속도 (km/h)		효율(%)		
		a	b	c	d	b/a	d/c	d/a
400 (C120)	40	86.4	93.9	99.9	109.3	8.7	9.4	26.5
500 (C110)	50	94.3	105.0	108.8	122.2	11.3	12.2	29.5
600 (C100)	60	100.8	115.0	116.1	133.8	14.0	15.3	32.7
700 (C80)	80	103.3	124.2	118.3	144.5	20.0	22.1	39.9
800 (C100)	60	116.4	132.8	134.1	154.5	14.0	15.3	32.7
900 (C50)	110	107.0	140.8	121.2	163.9	31.7	35.2	53.2
1300 (C30)	130	119.7	169.2	134.2	197.0	41.4	46.7	64.6
1400 (C60)	100	137.8	175.6	156.7	204.4	27.5	30.4	48.4
2000 (C30)	130	148.4	209.9	166.5	244.3	41.4	46.7	64.6

주) ㉑:현재 상태 기준(기존차량)
 ㉒:부설칸트량을 160 mm로 한 경우(기존차량)
 ㉓:현재 상태 기준(틸팅차량)
 ㉔:부설칸트량을 160 mm로 한 경우(틸팅차량)

5. 결 론

본 연구에서는 기존선의 선형조건에 대해서 고속의 틸팅차량으로 인한 칸트향상과 편기량에 대한 정량적인 분석을 수행하였고, 이를 바탕으로 한 기존선 곡선부에서의 최고 주행속도를 산정하였다. 또한 기존차량의 최고 주행속도와와의 비교 및 검토를 통하여 틸팅차

량의 투입에 의한 속도향상을 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 수행결과로서 얻은 결론은 다음과 같다.

- i) 기존선에 틸팅차량의 투입으로 인하여 기존 설정칸트의 47.5 %에 상당하는 칸트 향상 효과가 있으며, 그 주된 요인으로는 틸팅차량의 무게 중심고가 약 1.34 m로 기존차량에 비해서 크게 낮으므로 곡선부 주행시 보다 높은 안전성이 확보되고 있기 때문이다.
- ii) 최대 틸팅각(8도)으로 인한 무게중심의 외방으로의 편기량에 의한 칸트량의 감소량은 약 2.4 mm 정도로 작지만, 이로 인하여 약 6 km/h의 속도저감을 유발하므로 최고속도 평가 시에는 이를 고려할 필요가 있다.
- iii) 기존선의 선형현황을 근거한 곡선반경별 최고속도 산정 결과로부터, 틸팅차량의 투입으로 기존차량에 비해서 약 15 %의 속도향상이 가능함을 알 수 있었다. 이 때 속도향상의 백분율은 칸트량에 크게 좌우된다. 또 현 설정칸트를 기준으로 하는 경우 곡선반경이 작을수록 속도향상의 효율이 증가하여 틸팅차량은 곡선부에서 그 성능이 최대로 발휘됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Esveld, Modern Railway Track, Second Edition, Netherland, 2002.
2. Teruki Ishibashi, "Research and Development for the Improvement of Urban Transportation," RTRI REPORT, Vol.11, No.6, pp.9-13, 1997.
3. 岡本 勲, "曲線をもっと速く,快適に走るために," RRR, pp.14-17, 1996. 10
4. 山下 廣行, "在來鐵道高速化の現況," RRR, pp.10-13, 1996.10
5. 한국철도기술연구원, "기존선의 고속화를 위한 시스템에 관한 연구", 2000.
6. 한국철도기술연구원, "선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발(2단계 2차년도 보고서), 2001.
7. 철도청, 국유철도건설규칙, 2000.
8. International Union of Railways, UIC Code 703R, Layout characteristics for lines used by fast passenger trains, Second editions, 1989.