

기존선 완화곡선부의 승차감을 고려한 틸팅차량의 곡선부 제한속도 평가

Evaluation of Tilting Trains Speed in Conventional Railways Curves Considering Passenger's Comfort in Transition Area

엄주환¹ · 엄기영² · 여인호¹ · 유영화¹

Ju-Hwan Um · Ki-Young Eum · In-Ho Yeo · Young-Hwa You

Abstract

The purpose of this paper is to present the alignment layout and the way of modifying transition curve for better operation of tilting trains. It is based on data from field investigation of all curves in conventional line. In general, all curves have transition parts in the beginning and end of the main curve in order to improve the passenger's comfort. The speed-up of conventional line may need an extension of transition curves. This paper checked out whether the transition curve should be modified or not and how to lengthen it. Then the maximum train speeds in curve prior to and after the modification of transition curve were evaluated.

Keywords : Transition Curve(완화곡선), Tilting Trains(틸팅열차), Passenger's Comfort(승차감)

1. 서론

국내 기존선의 속도향상을 목적으로 틸팅개념을 도입한 새로운 열차의 개발이 진행되고 있다[1,2]. 틸팅열차는 자세제어(틸팅)를 통하여 곡선부를 기존열차에 비해서 보다 빠르게 주행할 수 있는 장점이 있다. 그러나 국내의 기존선은 지형, 선로상의 지장물 및 선형구성 등의 이유에서 열차 통과속도에 제한을 받는 곡선부가 비교적 많이 존재하고 있는 것이 사실이다.

틸팅열차의 투입으로 기존선의 속도향상을 꾀하기 위해서는 기존선 궤도와 선형적합성에 관한 검토가 이루어져야 한다. 즉, 틸팅열차의 곡선부 통과속도의 목표치를 정하고 이에 적합한 선형조건을 가정하여 곡선의 연장, 캔트량 및 곡선반경의 확대 등의 수정이 이루어져야 한다.

틸팅열차가 상업 운행되고 있는 외국의 예를 보면, 틸팅열차는 곡선부에서 기존열차에 비해서 평균 30%이상의 속도향상이 가능한 것으로 알려져 있다[3]. 이것은 궤도선형에 대한 최소한의 개량을 통하여 속도향상을 꾀하고자 하는 기본 개념에 근거한 결과이다.

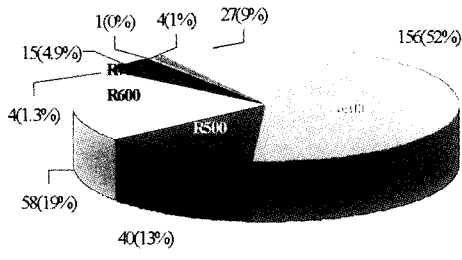
즉, 고비용이 소요되는 대규모의 선형개량보다는 완화곡선의 연신 등과 같은 저비용의 소규모 선형개량을 통하여 적정 수준의 속도향상을 구현하는 것이 가장 바람직하다는 결과이기도 하다.

본 연구는 기존선(중앙선 및 장항선)의 모든 곡선부의 현장조사를 실시하고 그 결과를 바탕으로 궤도선형을 검토하고 틸팅열차의 주행에 적합한 선형과 연신방안을 제시하는데 그 목적이 있다. 즉, 승차감 개선을 목적으로 완곡선의 시점과 종점부에 삽입된 완화곡선의 길이가 부족하여 기존열차의 속도가 제한을 받는 곡선부에 대해서는 현장조사에 의한 완화곡선의 연신여부 및 방법을 검토하였고, 완화곡선을 연신한 후의 기존열차와 틸팅열차의 제한속도를 산정하였다.

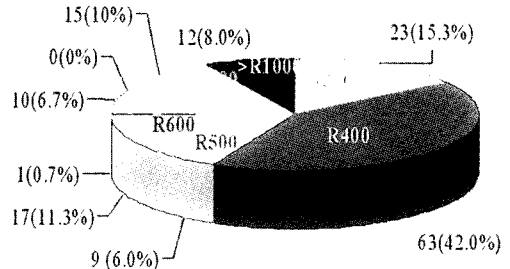
2. 기존선의 선형현황

Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에서 조사한 중앙선과 장항선의 선형현황을 나타낸다. 중앙선(동화~안동)은 원주, 체천 및 영주구간으로 나뉘어져 각각 관리되고 있다. 중앙선의 최소 곡선반경은 400m으로서 전체 곡선 중 52%인 156개소에 달하고 있을 만큼 지형적으로 급곡선부가 많이 존재하고 있다.

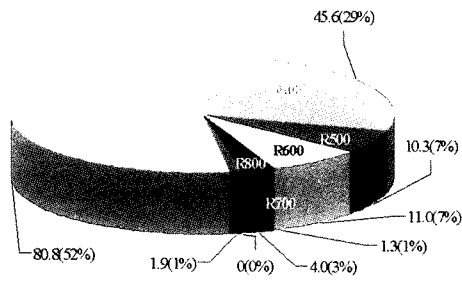
1 정회원, 한국철도기술연구원, 인프라기술개발팀, 선임연구원
2 정회원, 한국철도기술연구원, 인프라기술개발팀장, 책임연구원



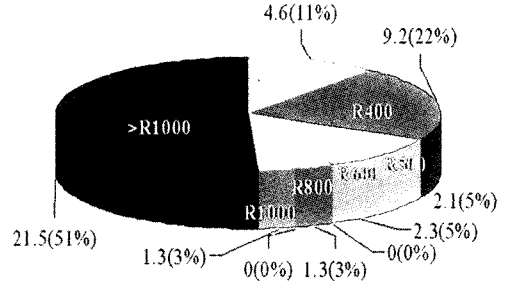
(a) 곡선반경별 개소 분포



(a) 곡선반경별 개소 분포



(b) 곡선반경별 연장(km)



(b) 곡선반경별 연장(km)

Fig. 1. 중앙선의 선형현황(동화~안동)

Fig. 2. 장항선의 선형현황(삼교~장항)

또한 곡선반경이 400m인 곡선의 연장은 전체 곡선연장의 29%인 45.6km에 달하고 있다.

장항선의 경우에는 최소곡선반경이 300m로 전체 곡선 중 15.3%인 23개소이고, 반경이 400m인 곡선은 63개소로 42%에 달하고 있다. 반경이 300m과 400m인 곡선의 연장은 전체 곡선연장의 33%인 13.8km에 해당한다.

이와 같은 틸팅의 원리에 따라, 틸팅차량은 노선에 곡선부가 많을수록 그 효과가 크게 나타나는 반면, 고속선과 같이 곡선부가 거의 없는 노선에서는 그 유용성이 많이 저감된다.

현재 철도기술연구원에서 개발중인 틸팅차량(TTX)의 기본편성도와 특성을 Fig. 3 및 Table 1에 나타내었다[2].

3. 개발중인 틸팅열차의 성능 및 특성

3.1 틸팅열차의 특성

틸팅은 곡선부 주행 시 차체를 곡선의 내측으로 기울이게 하는 기술로서, 곡선부를 주행할 때 발생하는 원심가속도의 횡방향 성분을 중력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시켜, 결과적으로 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키는 기술이다.

차량에 이와 같은 틸팅 기술을 적용하면 승차감의 향상뿐만 아니라 곡선부 통과속도를 증가시킬 수 있으므로 운행시간이 단축되며, 곡선부 통과시의 가감속 빈도도 줄어들어 그만큼의 에너지 소비도 줄일 수 있게 된다[4].

일반적으로 곡선부의 속도제한은 궤도조건이나 차량의 성능에 따른 제한보다는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정하고 있는 것이다.

즉, 곡선부 주행 시 승객이 느끼는 횡가속도가 일정값을 초과하지 않도록 제한되어진 것이다.

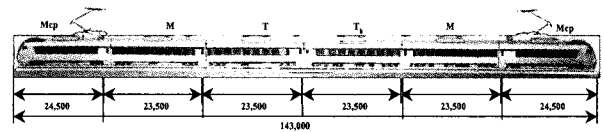


Fig. 3. 틸팅열차의 외형 및 기본편성도

Table 1. Property of tilting car

구분	항목	차종		
		Mcp	M	T
차량 중량 조건	W_0 공차중량(톤)	52	46	44
	W_1 정비중량(톤)	54	48	46
	W_2 만차중량(톤)	57	53	51
운속 세트 mass property	운속 질량(톤, Mg)	2.103	2.100	1.716
	무게중심고(m)	0.43	0.43	0.43
	운속 반경(mm)	860		
	롤 & 요 관성모멘트 (Mg-m ²)	1.3	1.3	1.2

3.2 선로선형과 틸팅 메커니즘과의 상관관계[4]

캔트 변화량에 의한 차량의 롤 각속도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 차량이 틸팅을 하지 않는다면, Fig. 4에서 틸팅각을 나타내는 γ 를 무시할 수 있으므로 승객들이 느끼는 정상 횡가속도(a_{late})를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{rate} = \frac{C_{rate}}{1500} \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

$$a_{late} = a_{cen} \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \quad (2)$$

여기서, $a_{cen} = \frac{(V/3.6)^2}{g \cdot R}$, $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{C}{1500}\right)$

V = 열차의 속도(km/h)

G = 궤간

R = 곡선반경

C = 설정캔트

틸팅차량은 차량이 곡선을 통과할 때 발생하는 원심력을 차량의 진자운동을 통해 보상시켜주는 메커니즘을 갖고 있다. 최소 완화곡선의 길이를 L_{min} 이라 할 때, 틸팅차량이 완화 곡선부를 주행하는 시간은 아래의 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$T_{ct} = 3.6 \frac{L_{min}}{V} \quad (3)$$

틸팅의 완화곡선부 인식에 필요한 소요시간을 $T_d (=0.3sec)$ 라 하면, 이를 고려한 실제 틸팅시간은 다음 식 (4)와 같다.

$$T_{tilt} = T_{ct} - T_d \quad (4)$$

캔트변화율 및 캔트부족변화율은 각각 다음 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$C_{rate} = \frac{C}{T_{ct}} \quad (5)$$

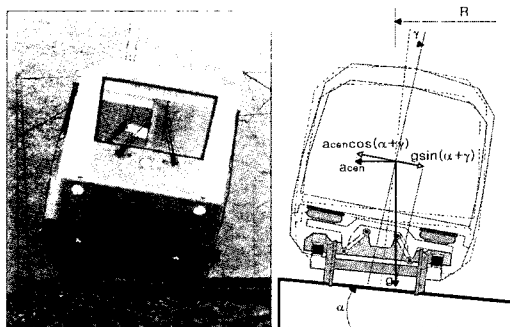


Fig. 4. 틸팅차량의 곡선부 통과 메커니즘

$$CD_{rate} = \frac{CD}{T_{ct}} \quad (6)$$

틸팅은 멀미현상을 방지하기 위하여 캔트부족량의 전부가 아닌 일정 비율만을 보정하는 경우가 일반적이며, 이에 따른 최대 틸팅각도와 최대 틸팅율은 각각 식 (7) 및 식 (8)을 사용하여 구할 수 있다.

$$\gamma_{max} = \tan^{-1}\left(\frac{K_1 \cdot CD}{1500}\right) \quad (7)$$

$$\gamma_{max_rate} = \frac{\gamma_{max}}{T_{tilt}} \quad (8)$$

식 (7)에서 K_1 은 캔트부족량의 보정율로서 일반적으로 0.6~0.7을 적용한다.

캔트의 변화량과 틸팅운동의 합에 의한 전체 롤 각속도는 식 (9)와 같다. 현가장치의 롤 강성은 캔트에 대비한 비율 (K_2)로 나타내며 일반적으로 0.85를 사용한다. 따라서 롤 강성을 고려할 경우, 승객이 느끼는 정상 횡가속도는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{rate} = \frac{C_{rate}}{1500} \frac{180}{\pi} + K_2 \cdot \gamma_{max_rate} \quad (9)$$

$$a_{late} = a_{cen} \cos(\alpha + K_2 \cdot \gamma_{max}) - \sin(\alpha + K_2 \cdot \gamma_{max}) \quad (10)$$

3.3 틸팅차량의 승차감 기준

본 연구에서는 국내외의 승차감 관련기준에 근거하여 틸팅차량이 곡선부를 주행할 때, 다음의 Table 2와 같은 승차감 관련 항목들을 기준으로 곡선부 통과속도를 산정하였다.

최대 틸팅각도의 경우, 시설물과의 간섭, 틸팅메커니즘의 한계 등에 의해 거의 대부분의 틸팅차량의 최대틸팅각도가 8도로 제한되어 있는 실정이다. 승차감 측면에서도 너무 과다한 틸팅은 바람직하지 않은 이유도 있다. 또한 틸팅각속도는, 승차감 측면에서 과대한 것은 바람직하지 않으며, 작동기(actuator)의 반응한계를 고려한 값이다.

전체 롤 각속도는 일반적으로 5도/sec를 초과하게 되면

Table 2. 틸팅차량의 승차감 평가기준[4]

항 목	최대 허용치
최대 틸팅각도	8 degree
최대 틸팅각속도	4 degree/sec
최대 전체 롤 각속도	5 degree/sec
정상 횡가속도	0.08g
완화곡선 승차감 지수	5

승객들이 불쾌감을 많이 느끼기 시작한다는 연구결과를 토대로 한 것이며, 정상항가속도는 현재 적용하고 있는 국내 기준을 따른 것이다.

완화곡선의 승차감 지수에 대해서는 신뢰성 있는 평가기준이 마련되어 있지 않은 실정이지만, 본 연구에서는 5정도를 적당한 기준으로 설정하였다.

4. 틸팅열차 투입에 의한 캔트 향상 효과

Fig. 5는 틸팅차량의 틸팅각도 $0^\circ \sim \pm 8^\circ$ 에 따른 차체 무게중심고의 수평방향 및 수직방향으로의 변화 궤적을 나타낸다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이 틸팅각이 $\pm 3^\circ$ 일 때에는 수평방향으로의 편기는 발생하지 않으며 수직방향의 편기량은 10mm이다. 최대틸팅각 $\pm 8^\circ$ 일 경우에는 수평방향으로 최대 $\pm 5\text{mm}$, 수직방향으로 최대 22.5mm 정도 무게중심의 편기량이 발생하고 있음을 알 수 있다.

레일면에 수평인 방향으로의 편기량은 차량 질량의 합력이 궤간의 중심으로부터 외측 또는 내측으로 이동함에 따라 전복에 대한 안전율에 영향을 미치며, 수직방향으로의 편기량은 틸팅차량의 최대캔트부족량 또는 최대캔트량을 감소시키는 결과를 주기 때문에 이러한 편기량으로 인한 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 여기에서는 편기량의 최대값을 기준으로 틸팅차량의 최대캔트량과 곡선부 설정캔트에 미치는 변화량을 산정하였다.

4.1 최대 캔트량

곡선부 정차 시에, 곡선 외측으로부터의 바람에 의하여 차량이 내측으로 전도되지 않도록 충분히 안전하게 할 것과 차체의 경사에 의하여 승객에게 불쾌감을 주지 않아야 하는 것을 고려하고, 차량의 내측 전도에 대한 안전율을 3으로 하면 캔트량의 한계, 즉 최대 캔트량은 다음 식 (11)으로 계산

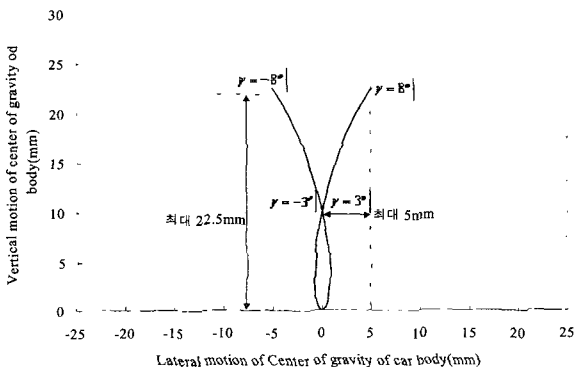


Fig. 5. 틸팅차량의 틸팅각도에 따른 무게중심 궤적

할 수 있다[5].

$$\frac{C}{G}H \leq \frac{G}{6} \text{ 또는 } C \leq \frac{G^2}{6H} \quad (11)$$

여기서 H 는 레일면에서 차량 무게 중심까지의 높이, C 는 설정 캔트, G 를 내외 · 궤 레일 중심간의 거리이다.

기존 선로의 곡선부에서의 최대 캔트는, 기존 차량의 경우, $G=1,500\text{mm}$ 및 $H=2,000\text{mm}$ 이므로

$$C_{\max, \text{con}} \leq \frac{1500^2}{6 \times 2000} = 187.5\text{mm} \quad (1)$$

이고, 틸팅 차량인 경우에는, $G=1,500\text{mm}$, $H=1124\text{mm}$ 이지만, Fig. 5에서와 같이 수직방향으로 22.5mm의 편기량을 고려하면 $H=1146.5\text{mm}$ 이 된다. 따라서 틸팅차량의 최대캔트량은

$$C_{\max, \text{til}} \leq \frac{1500^2}{6 \times 1146.5} = 327\text{mm} \quad (2)$$

이다. 따라서 ①과 ②로부터 기존 차량과 틸팅차량에 대한 최대 캔트 차가 139.5mm이므로 틸팅차량 투입에 의한 최대 캔트량은 기존차량의 경우에 비하여 약 74.4% 향상된 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이 효과는 틸팅차량의 대표적인 장점중의 하나로서 무게중심고가 기존차량의 2m에 비해서 크게 낮기 때문에 안전도가 비례하여 크게 확보된다는 사실에서 그 원인을 찾을 수 있다.

4.2 횡방향 편기에 의한 곡선부 캔트량의 등기변화량

Fig. 5에서와 같이 틸팅각으로 인하여 무게중심이 궤간의 중심으로부터 내측으로 수평 이동함에 따라서, Fig. 6에서와 같이 곡선부에 부설된 캔트량이 ΔC_{\max} 만큼 향상되는 효과를 유발한다. 이는 열차속도의 증가에 따라 원심력과 중력의 합력이 궤간의 중심으로부터 멀어지는 것과 반대의 현상으로 곡선부에서의 열차통과 성능에 긍정적인 역할을 한다고 볼 수 있다.

따라서 Fig. 6로부터 다음 관계가 성립한다.

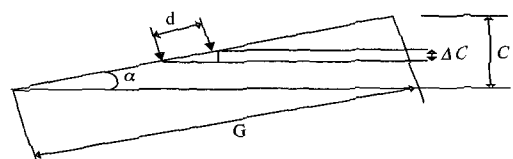


Fig. 6. 무게 중심의 편기량과 캔트와의 상관관계

$$\Delta C_{\max} = \pm \frac{C \cdot d_{\max}}{G} = \pm 0.0033C \quad (12)$$

여기서 d_{\max} 는 $\gamma = 8^\circ$ 일 때 5mm이고 수평방향의 최대편기량을 나타낸다. 식 (12)에 의하면, $\Delta C = 0.038C$ 가 된다. 따라서 틸팅차량 투입에 의한 편기량은 부설캔트의 약 0.33% 정도를 증가시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

5. 틸팅열차의 곡선부 제한속도

5.1 곡선부 제한속도 평가방법

국내의 기존선은 지형, 선로상의 지장물 및 선형구성 등의 이유에서 국유철도규칙[5]에서 정한 최고속도로 주행할 수 없는 곳이 비교적 많이 존재하고 있다. 따라서 기존선의 곡선부 최고속도는 이와 같은 현실적인 면을 고려하여 설정하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 현재 복선전철화를 위한 개량공사가 추진 중에 있는 중앙선의 청량리~동화구간을 제외한 동화~안동구간(약 155km)과 장항선의 전구간에 포함된 모든 곡선부에 대해서, 열차의 속도가 제한받을 수 있는 지형적 장애물에 관한 현장조사를 실시하였다.

지형적인 영향을 고려한 틸팅차량과 기존차량의 곡선부 최고속도 및 제한속도 산정방법은 다음과 같다. 먼저, 현장조사된 현재의 선형조건을 근거로 기존열차와 틸팅열차의 곡선부 최고속도를 산정한다. 이 때, 기존열차의 최고속도는 국유철도규칙에서 정한 규정을 따르고, 틸팅열차의 경우에는 앞에서 언급한 틸팅특성에 의한 승차감기준을 만족하는 범위 이내에 들도록 각각 산정한다. 산정된 속도에 대한 기존열차의 완화곡선의 만족여부를 판정하여 완화곡선이 부족한 경우에는 속도제한을 설정한다.

다음으로, 완화곡선이 부족하여 기존열차의 속도가 제한

을 받는 곡선부에 대해서는 현장조사에 의한 완화곡선의 연신여부를 검토한 후, 소요연신이 가능한 개소에 대해서는 곡선부 열차 속도를 만족하도록 완화곡선을 연신한 후, 기존열차와 틸팅열차의 최고속도를 재산정한다.

각각의 경우에 대해서 곡선부 열차속도를 산정하고 속도 향상효율을 평가한다. 또한 선형을 개량하기 전후의 주행시 물레이션을 통하여 열차운행시간 단축효과를 비교한 후, 목표수준에 부합하는 최소한의 선형조건을 결정하는 것이 최종 목적이다. 이와 같은 과정을 정리하여 Fig. 7에 나타내었다.

5.2 완화곡선 연신을 위한 검토내용

틸팅차량의 투입에 의한 기존선의 속도향상은 선로선형의 일부개량이 수반된다. 그러나 어느 정도의 수준까지 선형을 개량할 것인가에 관해서는, 기존선에 대해 요구되는 속도향상의 정도에 따라 달려있다고 볼 수 있다.

약 30% 내외 정도의 수준을 속도향상의 목표로 하는 경우에는 선형을 포함한 인프라 시설물들의 부분적인 소규모 개량만으로 소요 수준의 속도향상을 도모할 수 있는 것으로 국내외의 많은 연구결과에서 나타나고 있다.

현재 본 연구에서 검토하고 있는 기존선(중앙선 및 장항선)의 경우, 원곡선부의 시점과 종점부에 삽입하도록 규정하고 있는 완화곡선의 길이가 규정보다 작은 곳이 다수 존재하고 있어서 기존차량은 물론 틸팅차량의 속도향상에 걸림돌이 되고 있는 실정이다. 중앙선의 경우, 고속의 여객열차와 저속의 화물열차가 동시에 빈번하게 운행되고 있어서 각 관할 지역관리소에서 실시하고 있는 유지관리 차원의 작업도 빈번하게 이루어지고 있는 실정이다.

또한 지형적인 영향으로 충분한 완화곡선의 길이를 확보하고 있지 않아서 승차감 관련규정을 만족하지 않는 곡선부도 다수 존재한다. 따라서 이러한 곡선부에서는 열차가 이론적인 계산에 의한 속도로 주행할 수 없으므로 제한속도를 설정할 필요가 있다.

본 연구에서는 완화곡선부의 연신검토를 위해서 중앙선과 장항선의 현장조사를 통하여 해당 곡선부의 선형현황 및 지장물 등을 상세히 조사하고 기록하였다. 또한 완화곡선의 연신가능 여부와 연신 불가능 사유를 기록해 둠으로써 차후의 선형관리를 위한 데이터베이스를 구축하였다.

조사된 자료를 사용하여 완화곡선의 연신여부를 판단하고, 연신전후의 열차속도를 산정하여 비교함으로써, 곡선부의 속도향상효과를 검토하였다. 또한 각 곡선부마다 선형 및 현장 여건이 다르므로, 이 점을 고려한 구체적 연신방법과 연신 예를 제시함으로써 현장 적용성 및 실용성을 높이는 데 중점을 두었다.

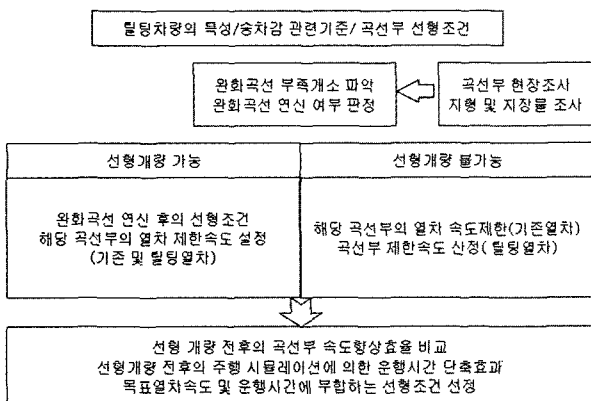


Fig. 7. 선형검토를 위한 연구 내용 및 방법

5.3 기존선의 원화곡선부 연신 분석[6]

중앙선을 대상으로 한 현장조사 결과, 원주구간(동화~구학:45.450km)중 연신이 필요한 곡선부는 총 49개소로 나타났으며, 이 중 29개소는 연신이 가능한 개소로 조사되었다. 적용 연신법은 총 이정량이 최소인 연신법을 적용한 결과 연신 A법은 3개소가 적합하였고, 연신 B-2법은 8개소가 적합한 것으로 조사되었다. 한쪽 연신은 17개소이며, 원화곡선의 연신은 C법이 적합한 것으로 나타났으며 연신 D법이 적합한 구간은 1개 구간으로써 다소 적합하지 않은 연신법으로 나타났다.

제천구간(구학~희방사:53.927km)은 64개소 중 연신이 필요한 곡선부는 총 37개소로 나타났으며, 이 중 21개소가 연신이 가능하다. 21개소 중 연신 A법이 적합한 곳은 5개소이며, 연신 B-2법은 2개소만 적합한 것으로 조사되었다. 나머지 12개소는 연신 C법이 적합하고 2개소는 연신D법이 적합한 것으로 나타났다.

영주구간(희방사~안동:55.810km)은 66개소가 연신이 필요하며 이들 중 46개소는 연신 가능한 것으로 조사되었다. 원화곡선 전장에 걸쳐 연신이 가능한 구간은 9개소로써 5개소가 연신 A법, 4개소가 연신 B-2법이 적합한 것으로 조사 결과 나타났다. 앞의 9개소를 제외한 37개소가 원화곡선 한쪽에 행하는 연신 C·D법이 적합한 것으로 조사되었으며, 이들 중 연신D법이 적합한 3개소를 제외한 34개구간이 연신 C법이 적합한 것으로 조사되었다.

장항선구간(천안~장항:143.1km)에서 천안~삼교구간은 현재 수용능력 증강 및 취약개소 해소로 인한 안전운행 확보와 충청도지역 개발 촉진의 일환으로 단선 구간의 복선전철화 작업과 선형 불량구간의 직선화 작업이 병행되고 있다. 또한, 이 구간은 틸팅차량 도입시기 이전에 선로 직선화 작업 및 전철화 작업이 선행될 계획이 있는 관계로 본 현장조사에는 제외하였다. 따라서 현장조사는 삼교구간 이후의 구간에 대해서 실시하여, 각 곡선부 선형의 연신방법을 검토 및 적용하였다.

삼교~장항구간(93.5km)에서 연신 필요구간은 150개소로 나타났으며, 이중 90개소는 연신이 가능한 구간으로 조사되었다. 연신 가능한 구간은 선로 구축물 현황과 지장물 여부에 따라 적용 연신법을 달리 적용하였다.

연신법 적용 결과는 A법이 16개소, B-1법이 4개소, B-2법이 15개소로 전장에 걸친 연신법은 35개소가 적합한 것으로 나타났다. 곡선한쪽에 행하는 연신법은 55개소로 D법이 2개소이면 나머지 53개소는 C법이 적합한 것으로 조사되었다. 장항선구간은 연신 필요구간에 비해 연신가능구간이 다소 떨어지는 이유는, 대부분이 원곡선과 곡선간 직선거리가

부족하고, 필요한 연신길이가 길게 나타난 이유를 들 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3은 중앙선의 곡선부 원화곡선의 연신 분석 예를 나타낸 것이며, 각 곡선부에 대한 연신 가능여부 및 연신불가 원인, 연신전후의 열차제한속도를 계산한 결과이다.

Fig. 8은 중앙선과과 장항선 전 구간에 대한 곡선부 현장조사결과를 토대로 원화곡선 연신가능 개소와 연신방법별 분류를 나타내고 있다.

5.4 제한속도 산정 결과의 종합고찰

원화곡선은 승객의 승차감을 고려하여 곡선과 곡선 또는 곡선과 직선사이에 삽입하는 것이기 때문에, 곡선반경이 변화하지 않은 한, 규정된 승차감을 만족하는 수준까지만 연신하면 된다. 따라서 현장조사와 연신방법 검토를 통하여 충분한 원화곡선장이 확보되는 경우라 하더라도, 규정된 승차감을 만족하는 수준의 연신길이로 수정된 원화곡선장을 사용하여 열차의 제한속도를 산정하는 것이 타당하다[7,8].

Table 3. 곡선부 원화곡선의 연신 분석 예

곡선반경 R(m)	부설갯트 (m)	부설된 원화곡선길이 (m)	연신전 열차속도 (km/h)		연신가능 여부	연신후 열차속도 (km/h)		비고
			기본열차	원형열차		기본열차	원형열차	
400	90	65	80	110	X	-	-	곡선 부족
	90	70	80	112	O	80	112	-
	90	65	80	110	X	-	-	불기/곡 직부족
	100	70	80	113	O	82	113	-
	100	65	73	110	O	82	113	-
	100	100	82	113	기본열차	-	-	연신훈용
	100	70	80	113	X	-	-	가도교
	100	77	82	113	X	-	-	교량
	110	65	67	109	O	84	114	-
	110	65	67	109	X	-	-	가도교
	110	75	76	115	O	84	115	-
	120	65	62	109	O	86	116	-
	120	65	62	109	X	-	-	전철기
	120	65	81	116	X	-	-	동력
600	70	55	90	116	X	-	-	빌딩벽
	70	60	93	122	O	93	126	-
	70	60	93	122	X	-	-	원곡선길이 부족
	70	60	93	122	X	-	-	빌딩벽
	80	60	86	122	X	-	-	곡선 부족
	80	70	96	129	O	96	135	-
	80	60	86	122	O	96	135	-
	90	60	76	121	O	98	140	-
	90	70	89	129	O	98	137	-

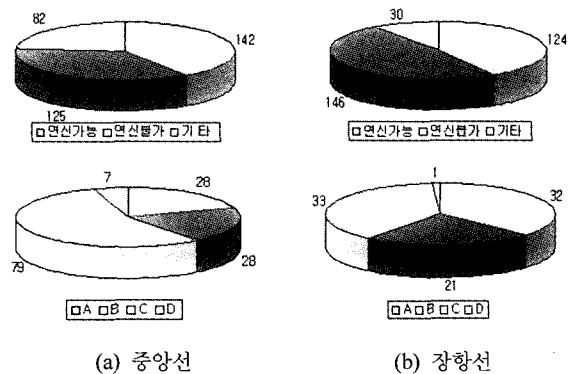


Fig. 8. 노선별 원화곡선 연신가능개소 및 적용연신법

Table 4. 연신전후의 완화곡선에 대한 구간별 곡선부의 평균제한속도

		연신전 (km/hr)		연신후 (km/hr)		연신전후의 상대효율				
		기존 ①	틸팅 ②	기존 ③	틸팅 ④	③/①	④/②	②/①	④/③	④/①
중앙 선	원주 구간	72	114	85	121	1.18	1.06	1.58	1.42	1.68
	제천 구간	88	121	89	123	1.01	1.02	1.37	1.38	1.40
	영주 구간	73	112	83	117	1.14	1.02	1.53	1.41	1.60
장항선		84	123	89	125	1.06	1.02	1.46	1.40	1.50

그러나 캔트량의 증가에 의한 열차속도향상은, 캔트량의 수정작업에 완화곡선의 연신이 추가적으로 수반되기 때문에 비용 측면에서 불리하며, 이 경우에는 목표로 하는 열차의 소요운행시간을 검토하여 수행할 필요가 있다.

또한 국유철도건설규칙에 의하면, 곡선반경 2000m까지는 승차감을 고려하여 최소한의 완화곡선장을 삽입하도록 규정하고 있다. 그러나 중앙선의 경우, 이를 만족시키지 못하고 있는 곡선부가 다수 존재하고 있다. 완화곡선이 삽입되어 있지 않은 곡선부는 원곡선을 수정하지 않는 한 연신이 불가능하기 때문에, 현장의 조건을 고려하여 적정수준에서 열차의 제한속도를 설정할 필요가 있다.

중앙선과 장항선의 각 구간별로 연신 전후의 완화곡선 길이를 적용한 열차의 평균제한속도와 효율을 Table 4와 같이 정리하였다.

구간별로 다소 차이는 있지만, 중앙선의 경우, 원주구간과 영주구간에서는 열차의 곡선부 평균속도가 10km/h 이상 증가하였고, 이것에 비하여 제천구간의 경우에는 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 그 이유로는 제천구간의 경우에는 선로 선형이 국유철도규칙에 비교적 부합하고 있으며, 기타 두 구간의 경우에는 규정된 완화곡선이 삽입되지 않은 곡선부가 많이 존재하고 있기 때문인 것으로 분석되었다. 따라서 연신전의 기존열차에 대한 연신후의 틸팅열차의 효율이 제천구간에 비하여 영주구간과 원주구간에서 크게 나타난 것도 동일한 원인에서 찾을 수 있다.

장항선의 경우에도 완화곡선의 연신 후에는 곡선부 평균속도가 기존열차는 5km/h, 틸팅열차는 2km/h 향상되는 결과를 가져다 주었고, 연신전 기존열차의 평균속도에 비하여 연신후의 틸팅차량의 곡선부 평균속도가 50% 정도 증가하

였음을 알 수 있다. 그러나 이 결과는 곡선부만을 대상으로 한 평균속도이므로 노선 전체의 속도향상은 이 보다 낮을 것으로 예상된다. 노선전체의 속도향상은 완화곡선 수정 전후의 선형을 각각 적용한 주행시물레이션 분석에 의한 운행 시간 단축효과 분석을 통하여 평가할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 틸팅차량 투입 예정 노선인 기존선을 대상으로 현장 상세조사에 의한 곡선부 완화곡선 연신여부를 검토하였고, 개발중인 틸팅차량의 특성과 연신전후의 선형을 토대로 곡선부 제한속도를 평가하였다. 그 결과로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 곡선부에 틸팅차량을 투입하면, 캔트량을 기존차량에 비하여 약 74.4% 향상시키는 효과가 있다.
- (2) 곡선부 세부 현장조사를 통하여 완화곡선의 연신가능여부와 연신방법을 검토하여 해당 곡선부의 구체적 연신방법을 제시하였다.
- (3) 기존선에 틸팅차량을 투입하면 곡선부 제한속도를 기존차량에 비하여 평균 40% 이상 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

1. 기존선의 고속화를 위한 시스템에 관한 연구, 한국철도기술연구원, 2000.
2. 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 한국철도기술연구원, 3차년도 보고서, 2004.
3. 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 한국철도기술연구원, 2차년도 보고서, 2003.
4. 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발(2단계 2차년도 보고서), 한국철도기술연구원, 2001.
5. 국유철도건설규칙, 철도청, 2000.
6. 金子慶常著, 緩和曲線の延伸, カネコ計測工業株式會社, 1984.
7. International Union of Railways, UIC Code 703R, Layout characteristics for lines used by fast passenger trains, Second editions, 1989.
8. Kobayashi, M. et al., "A Study on Transition Curve for Running Safety Considering Vehicle Running Characteristics," RTRI REPORT, Vol.14, No.4, pp.31-36, 2000.