평면원곡선과 종곡선 경합시 보정칸트의 효과에 대한 해석적 연구

An Analytical Study on the Effects of the Compensation Cant in case of Superimposition of Vertical and Horizontal Circular Curves

엄주환[†] · 최일윤¹ · 박찬경² · 이성혁³ · 김 은³

Ju-Hwan Um · Il-Yoon Choi · Chan-Kyoung Park · Seong-Hyeok Lee · Eun-Kim

Abstract Superimposition of horizontal and vertical curves occurs frequently owing to geographical conditions. It may hamper train ride comfort and running safety and inflate maintenance costs. In this study, when the horizontal and vertical curves are superimposed, in order to analyze the effects of the compensation cant, the analytical study for running safety, ride comfort and track forces was performed in high speed line. From the analysis results, it was found that it is better to apply the compensation cant at superimposition part.

Keywords : Compensation cant, Track alignment, Ride comfort, Superimposition

초 록 철도선형에서 평면원곡선과 종곡선의 경합은 예기치 않은 주위 환경조건들에 의해 빈번히 발생하고 있으며, 이는 차량의 주행안정성, 승차감, 그리고 궤도유지보수비에 많은 영향을 끼친다. 본 연구에서는 경합부의 역학적 이론을 바탕으로 산정된 보정칸트량을 고속철도에 적용하여 궤도에 미치는 영향 및 차량의 주행안전성, 승차감을 분석하여 보정칸트의 효과에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 그 결과 보정칸트가 있는 경우가 차량의 주행안전성 및 궤도작용력, 승차감 측면에서 모두 좋은 것으로 나타났다.

주요어 : 보정칸트, 선로선형, 승차감, 선형경합

1. 서 론

철도노선 설계 시 평면 및 종단선형의 적정설계는 매우 중요한 요소라고 할 수 있는데, 특히 이들 두 선형이 경합하는 경우에는 선로유지보수, 차량의 주행안정성과 승차감 등에 큰 영향을 끼친다. 그러므로 설계에서는 가급적 경합을 피하고 있으며, 국내 기준에서도 부득이한 경우에만 경합을 허용하도록 하고 있다. 그러나 지형조건 및 사회 환경적 요인에 의하여 이들 경합이 필요하게 될 경우가 발생되며, 실제로 국내 경부고속선의 경우 평면선형의 약 90% 이상이 경합되어 있는 실정이다. 즉 국토가 좁고 산악지형이 많은 국내의 지형조건에서는 피할 수 없는 현실이라고 판단된다. 따라서 이러한 경합부에 대해 궤도에 미치는 영향이 최소화 될 수 있도록 면밀한 이론적 검토를 바탕으로 한 정량적 기준이 마련될 필요가 있다.

지금까지 국내외적으로 선형경합에 대한 연구실적은 거의 없는 실정이며, 최근 국내에서 엄주환 등(2010)에 의해 경합시 최적선형에 대한 일부 연구가 수행된 바 있다[1,2]. 경합에 대한 기준으로는 일본의 경우 철도에 관한 기술기준(토목편)에서 역학적 이론을 바탕으로한 경합에 대한 정량적 보

정칸트량을 제시하고 있다[3].

본 연구에서는 평면원곡선과 종곡선의 경합부에 대한 역학적 이론을 바탕으로 경합시 보정칸트량 및 열차한계속도 산정에 대해 살펴보고, 이와 더불어 고속철도의 경우 보정칸트량 유무에 따른 궤도에 미치는 영향 및 차량의 주행안전성, 승차감 등에 대한 해석적 검토를 수행하여 보정칸트의 효과에 대한 비교연구를 수행하였다.

2. 경합시 보정칸트량 산정

종곡선과 평면원곡선이 경합한 경우에는 평면원곡선만 있는 경우에 비해 힘의 합력이 궤도외측으로 더욱 작용하여 승차감 및 주행안전성에 나쁜 영향을 미치며, 나아가서는 궤도유지관리 측면에서도 좋지 않은 영향을 미친다. 일본의 Masaharu KUNIEDA는 철도차량의 곡선 주행시 전복에 관한 역학적 이론을 제시하였다[4]. 여기서는 철도차량 전복에 가장 크게 영향을 미치는 힘으로 초과원심력, 진동관성력, 풍압력을 고려하였으며 전복에 대한 위험율(D)로 정의하여 평가를 하였다. 여기서 외력의 합력이 궤간의 중앙을 지날 때를 $D=0$, 그리고 외력의 합력이 외측레일-차륜 접촉점에 작용하는 경우를 전복한계 상태로 $D=1$ 로 정의 하였으며, 이때 외력에 의한 외측레일-차륜 접촉점에서의 모멘트의 합력이 '0'이 된다. 앞의 3가지 힘의 성분중 경합에 의해 변화하는 성분은 초과원심력으로, 본 연구에서는 초과원심력 성분만을 고려하였다.

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 신교통연구본부

E-mail : jhum@krri.re.kr

¹한국철도기술연구원 신교통연구본부

²한국철도기술연구원 시험인증안전센터

³한국철도기술연구원 고속철도연구본부

Fig. 1 Vehicle and track plane acceleration by superimposition

Fig. 1에서 보는바와 같이 종곡선과 평면원곡선이 경합할 때 차량의 전복안전성에 대해 평면곡선만 있는 경우와 경합된 경우를 동일하게 하고 보정칸트량을 산정하면 다음과 같다.

평면곡선만 있는 경우 Fig. 1의 M_0 에서 힘의 평형조건을 구하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{v^2}{R} \cos \theta_c - g \sin \theta_c\right) \cdot H - g \left(\cos \theta_c + \frac{v^2}{gR} \sin \theta_c\right) \cdot \frac{G}{2} = 0 \quad (1)$$

여기서 $\sin \theta_c = \frac{C}{G}$ 이고 $\cos \theta_c = 1$ 이라고 가정한다. 또한 $\frac{v^2}{gR} \sin \theta_c = \frac{v^2 C}{gRG}$ 는 $\cos \theta_c \approx 1$ 에 비하여 훨씬 작으므로 $\cos \theta_c + \frac{v^2}{gR} \sin \theta_c = 1$ 로 둘 수 있다[4]. 따라서 식(1)은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H \frac{v^2}{R} - g \frac{C}{G} H - g \frac{G}{2} = 0 \quad (2)$$

평면원곡선과 종곡선 경합 시 Fig. 1의 M_0 에서 힘의 평형조건을 구하면 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{v^2}{R} \cos \theta_c - (g - g') \sin \theta_c\right) \cdot H - (g - g') \cos \theta_c \cdot \frac{G}{2} = 0 \quad (3)$$

여기서 $\sin \theta_c = \frac{C}{G}$ 이고, $\cos \theta_c = 1$ 이라고 가정하면 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H \frac{v^2}{R} - g \left(1 - \frac{v^2}{gr}\right) \cdot \frac{C'}{G} H - g \frac{G}{2} + \frac{v^2}{r} \cdot \frac{G}{2} = 0 \quad (4)$$

위의 두 경우, 즉 식(2)와 식(4)가 동일한 조건의 C' 를 구하면 다음 식(5)와 같이 경합 시 균형칸트를 구할 수 있다[3].

$$\begin{aligned} H \frac{v^2}{R} - g \frac{C}{G} H - g \frac{G}{2} &= H \frac{v^2}{R} - g \left(1 - \frac{v^2}{gr}\right) \cdot \frac{C'}{G} H - g \frac{G}{2} + \frac{v^2}{r} \cdot \frac{G}{2} \\ \therefore C' &= \frac{C + \frac{G^2}{2H} \cdot \frac{v^2}{gr}}{\left(1 - \frac{v^2}{gr}\right)} = \frac{\frac{2H}{G} C + \frac{Gv^2}{gr}}{\frac{2H}{G} \left(1 - \frac{v^2}{gr}\right)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

C' : 보정칸트를 포함한 칸트량(m)($C_m + C_d + \Delta C$)

C : 균형칸트(m)($C_m + C_d$), C_m : 설정칸트(m)

C_d : 허용칸트부족량(m), ΔC : 보정칸트(m)

H : 차량 유효중심높이(m), G : 궤간(m)

r : 종곡선 반경(m), v : 열차속도(m/sec)

g : 중력가속도(9.8 m/s^2)

또한 앞서 구한 경합시 균형칸트량 산정식을 이용하여 $C = \frac{Gv^2}{gR}$ 을 식 (5)에 대입하고 속도에 대해 정리하면 다음 식 (6)와 같이 경합시 균형칸트에서의 열차속도(한계속도)를 구할 수 있다[3].

$$\begin{aligned} C' &= \frac{\frac{2H}{G} \cdot v^2 + \frac{Gv^2}{gr}}{\frac{2H}{G} - \frac{2Hv^2}{Ggr}} \\ \frac{2H}{G} \cdot C' - \frac{2Hv^2}{Ggr} \cdot C' &= \frac{2H}{gR} \cdot v^2 + \frac{Gv^2}{gr} \\ \therefore v &= \sqrt{\frac{\frac{2HC'}{G}}{\frac{2HC'}{Ggr} + \frac{2H}{gR} + \frac{G}{gr}}} \end{aligned} \quad (6)$$

3. 경합여부에 따른 열차동역학적 거동분석

선형조건별 보정칸트 유무에 따른 차량의 주행안전성 및 승차감을 검토하고자 차세대 고속열차(HEMU)모델을 이용해 차량의 동역학적 거동을 분석 하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 해석을 수행하였다[5].

차량의 주행안전성 검토를 위한 선형조건은 철도건설기준 규정(2008.9.1)을 적용하여 도상종류별 최소선형기준을 적용 하였다. 그리고 주요 매개변수로서 경합여부, 보정칸트 유무에 따른 차량의 동적해석을 수행하고 주행안전성을 검토하였다.

3.1 해석모델 및 조건

3.1.1 차량모델

해석에 사용된 차량모델은 한국철도기술연구원에서 개발 중인 차세대 고속열차(HEMU)모델을 이용하였다. 시제차량은 총 6량으로 구성되어 있으며, 이중 해석차량모델은 총 1량으로 M차량을 기준으로 모델링 되었다. Table 1 및 Fig. 2와 Fig. 3은 시제차량의 체원과 편성 및 모델링 현황을 보여주고 있다.

Fig. 2 Trainset of vehicle(HEMU)

Fig. 3 Model of vehicle(HEMU) by VAMPIRE

Table 1 Vehicle properties

	Items		Specifications	
General part	Speed	Design/operating	440/370 km/h	
	Trainset		6 trains (5M+1T)	
	Specifications of train	Total length	131m(6 trains)	
		Trailer car(L×W×H)	25,5×3,1×3,7(m)	
		Motorized car(L×W×H)	25,5×3,1×3,7(m)	
		Power car(L×W×H)	23,5×3,1×3,7(m)	
	Weight	Total	Tare	302.05 ton(6 trains)
			Full	317.5 ton(6 trains)
Max, wheel load		14.278ton		
Bogie	Bogie types	Driving bogie	6	
		Trailer bogie	4	
	Bogie weight	M-car	1640 kg	
		Mc-car	1653 kg	
		Tc-car	Front 1639 kg, Rear 1624 kg	

3.1.2 궤도모델 및 물성치

선형매개변수 해석을 위한 궤도구조모델은 자갈도상의 경우는 VAMPIRE상의 기본모델을 활용하였으며, 콘크리트 도상에 대해서는 일부 실험값을 적용하였다. 그리고 레일은 UIC60레일을 적용하였다.

Fig. 4 및 Table 2에서 해석에 사용된 궤도구조모델 및 물성치를 보여주고 있다.

3.1.3 해석조건 및 선형모델링

해석시 선형조건은 현행 국내에서 적용하고 있는 철도건설기준규정(2008)을 바탕으로 하여 도상종류별 최소선형기준을 적용하여 차량의 주행안전성을 검토하였다. 또한 중국선의 형태별, 즉 볼록(convex)/오목(concave)곡선에 대해서도 비교검토를 수행하였으며, 보정캔트의 효과를 분석하기 위해서 보정캔트 유무에 따른 비교검토도 수행하였다.

열차속도에 따른 영향을 분석하기 위해, 해석 시 열차속도는 현재 국내 고속선의 운행속도와 HEMU차량의 최고속도를 고려하여 300km/h, 350km/h, 400km/h에 대해 검토를 수행하였다.

해석시 사용한 필터링은 UIC518OR(2005)의 기준을 바탕으로 적용하였으며, 승차감 평가방법은 BSI(2009)에서 제안하고 있는 P_{CT} 방법을 이용하였다[7,8].

Fig. 4 Track model

Table 2 Track properties

Items	Ballast ¹⁾	Concrete
Track vertical stiffness(MN/m)	100.0	70.0 ²⁾
Track vertical damping(MNs/m)	0.2	0.228 ²⁾
Sleeper-ground lateral stiffness(MN/m)	37.0	∞
Sleeper-ground lateral damping(MNs/m)	0.24	0.24
Rail-sleeper lateral stiffness(MN/m)	43.0	43.0
Rail-sleeper lateral damping(MNs/m)	0.24	0.24

1) Vampire default values[5], 2) Experimental data[6]

다음 식(7) 및 식 (8)는 완화곡선부 승차감 평가방법인 P_{CT} 방법에 대한 실험식을 나타내고 있다.

· 입석(Standing)

$$P_{CT} = \frac{\max(28.54 \cdot \ddot{y} + 20.69 \cdot \ddot{y} - 11.1, 0)}{P_{CT1}} + \frac{0.185 \cdot (\dot{v})^{2.283}}{P_{CT2}} \quad (7)$$

· 좌석(Seated)

$$P_{CT} = \frac{\max(8.97 \cdot \ddot{y} + 9.68 \cdot \ddot{y} - 5.9, 0)}{P_{CT1}} + \frac{0.120 \cdot (\dot{v})^{1.626}}{P_{CT2}} \quad (8)$$

여기서,

P_{CT} : 승차감을 표현하는 승객들의 만족도로 나타낸 백분율(percentage) 단위.

$\ddot{y}$: 차체의 횡가속도의 절대최대 값(m/s²)

$\ddot{y}$: 차체의 횡저크의 절대최대 값(m/s²)

$\dot{v}$: 차체의 롤 속도의 절대최대 값(degree/s)

P_{CT} 은 완화곡선상에서 횡가속도, 횡저크, 롤속도를 고려하여 평가하는 시스템이며 평가기준은 백분율(%)로서, 이 값이 클수록 승차감이 나쁘다는 것을 의미한다. 그리고 본 연구에서는 불리한 조건을 고려하여 입석에 대해서만 평가를

Fig. 5 Superimposition modeling of horizontal/convex curve

Fig. 6 Superimposition modeling of horizontal/concave curve

수행하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 종곡선이 볼록(convex)과 오목(concave)일 경우에 대한 각각의 선형모델링을 보여주고 있고 Table 3과 Table 4는 해석에 사용된 선형조건을 나타내고 있다. Table 4에서 보여주는 선형조건은 보정캔트 유무에 따른 차량의 거동을 비교하기 위해 보정캔트가 없을 때의 캔트를 100mm로 가정하였으며, 보정캔트는 식(5)에 의해 계산된 값을 적용하였다. 열차속도는 보정캔트가 없을 때의 균형속도로 비교분석을 수행하였다.

Table 4의 보정캔트 산정방법은 다음과 같다.

- 자갈도상의 경우
 - 경합시 균형캔트 C' : 206.66mm(식(5)에 의해)
 - 보정캔트

$$\Delta C = \text{경합시 균형캔트}(C') - \text{평면선형 균형캔트}(C)$$

$$= 206.66\text{mm} - 180\text{mm} = 26.66\text{mm}$$
 - 경합시 캔트부족량

$$Cd = Cd_{\text{max}} - \Delta C = 80\text{mm} - 26.66\text{mm} = 53.34\text{mm}$$
- 콘크리트도상의 경우
 - 경합시 균형캔트 C' : 236.33mm(식(5)에 의해)
 - 보정캔트

Table 3 Analysis parameters

Types	Alignment conditions			Remarks
	Items	Ballast	Concrete	
Horizontal curve	Curve radius(m)	6100	5000	Criteria[9]
	Cant(mm)	160	180	
	Cant deficiency(mm)	80	110	
	Transition curve length(m)	400	450	$2.5 \times \Delta C^{(1)}$
	Circular curve length(m)	180	180	Criteria[9]
	Intersection angle(rad)	0.1	0.1	-
Vertical curve	Gradient(%)	5	5	-
	Curve radius(m)	25000	25000	Criteria[9]
	Curve radius(m)	130	130	$\frac{r}{2000} 5 - (-5) $

Table 4 Analysis parameters

Types	Alignment conditions					Remarks
	Items	Compensation cant				
		Ballast		Concrete		
		×	○	×	○	
Horizontal curve	Curve radius(m)	6100	6100	5000	5000	Criteria[9]
	Cant(mm)	100	127	100	127	Supposition
	Cant deficiency (mm)	80	80	110	110	Criteria[9]
	Transition curve length(m)	250	318	250	318	$2.5 \times \Delta C$ [9]
	Circular curve length(m)	180	180	180	180	Criteria[9]
	Train speed (km/h)	305	305	298	298	-
	Effective height(m)	1.6	1.6	1.6	1.6	-
Vertical curve	Gradient (%)	5	5	5	5	Supposition
	Curve radius(m)	25000	25000	25000	25000	Criteria[9]
	Curve radius(m)	130	130	130	130	$\frac{r}{2000} 5 - (-5) $

× : 보정캔트 없음, ○ : 보정캔트 있음

$$\Delta C = \text{경합시 균형캔트}(C') - \text{평면선형 균형캔트}(C)$$

$$= 236.33\text{mm} - 210\text{mm} = 26.33\text{mm}$$

· 경합시 캔트부족량

$$Cd = Cd_{\text{max}} - \Delta C = 110\text{mm} - 26.33\text{mm} = 83.67\text{mm}$$

따라서 위의 두 경우는 경합 시 캔트부족량이 최대허용캔트부족량보다 작으므로 작은 양만큼 캔트를 보정하던지 또는 설정캔트량이 최대캔트량의 제한을 받는다면 속도를 제한하거나 종곡선 반경을 크게 하던지 등의 대책이 필요함을 의미한다.

3.2 해석결과

경합 시 차량의 주행안전성을 검토하기 위해 현재 국내의 철도건설기준규정(2008)의 최소선형조건을 적용하여 경합조건별 해석을 수행하였다. Fig. 7~Fig. 10에서는 도상종별, 경합조건별(평면선형(Horizon), 볼록종곡선경합(Convex), 오목종곡선경합(Concave)) 해석결과를 보여주고 있다.

승차감 분석결과, Fig. 7에서 알 수 있듯이 전반적으로 속도가 높을수록 승차감이 좋지 않음을 알 수 있으며 도상종별 승차감 차이가 확연함을 알 수 있다. 또한 콘크리트도상이 자갈도상에 비해 승차감이 좋지 않은 것으로 나타났다. 종곡선의 형태별로는 볼록 종곡선이 승차감 측면에서 가장 불리한 것으로 나타났으며, 오목 종곡선은 오히려 평면곡선보다 좋은 것으로 나타났다.

Fig. 7 Comparison of ride comforts

Fig. 8 Comparison of derailment ratios

탈선계수는 Fig. 8에서 보듯이 대부분 콘크리트도상이 자갈도상에 비해 크게 나타났으며, 상향가속도 성분으로 인해 볼록곡선의 경우가 가장 불리한 것으로 나타남을 알 수 있었다. 하지만 해석에 사용된 선형조건인 경우 경합여부에 상관없이 대부분 0.8이하로 안전한 것으로 나타났다.

궤도작용력은 Fig. 9와 Fig. 10에서 보듯이 열차속도가 높을수록 궤도에 미치는 힘이 증가하는 것을 알 수 있으며, 콘크리트도상이 자갈도상보다 전반적으로 크게 나타났다. 그리고 횡압은 볼록종곡선이 크게, 윤증은 오목종곡선이 크게 나타남을 알 수 있는데, 이는 볼록종곡선의 경우 상향가속도 성분으로 인해 윤증감소를 야기시키고 힘의 합력이 곡선의 측으로 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 11~Fig. 14에서는 경합시 도상종별 보정캔트의 효과를 분석한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 보정캔트 적용 유무에 따라서는 차량의 주행안전성 및 궤도작용력이 모두 보정캔트가 있는 경우가 좋은 것으로 나타났으며, 특히 승차감의 경우는 크게는 약 2배 정도 좋은 것으로 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 9 Comparison of track shift forces

Fig. 10 Comparison of wheel forces

Fig. 11 Comparison of ride comforts considering compensation cant

Fig. 13 Comparison of wheel loads considering compensation cant

Fig. 12 Comparison of derailment ratios considering compensation cant

Fig. 14 Comparison of track shift forces considering compensation cant

4. 결 론

본 고에서는 평면원곡선과 종곡선의 경합부에 대한 역학적 이론을 바탕으로 경합시 정량적 보정캔트의 필요성에 대해 살펴보고, 이와 더불어 차량의 주행안전성, 승차감 등에 대한 해석적 검토를 수행하여 보정캔트의 효과에 대해 살펴보고자 하였다. 그 결과 보정캔트가 있는 경우가 차량의 주행안전성 및 궤도작용력 모두 좋은 것으로 나타났다. 특히 승차감의 경우는 크기는 약 2배 정도 좋은 것으로 나타남을 알 수 있었다.

따라서 경합시 보정캔트 및 열차한계속도 설정은 경합부에서의 승차감 및 차량의 주행안전성을 향상시키고 궤도에 미치는 영향을 최소화 한다는 것을 해석적으로 알 수 있었으며, 향후 철도건설기준으로 반영할 필요가 있을 것으로 판단된다. 다만 기존운행선상에서의 적용은 적절한 캔트체감 및 완화곡선길이 연장 등의 선형개량 등이 필요할 수 있으므로, 이로 인한 열차운행에 지장이 없는 범위내에서 적용

하여야 할 것으로 판단된다. 그리고 향후에는 다양한 선형조건을 고려한 경합부에서의 실제 동적거동을 면밀히 분석하여 적정보정캔트 설정한계에 대한 보완연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J.H. Um, I.Y. Choi, S.C. Yang, I.H. Lee, et al (2010) Comparative Study on Ride Comfort and Optimum Horizontal Curve Conditions for Superimposition of Vertical and Horizontal Curve, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(6), pp 589-594.
- [2] J.H. Um, S.C. Yang, E.K. Kim, I.Y. Choi, et.al. (2010) A study on evaluation method of ride comfort considering superimposition of vertical and horizontal curve, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(3), pp. 309-316.
- [3] Technical Standard Research Committee for Civil Engineer-

- ing, "Technical standard for railway(Civil Engineering Part), 2002
- [4] Masaharu KUNIEDA(1972), Theoretical Study on the Mechanics of Overturn of Railway Rolling Stock, RTRI, N0 793.
- [5] AEA Technology. VAMPIRE User Manual.
- [6] Korea Railroad Research Institute Report (2009) "A study on determining the replacement cycle for rail fastening systems".
- [7] UIC Code 518-OR (2005) "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour-Safety-Track fatigue-Ride quality", 3rd edition, International Union of Railway
- [8] BSI, "BS EN 12299 Railway applications(2009)-Ride comfort for passengers-Measurement and evaluation".
- [9] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2008), Railway construction standard.
- 접수일(2011년 9월 15일), 수정일(2011년 11월 21일),
게재확정일(2011년 12월 1일)