

곡선부 최적 선형 설계기법에 관한 연구

A Study on Optimum Design for Railway Alignment in Curve

엄주환[†] · 양신추* · 김은겸**

Ju-Hwan Um · Sin-Chu Yang · Eun-Kyum Kim

Abstract In this study, Based on the optimization developed in Um *et al.* (2009), optimum design method of the alignment when building new lines and renewing existing ones is presented. The object function used for optimization is passenger comfort (P_{CT}) which was proposed in BSI (2006). Other aspects of track/vehicle interaction will be treated in boundary conditions. And track/vehicle interaction analysis is performed using KTX-II model. From the analysis results, it was found that the optimum alignments are affected by the angle (I) between adjacent straight lines and $R-L_s$ combinations. Also the dynamic analysis confirms well the results from the simplified analysis. However, In the most cases, the P_{CT} values in the dynamic analysis are higher than the simplified P_{CT} values. If both methods are used when optimizing the alignment, it will be possible to design the alignments more rapidly and reliably.

Keywords : Track alignment, Optimum design, Transition curve, Ride quality

요 지 본 연구에서는 승차감을 목적함수로 하고 궤도부담력을 경계조건으로 하는 곡선부 평면선형의 최적설계 기법을 제시하였다. 평면선형 최적화시 중요한 변수인 곡선반경-완화곡선장은 엄주환 등(2009)에서 제시한 결정방법을 적용하였으며 승차감 평가방법은 영국 BSI(2006)에서 제시하는 곡선부 전용 승차감 평가방법인 P_{CT} 방법을 활용하였다. 또한 한국형 고속전철 G7(KTX-II) 모델을 이용한 차량/궤도선형 상호작용 해석을 수행하였다. 해석결과, 최적선형조건은 교각 I (곡선부 양 끝단 직선과 직선이 만나는 교차각) 크기 및 곡선반경-완화곡선장 조합에 따라 다름을 알 수 있었다. 또한 Kufver(1997) 등에서 제시하는 간략화 해석방법과 유사한 경향이 나타남을 알 수 있었으나, 대부분의 경우 동적해석결과 값이 크게 나타났다. 따라서 곡선부 최적선형 설계시 동적해석과 간략화 해석을 병행한다면 신속하고 신뢰성 높은 최적선형을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

주 요 어 : 선로선형, 최적설계, 완화곡선, 승차감

1. 서 론

현재 국내에서는 기존선 속도향상을 위해 많은 비용과 노력을 기울이고 있다. 고속선의 경우 최고운행속도 350 km/h급 차세대 고속전철을 2015년 운행목표로 개발 중에 있으며, 기존선의 경우 최고운행속도 180km/h급 틸팅열차가 개발되어 2012년 운행목표로 시험운전 중에 있다. 이에 따라 기존 노선의 선형개량여부와 이에 대한 적정선형에

대한 검토의 필요성이 부각되고 있다. 본 연구에서는 신선 건설 및 속도향상에 따른 기존선 개량 시 곡선부 선로선형의 최적설계 방법에 대한 연구를 수행하였다. 곡선부 선로선형 최적설계시 가장 우선적으로 수행해야 하는 부분인 곡선반경-완화곡선장의 최적결정기법에 대한 이론적인 부분은 엄주환 등(2009)에 의해 이미 다룬 바 있다.[1] 따라서 본 논문에서는 고속선로에 대해서 엄주환 등(2009)에서 제시한 방법에 따라 경계조건들을 구하고 현재 운행속도인 300km/h와 속도향상조건인 350km/h에 대해 매개변수해석을 통하여 최적 선형조건들을 검토하고 상관관계를 분석하였다. 검토 시 목적함수는 승차감으로 하였으며, 궤도부담력 및 탈선계수를 경계조건으로 하였다. 승차감 평가방법은 영국 BSI(British Standard Institution, 2006)에서 제시

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
E-mail : jhum@krti.re.kr

TEL : (031)460-5683 FAX : (031)460-5699

* 정회원, 한국철도기술연구원, 수석연구원

** 정회원, 서울산업대학교, 토목공학과 교수

하고 있는 곡선부 전용 평가방법인 P_{CT} 방법을 적용하였으며, [2,4-6] 이를 이용하여 Kufver 등(1997)이 제시한 간략화 해석기법(Simplified method)에 대해 G7(KTX-II)차량모델을 이용하여 비교 검증을 수행하였다[6].

2. 곡선부 승차감 평가의 간략화 해석방법

2.1 곡선부 승차감 평가방법

철도에서의 승차감 평가 방법에는 UIC, ISO 등에서 규정하는 통계적 방법이 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 전체선로를 대상으로 하는 통계적 방법이다. 따라서 여기서는 곡선부 전용 승차감 평가방법으로 영국 BSI(British Standard Institution, 2006)에서 제안하고 있는 P_{CT} 방법을 적용하였다. 다음 식 (1)과 식 (2)에서 P_{CT} 승차감 평가 식을 나타내고 있다.[2]

· 입석(Standing)

$$P_{CT} = \max(28.54 \cdot \ddot{y} + 20.69 \cdot \bar{y} - 11.1, 0) + 0.185 \cdot (\dot{\vartheta})^{2.283} \quad (1)$$

· 좌석(Seated)

$$P_{CT} = \max(8.97 \cdot \ddot{y} + 9.68 \cdot \bar{y} - 5.9, 0) + 0.120 \cdot (\dot{\vartheta})^{1.626} \quad (2)$$

여기서,

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

\ddot{y} : 차체의 횡가속도의 절대최대 값(m/s^2)

\bar{y} : 차체의 횡저크의 절대최대 값(m/s^3)

$\dot{\vartheta}$: 차체의 롤 속도의 절대최대 값(degrees/s)

신호처리: - 2Hz 3dB cut-off frequency low pass filtering

- A gradient of 3dB/octave

- 1초 동안 평균값(Sliding 1-second rectangular window) 적용

P_{CT} 는 완화곡선상에서 횡가속도, 횡저크, 롤속도를 고려하여 평가하는 시스템으로서 평가기준은 Percentage(%)로써, 이 값이 클수록 승차감이 나쁘다는 것을 의미한다.

2.2 간략화 해석방법

Kufver 등(1997)에 의해 제시된 P_{CT} 의 간략화 해석방법은 철도선형 계획자나 궤도기술자에게 빠르고 쉽게 선형, 캔트, 속도증가 등의 승차감에 미치는 주요 변수들을 해석하고 결정할 수 있도록 제시된 방법으로써 궤도틀림에 의한 차량동요의 영향은 고려하지 않는다. 또한 차량의 현가 장치에 의해 발생하는 톨각은 완화곡선부에서 선형적으로

변화한다고 가정한다. P_{CT} 평가를 위한 각 매개변수에 대한 식은 다음과 같이 나타낸다.[6]

$$\ddot{y} = \frac{C_d \cdot f_r}{15} \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{C_d \cdot f_r}{54} \cdot \frac{V}{L_t} \quad (4)$$

$$\dot{\vartheta} = |C - (f_r - 1) \cdot C_d| \cdot \frac{V}{30 \cdot \pi \cdot L_t} \quad (5)$$

여기서, \ddot{y} : 차체 최대 횡가속도

\bar{y} : 차체 최대 횡저크

$\dot{\vartheta}$: 차체 롤속도의 절대최대값

C_d : 캔트부족량(mm)

f_r : 유효롤계수(차량면 횡가속도/궤도면횡가속도, 여기서는 1.2로 가정)

C : 캔트(mm)

L_t : 완화곡선장(m)

V : 열차속도(km/h)

여기서 절대값으로 표현한 것은 곡선상에서 차량이 안쪽(inward) 또는 바깥쪽(outward)으로 롤링할 수 있기 때문이다. 그리고 캔트를 캔트부족량의 함수로서 P_{CT} 를 표현하면 식 (6)과 같으며, P_{CT} 에 대한 실질적인 표현은 식 (7) 및 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\vartheta} = |C_{eq} - f_r \cdot C_d| \cdot \frac{V}{30 \cdot \pi \cdot L_t} \quad (6)$$

- 입석(Standing)

$$P_{CT} = \max(0.1867 \cdot C_d \cdot f_r + 0.0376 \cdot C_d \cdot f_r \cdot \frac{V}{L_t} - 11.1, 0) + 5.75 \cdot 10^{-6} (|C_{eq} - f_r \cdot C_d| \cdot \frac{V}{L_t})^{2.283} \quad (7)$$

- 좌석(Seated)

$$P_{CT} = \max(0.0587 \cdot C_d \cdot f_r + 0.0176 \cdot C_d \cdot f_r \cdot \frac{V}{L_t} - 5.9, 0) + 73.96 \cdot 10^{-6} (|C_{eq} - f_r \cdot C_d| \cdot \frac{V}{L_t})^{1.626} \quad (8)$$

여기서, C_{eq} : 균형캔트(mm)

여기서 Kufver 등(1997)은 식(9)와 같이 전체 P_{CT} 함수의 최소값에 대응하는 최적캔트부족량을 산정하였다. 그러나 식 (7)과 식 (8)에서 식의 첫 번째 항에 의해 연속함수가 될 수 없음에 따라 Kufver 등(1997)은 균형캔트의 크기에 따라 4가지의 경우를 검토하였으며, 그 결과 최적 캔트부족량(C_d^*)을 식 (10), 식 (11)과 같이 제안하였다. Fig. 1에서 최적 캔트부족량 산정의 개념도를 보여주고 있다. 또한 좌석보다 입석 승객에 대한 P_{CT} 를 최소화 하는 것이 합리적

이라고 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 입석에 대해서만 해석을 수행하였다.

$$\frac{dP_{CT}}{dC_d} = 0 \quad (9)$$

- 입석

$$C_d^* = \frac{59.5}{f_r(1+0.2014\frac{V}{L_t})} \quad (10)$$

- 좌석

$$C_d^* = \frac{100.6}{f_r(1+0.2999\frac{V}{L_t})} \quad (11)$$

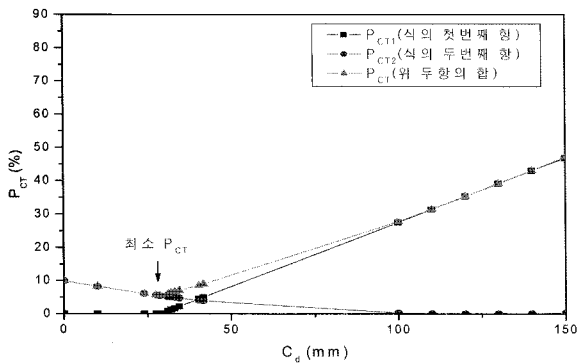


Fig. 1. P_{CT} as a function of cant deficiency (C_d)

3. 차량/궤도선형 상호작용 해석

3.1 해석방법 및 조건

본 연구에서는 차량/궤도선형 상호작용해석을 위해 상용 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 선형 매개변수해석을 수행하였다. 해석에 사용된 차량 모델은 한국형 고속열차인 G7(KTX-II) 모델을 이용하였으며, Fig. 2, 3과 Table 1에서 차량의 모델 및 제원을 나타내었다. 궤도모델은 선형매개변수해석을 위해 VAMPIRE상의 기본모델을 이용하였으며, 레일은 UIC60 레일을 적용하였다. 궤도선형 모델링은 완화곡선구간에서 캔트 및 곡률변화가 선형적으로 이루어진다고 가정하였으며, 완화곡선 시종점의 곡률 변화 시점에서는 응답을 자세히 분석하기 위해 0.001rad/km 단위로 모델링 하여 해석을 수행하였다.

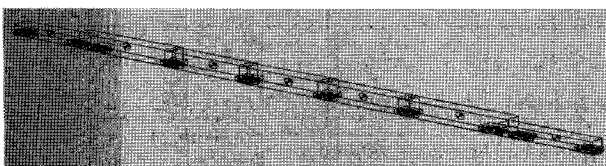


Fig. 2. Model of vehicle by vampire

해석 시 사용한 필터링은 UIC518OR과 Kufver 등(1997)의 기준을 바탕으로 적용 하였다.[3,4] 곡선부의 승차감을 평가하기 위한 각 항목별 평가범위는 BSI(2006)에서는 아래의 범위를 설정하고 있으나, 본 연구에서는 더욱 보수적인 방법으로 진입완화곡선 시작전 1초부터 원곡선 끝단 사이에서 최대값을 채택하여 평가하였다. 승차감 P_{CT} 를 평가하기 위한 횡가속도와 롤속도는 1초 평균값을 사용하였으며, 횡저크는 횡가속도를 시간에 대한 미분 값(\dot{a}_y/dt)으로 정의하였다.

- BSI(2006)의 곡선부 승차감 평가범위
 - 횡가속도
진입완화곡선장+진입완화곡선 끝단에서 1.6초까지
 - 횡저크
진입완화곡선시작전 1.0초 + 진입완화곡선장
 - 롤속도
진입완화곡선 시작에서 끝단까지

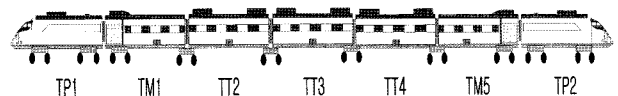


Fig. 3. G7(KTX-II) train

Table 1. Vehicle properties

구분	항목	주요사항	
일반 사항	속도	최고 설계속도	차량 385km/h
		최고 운행속도	350km/h
	편성	편성량 수	7량(2P+2M+3T)
	열차 제원	총 편성 길이	131m
동력차(L×W×H)		22,690×2,814×4,062(mm)	
동력객차(L×W×H)		21,845×2,970×4,055(mm)	
	객차(L×W×H)	18,700×2,970×3,690(mm)	
	궤간	1,435mm	
중량	총중량	영차(W0)	310ton(7량)
		만차(W2)	330ton(7량)
대차	대차수량/형식	구동 대차	6대
		객차 대차	4대 (관절형)
	중심거리	동력차	14,000mm
		객차/동력객차	18,700mm
	스프링하 질량	동력차	2,196kg
동력객차		2,539kg	
	객차	2,142kg	

3.2 해석변수 및 평가기준

본 해석에 사용된 매개변수를 Table 2에서 나타내고 있다. 해석변수는 엄주환 등(2009)에 의해 제시된 곡선반경-완화곡선장 결정기법을 바탕으로, 현 철도건설규칙상의 고속선로 최소기준을 적용하여 속도향상조건서의 최적 개량

범위를 매개변수로 설정하였다.[7]

Table 2. Analysis parameters for vehicle/alignment interaction

열차속도 (km/h)	교각 I(rad)	곡선반경 (m)	완화곡선장 (m)	캔트 (mm)	승차감 (PCT) (Simplified)
300	0.1	4499	500	180**	3.17
		5360	400	155*/180	0.25
		5830	300	141*/180	0.38
		6130	200	135*/180	0.90
		6300	100	138*/180	4.801
		6330	50	145*/180	27.60
350	0.1	4499	500	180**	25.19
		5360	400	155*/180	12.95
		5830	300	141*/180	8.60
		6130	200	135*/180	8.25
		6300	100	138*/180	20.10
		6330	50	145*/180	75.44
300	0.5	4987	500	169*	0.18
		5011	400	169*	0.31
		5030	300	170*	0.61
		5044	200	172*	1.64
		5052	100	180**	9.04
		5054	50	180**	48.50
350	0.5	4987	500	180**	17.20
		5011	400	180**	17.86
		5030	300	180**	19.38
		5044	200	180**	23.24
		5052	100	180**	39.79
		5054	50	180**	97.31

*: 최적조건, **: 철도건설규칙상 최대캔트(최적조건은 아님)

열차속도는 현재최고운행속도와 증속목표속도에 대해 각각 300km/h와 350km/h, 교각은 0.1rad과 0.5rad으로 설정하였다. 캔트는 간략화 해석결과의 최적조건과 최대캔트로 선정하였으며 0.1rad에서는 캔트가 최적조건이 아닌 경우와의 비교를 위해 임의로 최고설정기준인 180mm를 추가로 선정하여 수행하였다.

곡선부의 최적 선형을 결정하기 위해서는 승차감뿐만 아니라 유지보수 측면도 고려하여야 한다. 즉 차량이 궤도에 미치는 영향이 최소화 되도록 설계하여야 하는데 이는 승차감과 동시에 궤도부담력도 최소가 되도록 설계하여야 함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 승차감을 목적함수로 하고 궤도부담력을 경계조건으로 설정하였다. Table 3, 4에서는 각국의 P_{CT} 승차감과 궤도부담력에 대한 기준을 나타내고 있다. 여기서 Table 3의 P_{CT} 승차감 기준은 의무사항은 아니며 참고사항으로 사용되고 있는 값들이다.

Table 3. Passenger comfort (P_{CT}) limit

	횡가속도 (m/s^2)	횡저크 (m/s^3)	롤속도 (deg/s)	PCT (stand)
CEN-ENV13803-1	1.41	0.71	1.6	44.3
프랑스	1.41	0.71	1.6	44.3
독일	1.18	0.54	1.23	34.0
영국	1.18	0.55	2.71	35.6
이탈리아	0.72	0.30	1.77	16.3
스웨덴	0.78	0.36	1.41	19.2
노르웨이	1.25	0.78	1.87	35.9

3.3 해석결과 및 분석

Table 5~Table 6 및 Fig. 4~Fig. 12에서 차량/궤도선형 상호작용 해석결과 및 간략화 해석과의 비교검토 결과를 보여주고 있다. Table 5와 Fig. 4~Fig. 7에서는 교각 $I=0.1rad$ 에 대해서 해석을 수행한 결과이며, Table 6과 Fig. 8~Fig. 11에서는 교각 $I=0.5rad$ 에 대해서 해석을 수행한 결과이다. Fig. 12는 0.1rad과 0.5rad에 대한 모든 승차감 해석결과를 보여주고 있다.

교각 $I=0.1rad$ 의 경우, 승차감지수 P_{CT} 는 열차속도에 따라서 증가하는 경향을 보이고 있으며, 간략화 해석결과 보다 동적해석결과가 P_{CT} 지수가 다소 높게 나타났지만 경향이 매우 유사한 것으로 나타났다. 그리고 승차감 지수가 좋은 최적 $R-L$ 조건을 쉽게 찾을 수 있음을 알 수 있다. 또한 궤도부담력과 탈선계수에 대해서도 속도가 높을수록 크게

Table 4. Criteria of track forces

	UIC 518	CEN	VTI
Wheel force	$V_{lim} < 160km/h, Q_{lim} \leq 200kN$ $V_{lim} > 200km/h, Q_{lim} \leq 190kN$ $V_{lim} > 250km/h, Q_{lim} \leq 180kN$ $250km/h < V_{lim} < 300km/h, Q_{lim} \leq 170kN$ $V_{lim} > 300km/h, Q_{lim} \leq 160kN$	170kN	170kN
Track shift force	$(\Sigma Y_{2m})_{lim} = \alpha(10 + \frac{P_0}{3})$ $P_0 = \text{축중(kN)}, \alpha = 1.0, \text{화물일 경우: } 0.85$	$(\Sigma Y_{2m})_{lim} = \alpha(10 + \frac{P_0}{3})$ $P_0 = \text{축중(kN)}, \alpha = 1.0, \text{화물: } 0.85$	$(\Sigma Y_{2m})_{lim} = \alpha(10 + \frac{P_0}{3})$ $P_0 = \text{축중(kN)}, \alpha = 0.85$
Guiding force	$250m \leq R \leq 600m, Y_{lim} = 60kN$	$250m \leq R \leq 600m, Y_{lim} = 60kN$	$R > 300m, Y_{lim} = 45kN$ $R \leq 300m, Y_{lim} = 55kN$
Climbing ratio	$(Y/Q)_{2m} = 0.8$	$(Y/Q)_{2m} = 0.8$	$(Y/Q)_{2m} = 0.8$

나타났으며 최적 범위를 쉽게 찾을 수 있음을 알 수 있다.

캔트에 따른 영향을 알아보기 위해 간략화 해석결과에서 제시한 최적캔트와 허용 최대캔트일 경우를 비교검토 하였으며, 비교대상 열차속도는 350km/h일 때로 하였다. 그 결과, 같은 조건에서 최적캔트를 적용하였을 때가 승차감과 궤도부담력이 좋은 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 0.1rad의 경우 최적선형범위는 Table 5에서 알 수 있듯이 case2~case4에서 나타났으며, 외국 기준과도 비교할 때 아주 양호한 상태임을 알 수 있다.

교각 $I=0.5rad$ 의 경우에서도 승차감지수 P_{CT} 가 열차속도에 따라서 증가하는 경향을 보이고 있으며, 간략화 해석결과보다 동적해석결과가 P_{CT} 지수가 다소 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 이 경우 또한 동적 해석결과가 간략화 해석결과와 아주 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 승차감 지수가 좋은 최적 $R-L_t$ 조건을 쉽게 찾을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 궤도부담력과 탈선계수에 대해서도 속도가 높을수록 크게 나타났으며 최적 범위를 쉽게 찾을 수 있음을 알 수 있었다. 이 경우 최적선형범위는 Table 6.에서 나타낸 것과 같이 case1~case4의 경우임을 알 수 있었으며, 350km/h의 경우 승차감이 0.1rad보다 전반적으로 크게 나타남을 알 수 있었다.

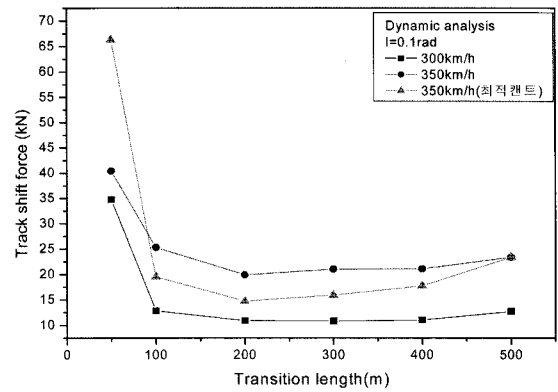


Fig. 6. The result of track shift forces(0.1rad)

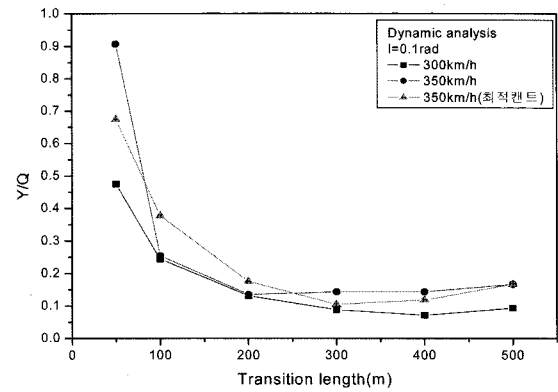


Fig. 7. The result of derailment ratio(0.1rad)

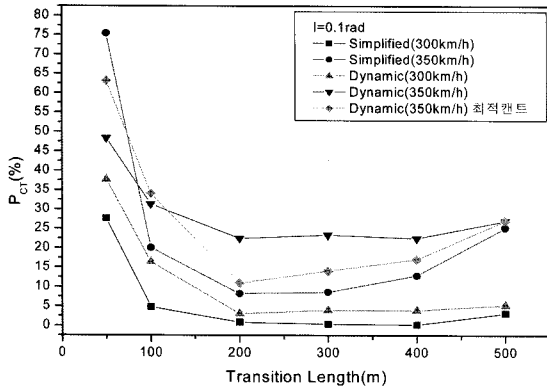


Fig. 4. The result of P_{CT} evaluation(0.1rad)

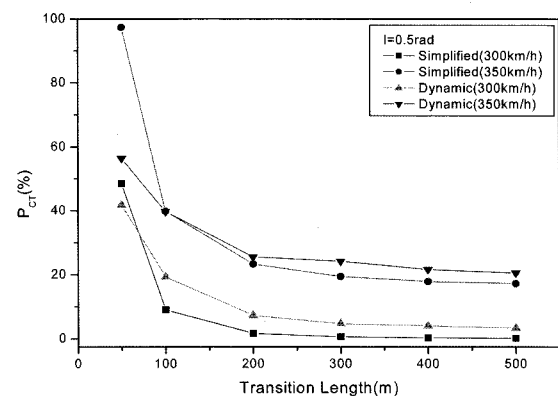


Fig. 8. The result of P_{CT} evaluation(0.5rad)

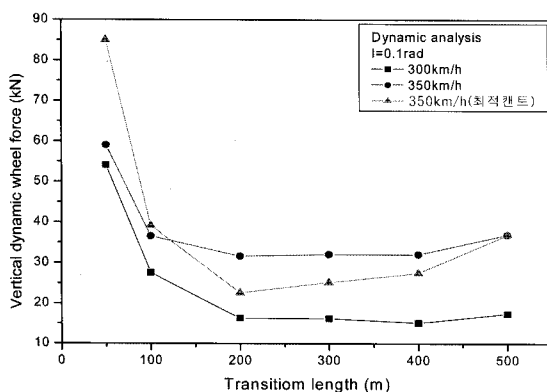


Fig. 5. The result of vertical dynamic wheel forces(0.1rad)

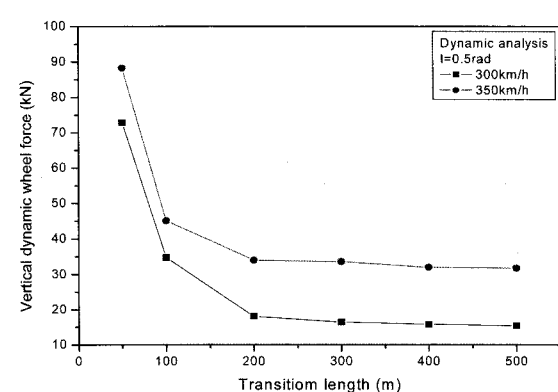


Fig. 9. The result of vertical dynamic wheel forces(0.5rad)

Table 5. The results of vehicle/track alignment interaction analysis(I=0.1rad)

항목	곡선반경 R(m)	완화곡선 L(m)	교각 I(rad)	원곡선 Lc(m)	속도 (km/h)	켄트 C(mm)	횡가속도 \ddot{y} (m/s ²)	횡저크 \ddot{y} (m/s ³)	롤속도 $\dot{\theta}$ (deg/s)	P _{CT}		최대 동적운중 (kN)	최대 Guiding F(kN)	최대횡압 (2m)kN	Y/Q (2m)
										Simplified	Dynamic				
Case1	4499	500	0.1	180	300	180	0.478	0.119	1.23	3.17	5.29	17.40	8.43	12.70	0.093
					350		1.130	0.259	1.35	25.20	27.00	36.90	19.10	23.40	0.166
Case2	5360	400	0.1	180	300	155	0.392	0.166	1.36	0.25	3.90	15.10	7.03	11.00	0.071
					350	155	0.947	0.295	1.46			12.90	22.50	16.60	21.10
					180	180	0.773	0.263	1.77	17.10	27.50		13.20	17.70	0.118
Case3	5830	300	0.1	280	300	141	0.374	0.184	1.64	0.38	3.95	16.20	7.74	10.80	0.088
					350	141	0.915	0.372	1.77			8.60	23.40	17.00	21.00
					180	180	0.625	0.287	2.41	14.10	25.20		11.10	15.90	0.105
Case4	6130	200	0.1	413	300	135	0.344	0.156	2.23	0.89	3.09	16.30	11.40	10.90	0.131
					350	135	0.856	0.372	2.49			8.25	22.50	15.80	19.90
					180	180	0.496	0.216	3.61	11.00	22.70		14.60	14.70	0.175
Case5	6300	100	0.1	530	300	138	0.432	0.531	3.91	4.80	16.40	27.60	21.50	12.80	0.244
					350	138	0.925	0.577	3.87			20.09	31.30	36.60	21.40
					180	180	0.745	0.963	3.87	34.10	39.20		25.50	19.50	0.377
Case6	6330	50	0.1	583	300	145	0.658	1.280	3.63	27.60	37.70	54.10	38.10	34.80	0.474
					350	145	1.100	1.200	3.50			75.40	48.40	59.00	38.10
					180	180	1.097	1.800	4.49	63.10	85.00		67.70	66.30	0.674

Table 6. The results of vehicle/track alignment interaction analysis(I=0.5rad)

항목	곡선반경 R(m)	완화곡선 L(m)	교각 I(rad)	원곡선 Lc(m)	속도 (km/h)	켄트 C(mm)	횡가속도 \ddot{y} (m/s ²)	횡저크 \ddot{y} (m/s ³)	롤속도 $\dot{\theta}$ (deg/s)	P _{CT}		최대 동적운중 (kN)	최대 Guiding F(kN)	최대횡압 (2m)kN	Y/Q (2m)
										Simplified	Dynamic				
Case1	4987	500	0.5	1994	169	300	0.386	0.155	1.06	0.18	3.35	15.4	6.88	11.20	0.079
					180	350	0.916	0.242	1.39			17.19	20.50	31.8	15.90
Case2	5011	400	0.5	2106	169	300	0.392	0.173	1.31	0.31	4.01	15.8	7.00	11.60	0.080
					180	350	0.914	0.298	1.39			17.86	21.60	32.0	16.10
Case3	5030	300	0.5	2215	170	300	0.380	0.205	1.78	0.61	4.68	16.4	9.64	11.00	0.110
					180	350	0.929	0.377	2.05			19.38	24.20	33.6	17.30
Case4	5044	200	0.5	2322	172	300	0.385	0.277	2.60	1.64	7.26	18.1	14.10	11.90	0.161
					180	350	0.927	0.388	2.92			23.24	25.50	34.0	17.90
Case5	5052	100	0.5	2426	180	300	0.443	0.672	3.77	9.04	19.30	34.8	22.70	15.10	0.258
					180	350	1.100	0.797	3.31			39.79	39.70	45.1	34.50
Case6	5054	50	0.5	2477	180	300	0.644	1.640	1.69	48.47	41.80	72.8	42.70	49.00	0.635
					180	350	1.190	1.600	1.50			97.31	56.40	88.2	63.50

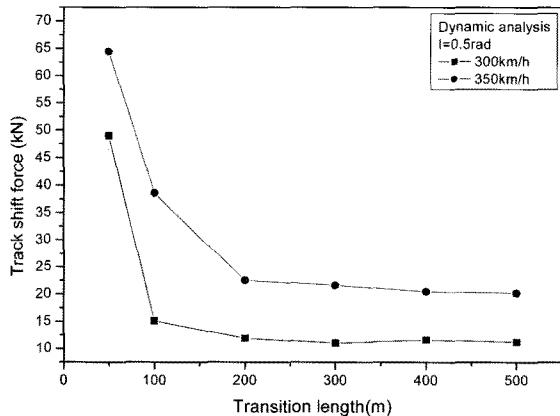


Fig. 10. The result of track shift forces(0.5rad)

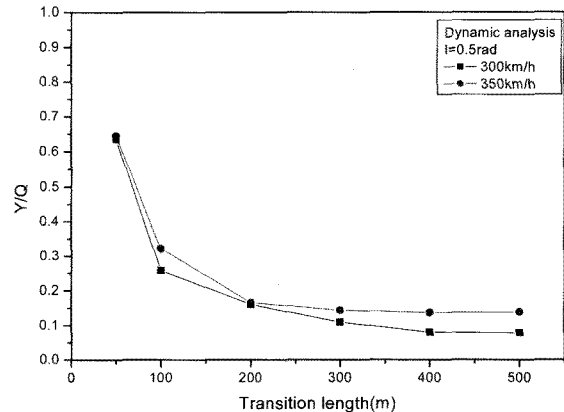


Fig. 11. The result of derailment ratio(0.5rad)

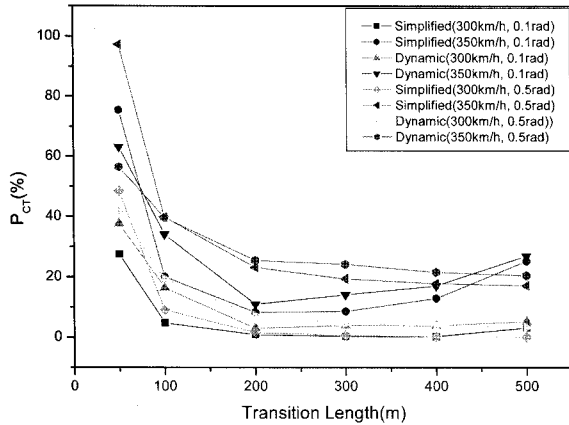


Fig. 12. The result of P_{CT} evaluation(0.1/0.5 rad)

4. 결론

본 연구에서는 승차감을 목적함수로 하고 궤도부담력을 경계조건으로 하는 곡선부 평면선형의 최적설계 기법을 제시하였다. 이를 위해 최적 곡선반경-완화곡선장에 대한 변수는 엄주환 등(2009)에서 제시한 결정방법을 적용하였다. 그리고 한국형 고속전철 G7(KTX-II)모델을 이용한 차량/궤도선형 상호작용 해석을 통한 매개변수 연구를 수행하였다. 또한 BSI 및 Kufver 등(1997)이 제시하는 간략화 해석 방법과 비교분석 하였으며, 이 두 방법을 이용한 최적선형 결정방법을 제시하였다.

본 연구의 수행결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

i) 대부분의 경우 차량/궤도선형 상호작용 해석결과와 간략화 해석결과가 아주 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

ii) 동일한 교각(I)일 때는 완화곡선장이 길다고 해서 승차감 및 궤도부담력이 좋아지는 것은 아니며, 교각 I 의 크기 및 최적 곡선반경-완화곡선 조합에 따라 최적 승차감 및 궤도부담력이 좋아지는 최적 선형조건이 다름을 알 수 있었다.

iii) 그리고 $R-L_t$ 경계조건 내에서 완화곡선이 극히 짧은 경우에는 대부분 승차감 및 궤도부담력이 상대적으로 아주 나쁜 것으로 나타나는 것을 알 수 있었으며, 교각 I 가 클수록 승차감이 다소 나쁜 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서 제시한 곡선부 최적선

형 결정기법은 속도향상을 위한 곡선부 선형개량 시 혹은 신선건설시 승차감과 경제성을 고려한 최적선형조건을 쉽게 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 결정기법은 일반적인 모든 곡선부 선형설계 시에 적용가능하며 각국의 기준을 반영하면 해당국가의 기준에 맞는 최적범위를 결정할 수 있다. 그리고 BSI(2006)에서 제시한 간략화 평가 방법 또한 간단하고 신속한 검토 및 최적선형 결정시에 동적해석을 수행하기 전, 1차 검토방법으로서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 곡선부 최적선형설계시 동적해석과 간략화 해석을 병행한다면 신속하고 신뢰성 높은 최적선형을 결정할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 결정기법을 통해 향후 추가적인 매개변수 연구를 통하여 국내기준에 적합한 곡선부 선형 설계차트 형식의 제작이 가능하며 이로 인한 설계시간 단축 및 많은 비용절감 효과가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 차세대 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 엄주환, 김은겸, 양신추(2009), "곡선부 선형 최적설계를 위한 적정 곡선반경-완화곡선장 결정기법 연구," 한국철도학회논문집, 제12권 제2호, Vol. 12, No. 2.
2. Draft BS EN 12299 Railway applications(2006), "Ride comfort for passengers-Measurement and evaluation."
3. 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.
4. Bjorn Kufver(1997), "Variables and criteria for evaluation of vehicle reactions caused by railway alignment," VII report 43-97.
5. ERRI/FACT(2004), "Tracks for tilting trains," Deliverable D3.
6. Bjorn Kufver(1997), "Optimization of single horizontal curves in railway alignments," VII report 424A.
7. 국토해양부(2005), "철도건설규칙(해설)."

접수일(2009년 6월 29일), 수정일(2009년 7월 8일),
 게재확정일(2009년 8월 7일)