Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 10 pp. 345-353, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.10.345
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

일반철도의 저속 및 고속열차 혼용구간 최소곡선반경 및 설정캔트범위 검토

이재혁[1], 김정혁[2], 박용걸[2*]
[1]서울과학기술대학교 글로벌철도시스템학과, [2]서울과학기술대학교 철도건설공학과

Review of Minimum Curve Radius and Cant Range Setting for Mixed Section of Low and High speed Trains in Conventional Railway Line

Jae-Hyuk Lee[1], Jeong-Hyeok Kim[2], Young-Gul Park[2*]
[1]Division of Global Railway System, Seoul National University of Science & Technology
[2]Division of Railway Construction, Seoul National University of Science & Technology

요 약 일반철도의 경우 운행속도가 다양한 여객열차와 화물열차가 혼용되기 때문에 차량이 곡선구간을 주행할 경우에는 승객의 승차감과 열차의 주행안전성을 확보하기 위하여 최소곡선반경을 설정하고 운행속도에 적합한 균형캔트, 부족캔트 및 초과캔트 설정범위를 만족하는 캔트를 설정하여야 한다. 본 논문에서는 선로의 곡선반경, 캔트, 열차속도의 상관관계를 분석하여 열차종별 운행속도, 부족캔트와 초과캔트에 대한 기준을 만족하는 캔트범위를 분석하고 곡선반경에 대한 현재 설계기준의 적정성을 검토하여 최적의 최소곡선반경을 제시하고자 한다. 또한, 회귀분석을 통한 열차혼용시 운행 빈도에 따른 열차운행속도를 산정하여 고속열차 횟수비에 따른 균형캔트와 곡선반경별 설정캔트 범위를 산정하였다. 위의 결과를 바탕으로 최소곡선반경과 설정캔트의 적정범위를 제시함으로써 노반과 궤도설계에 반영하여 운영노선의 속도향상, 부족캔트에 의한 승차감저하 및 탈선위험을 방지하고, 초과캔트에 의한 하중편중을 최소화하여 곡선선로를 주행하는 열차의 주행안전성 확보와 선로유지관리 효율성을 향상하고자 하였다.

Abstract On conventional railway lines, trains with different speeds are operated. Therefore, trains moving on curved sections with cants must accept various ranges of balanced cants, cant deficiency, and cant excess, which is essential for the comfort and safety of train operation. In this study, the correlation between the curve radius, cant, and train speed on a track was analyzed to check the cant range that satisfies the criteria of train types, operation speed, cant deficiency, and cant excess. Also, the range of setting the cant by the curve radius and balanced cant were calculated by a regression analysis of train speed according to the frequency of operation in the case of mixed trains. The results could make it possible to improve the speed of the operation route, reduce the loss of ride quality, reduce the risk of derailing caused by cant deficiency, and minimize the load deflection by excess cant. This will ensure the safety of trains running on curves and improve the efficiency of track maintenance.

Keywords : Conventional Railway, Mixed Train, Setting Cant, Cant Deficiency, Minimum Curve Radius

*Corresponding Author : Young-Gul Park(Seoul National University of Science & Technology)
email: ygpark@seoultech.ac.kr
Received September 2, 2020 Revised September 29, 2020
Accepted October 5, 2020 Published October 31, 2020

1. 서론

국가철도망 구축계획에서는 주요 거점간 고속이동 서비스를 제공하기 위하여 고속철도 수혜지역 확대, 고속화 일반철도 신설 및 선형을 개량중이며[1], 운행 중에 있는 기존철도의 열차운행속도 향상을 위하여 고속차량 투입과 선형개량 및 노반, 궤도, 시스템 등의 시설개량을 시행하고 있다. 저·고속열차를 혼용 운행하는 일반철도 신설노선이나 기존 선형을 개량할 경우 최소곡선반경의 산정과 캔트설정은 운행차량의 속도에 따라 열차운행의 안전성과 승차감 및 궤도의 부담력에 영향을 준다.

현재 철도선로 최소곡선반경에 대한 설계기준은 설계속도가 230km/h 이상인 저·고속열차 혼용구간에서 고속열차의 최대부족캔트 기준을 초과하거나 저속열차의 초과캔트 기준을 위반하게 되므로 최소곡선반경을 확대 적용하여야한다. 또한, 사업계획수립이나 사전조사 및 타당성조사 단계에서는 주변현황 및 각종 조사가 충분하게 이루어지지 않는 단계로서 도상형식 결정이 어려우므로 자갈도상에 준하여 곡선반경을 크게 설정하여 향후 설계시 노선의 변경이나 지장물 저촉 및 민원을 방지하도록 하여야 한다.

본 연구에서는 열차운행속도에 적합한 곡선반경 및 캔트설정을 위하여 선로의 곡선반경, 캔트, 열차속도의 상관관계를 분석하여 열차종별 운행속도, 부족캔트와 초과캔트에 대한 기준을 만족하는 캔트범위를 설계속도와 도상형식별로 검토하고 현재 설계기준의 적정성을 검토하여 최적의 최소곡선반경을 제시하였다. 또한, 회귀분석을 통한 열차 혼용시 운행빈도에 따른 열차운행속도를 산정하여 고속열차 횟수비에 따른 균형캔트와 곡선반경별 설정캔트 범위를 산정하였다.

2. 곡선 및 캔트관련 국내·외 기준

2.1 곡선반경

곡선반경은 열차운행의 안전성 및 승차감을 확보할 수 있도록 설계속도 등을 고려하여 식(1)에 의하여 Table 1의 값 이상으로 한다[2].

$$R \geq \frac{11.8V^2}{C_{max}+C_{d,max}} \quad (1)$$

여기서, R : 곡선반경(m), V : 설계속도(km/h), C_{max}: 최대설정캔트(mm), $C_{d,max}$:최대부족캔트(mm)

Table 1. Minimum Curve Radius

Design Speed V(km/h)	Minimum curve radius(m)	
	Ballast track	Concrete track
350	6,100	4,700
300	4,500	3,500
250	3,100	2,400
200	1,900	1,600
150	1,100	900
120	700	600
$V \leq 70$	400	400

Note) Values other than the above shall be calculated according to the following equation by applying maximum applied cant and maximum cant deficiency in Article 7

2.2 캔트

곡선구간의 궤도에는 열차의 운행 안전성 및 승차감을 확보하고 궤도에 주는 압력을 균등하게 하기 위하여 다음 식(2)에 의하여 산출된 캔트를 두어야 하며, 이때 설정캔트 및 부족캔트는 다음 Table 2의 값 이하로 한다[3].

$$C = 11.8\frac{V^2}{R} - C_d \quad (2)$$

여기서, C : 설정캔트(mm), V : 설계속도(km/h), R : 곡선반경(m), C_d : 부족캔트(mm)

Table 2. Maximum setting Cant and Cant deficiency

Design Speed V(km/h)	Ballast track		Concrete track	
	Maximum setting cant (mm)	Maximum cant deficiency (1) (mm)	Maximum setting cant (mm)	Maximum cant deficiency (1) (mm)
$200 < V \leq 350$	160	80	180	130
$V \leq 200$	160	100 (2)	180	130

(1) Maximum cant deficiency shall be applied only when a transition curve exists, or when cant deficiency is gradually increased.
(2) If upgrading to a high-speed railroad, maximum cant deficiency may be up to 120 mm.

열차의 실제 운행속도와 설계속도의 차이가 큰 경우에는 다음 공식에 의해 초과캔트를 검토하여야 하며, 이때 초과캔트는 110밀리미터를 초과하지 않도록 한다[3].

$$C_e = C - 11.8\frac{V_o^2}{R} \quad (3)$$

여기서, C_e : 초과캔트(mm), C : 설정캔트(mm), V_o : 열차의 운행속도(km/h), R : 곡선반경(m)

2.3 곡선구간에 열차속도와 캔트의 상관관계

원심가속도와 중력가속도의 합력이 궤간의 중심을 향하는 가장 바람직한 상태가 되는 때의 캔트를 균형캔트(평형캔트, 이론캔트)라 하며, 선로의 곡선반경은 열차의 속도와 균형캔트에 따라 다음의 상관관계를 가지고 있다[3].

캔트의 이론공식은 식(4)와 같다.

$$C = \frac{G \cdot V^2}{g \cdot R} = \frac{G \cdot V^2}{127 \cdot R} \quad (4)$$

여기서, C : 이론캔트량(mm), G : 궤간(차륜과 레일접촉면과의 거리), V : 열차속도(km/hr), g : 중력가속도($9.8m/\sec^2$), R : 곡선반경(m), 이며 식(4)에 $G = 1{,}500mm$를 대입하면 아래와 같다.

$$C = 11.8\frac{V^2}{R} \quad (5)$$

$$R = 11.8\frac{V^2}{C} = 11.8\frac{V^2}{Cm + C_d} \quad (6)$$

$$V = \sqrt{\frac{Cm + Cd}{11.8}} \cdot \sqrt{R} \quad (7)$$

여기서, Cm : 설정최대 캔트량(mm), Cd : 부족캔트량(mm)

2.4 캔트적용을 위한 곡선구간의 열차운행속도

2.4.1 열차운행속도 결정방법

캔트는 곡선반경과 통과속도에 의하여 정해지지만 일반적으로 그 곡선을 통과하는 열차의 속도는 다양하기 때문에 캔트설정에 있어서는 평균속도를 어떻게 정하는가가 문제이다. 캔트 설정을 위한 곡선구간 열차운행속도 결정에는 다음과 같은 방법이 있다[4].

(1) 최고속도를 설계속도로 하는 방법

$$V_d = V_{\max} \quad (8)$$

여기서, V_d : 적용속도(km/h), $V_{\max}$: 최고속도(km/h)

(2) 통과속도의 평균치를 산술평균하는 방법

$$V_d = \sqrt{\frac{V_{\max} + V_m}{2}} \quad (9)$$

여기서, V_d : 적용속도(km/h), V_m : 평균속도(km/h), $V_{\max}$: 최고속도(km/h)

(3) 열차종별 평균방법

① 일반 자승평균법

$$V_d = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 \cdots V_n^2}{N}} = \sqrt{\frac{\Sigma V^2}{\Sigma N}} \quad (10)$$

여기서, V_d : 적용속도(km/h), V_n : 열차별 운행속도(km/h), N : 전체 열차수

② 열차종별 자승평균법

$$V_d = \sqrt{\frac{n_1 V_1^2 + n_2 V_2^2 + n_3 V_3^2 \cdots n V_n^2}{N}} = \sqrt{\frac{\Sigma n V^2}{\Sigma N}} \quad (11)$$

여기서, n : 열차종별 통과수, V : 열차종별 속도(km/h), N : 전체 열차수

2.4.2 열차운행속도 적용

고속 및 저속열차 등 다양한 종류의 열차가 운행되는 곡선부 선로의 캔트설정을 위한 운행속도는 해당 곡선의 열차최고속도 또는 운전선도를 바탕으로 열차별 곡선구간의 통과속도를 구한 후 고속열차와 저속열차와의 운행빈도를 고려한 다음 한국철도시설공단 “철도설계지침 및 편람”(KR C-14020 궤도선형 및 배선)의 자승평균법을 기준으로 산출하여 적용한다.

단일열차 종류로 운행되는 도시철도나 광역철도 전용선의 경우 노반설계는 해당곡선 최고속도로 하고 궤도설계는 운전선도에 의한 열차운행속도를 적용한다. 다만, 정거장 전후에는 속도의 저감을 고려하여 적용할 수 있다.

3. 저·고속열차 혼용선 캔트 및 곡선반경 설정

3.1 최소곡선반경 및 캔트설정검토

신설 및 개량노선의 설계속도는 해당선로의 경제적·사회적 여건, 건설비, 선로의 기능 및 향후 교통수요 등을 고려하여 정하고 있으나, 최고속도는 차량성능, 선로조건, 전차선, 신호시스템 조건, 승차감, 소음•진동과 운영상의 각종 속도제한 등의 제약요인에 따라 결정하고 있다.

곡선선로의 통과속도, 전복위험, 승차감, 레일의 마모 등을 고려하여 부족캔트, 초과캔트 규정범위 이내에서 캔트를 설정하고 최소곡선반경 이상으로 곡선을 설치한다.

3.1.1 최소곡선반경 설정검토

곡선반경은 열차운행선구의 기능, 열차속도와 여객과 화물의 수송량에 따른 열차운행계획 등을 고려하여 평균속도를 산정하고 도상형식에 적합한 캔트와 곡선반경으로 평면선형을 계획한다.

특히, 우리나라의 철도는 고속선을 제외한 일반의 경우 여객열차와 화물열차를 혼용하기 때문에 차량이 곡선구간을 주행할 때 승객의 승차감과 차량의 안전을 위하여 설정최대캔트와 부족캔트, 초과캔트를 기준하여 최소곡선 반경 크기를 정하다[2].

최대운행속도(V_{max})와 곡선반경(R) 및 설정캔트(C)와 부족캔트(C_d)에서 최소곡선반경은 식12와 같다.

$$R \geq \frac{11.8\,V_{max}^2}{C+C_d} \tag{12}$$

최소운행속도(V_{min})와 곡선반경(R) 및 설정캔트(C)와 초과캔트(C_e)에서 최소곡선반경은 아래 식 13과 같이 정의할 수 있다.

$$R \leq \frac{11.8\,V_{min}^2}{C-C_e} \tag{13}$$

그러므로 곡선반경은 열차의 운행속도와 설정캔트(C), 부족캔트(C_d) 및 초과캔트(C_e)의 한계값에 따라 다음과 같은 관계식이 만족되도록 식(14)와 같이 결정되어야 한다.

$$\frac{11.8\,V_{max}^2}{C+C_d} \leq R \leq \frac{11.8\,V_{min}^2}{C-C_e} \tag{14}$$

3.1.2 캔트 설정 검토

기존선의 속도향상과 유지보수관리, 승차감 등 궤도정비에 필요한 실제 캔트의 설치는 여객열차와 화물열차의 운행빈도, 열차종별 평균속도, 도상형식을 기준하여 설정해야 한다. 부족캔트와 초과캔트를 만족하는 최소곡선반경에서 설정캔트(C)는 식(15)와 같다.

$$C = \frac{C_e \times V_{max}^2 + C_d \times V_{min}^2}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \tag{15}$$

이때 열차빈도에 따른 평균속도의 캔트는 최고운행속도에 대한 부족캔트 범위를 초과하거나 최소운행속도에 대하여 초과캔트 범위를 벗어날 수 있으므로 Fig. 1과 같이 고속열차 열차빈도에 따른 운행속도에 따라서 설정캔트는 부족캔트와 초과캔트 기준 범위 내의 교집합 구간에 설정하도록 하여야 한다.

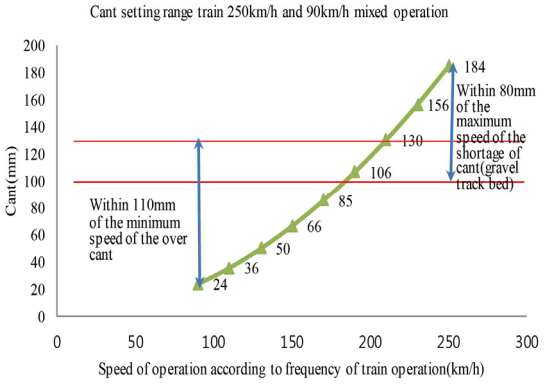


Fig. 1. Maximum setting cant

3.2 운행속도 설정

일반철도는 여객과 화물, 전동열차를 혼용운행하고 있으므로 열차의 속도를 일률적으로 규정하기 어려우며, 유지관리를 위해 고속 및 저속 열차의 속도를 고려하여 적정한 캔트를 설정하여야 하는데 이때의 적절한 캔트를 설정캔트라 한다.

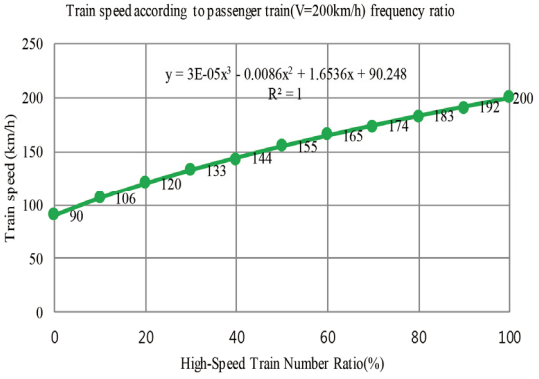
고속 및 저속열차가 통과하는 노선에서는 속도의 자승으로 그 속도에 맞는 캔트량을 구하기 때문에 고속열차는 캔트가 부족하고 저속열차는 캔트가 초과된다. 이때 고속열차의 부족한 캔트를 부족캔트라 하며, 저속열차의 과다한 캔트를 초과캔트라 한다.

캔트가 과다할 경우 열차하중이 안쪽레일로 편기하여 내측레일을 손상시키고 궤간확대 및 정차시 전복의 위험이 있으며, 캔트가 부족할 경우 열차 하중은 원심력에 의해 바깥쪽 레일에 편기하여 외측레일을 손상하거나 탈선의 우려가 있으므로, 캔트의 과부족은 열차운행 안전성, 승차감저하, 궤도손상, 열차의 탈선 및 전복에 영향을 미치므로 캔트부설시 적정 범위를 설정하도록 하여야 한다[5-7].

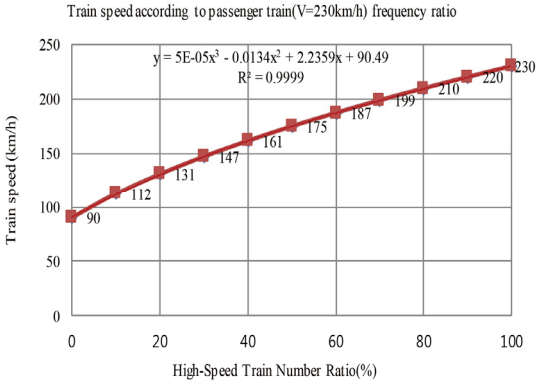
고속열차, 저속열차 등 다양한 종류의 열차가 운행되는 선로의 곡선부 캔트설정을 위한 운행속도는 해당곡선의 열차 최고속도 또는 운전선도를 바탕으로 열차별 곡선구간의 통과속도를 구한 후 고속열차나 저속열차와의 운행빈도를 고려한 자승평균법을 기준으로 식(11)에 의하여 산출하며, 고속열차와 화물열차(90km/h) 혼용시 횟수비에 따른 운행속도는 Table 3과 Fig. 2와 같다.

Table 3. Operation speed according to operation ratio during high speed train and cargo train are mixed

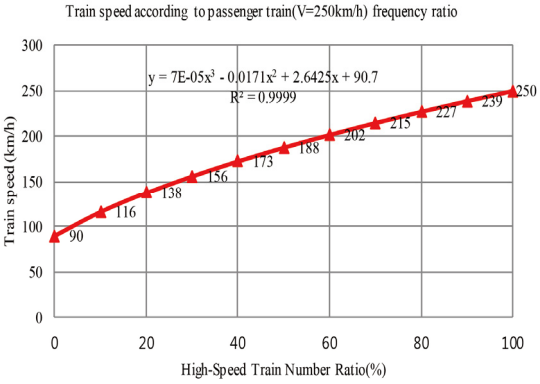
Operation ratio of high speed train(%)	200km/h	230km/h	250km/h	300km/h
0	90	90	90	90
10	106	112	116	128
20	120	131	138	156
30	133	147	156	181
40	144	161	173	202
50	155	175	188	221
60	165	187	202	239
70	174	199	215	256
80	183	210	227	271
90	192	220	239	286
100	200	230	250	300



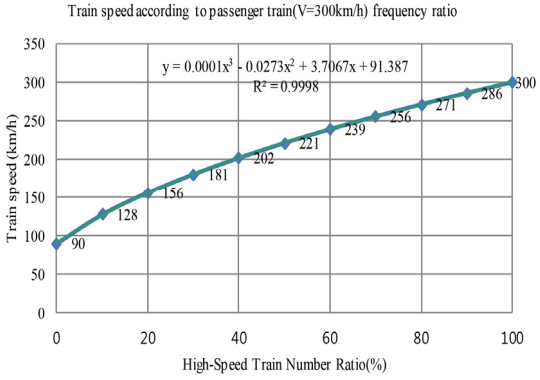
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. Train operation speed comply with high speed train operation ratio
(a) Train speed according train(V=200km/h) frequency ratio
(b) Train speed according train(V=230km/h) frequency ratio
(c) Train speed according train(V=250km/h) frequency ratio
(d) Train speed according train(V=300km/h) frequency ratio

3.3 최소곡선반경 설정

곡선반경은 열차운행의 안전성 및 승차감을 확보 할 수 있도록 설계속도 등을 고려하여 설정하며, 가능한 직선으로 계획하여야 하며, 지형과 각종 지장물 등으로 인해 방향이 전화되는 지점에서 곡선을 삽입한다. 곡선반경은 향후 속도상승, 운전 및 선로보수 측면을 고려하여 선형제약 조건이 허락하는 범위에서 가능한 크게 하여야 한다.

철도의 건설기준에 관한 규정 제6조 “곡선반경”에서 본선의 곡선반경은 설계속도에 따라 다음 Table 4의 값 이상으로 제시하고 있다.

Table 4. Minimum curve radius

Design speed (km/h)	Minimum curve radius (m)	
	Ballast track bed	Concrete track bed
350	6,100	4,700
300	4,500	3,500
250	3,100	2,400
200	1,900	1,600
150	1,100	900
120	700	600
$V \leq 70$	400	400

위 값은 철도의 건설기준에 관한 규정 제7조"캔트"의 최대설정캔트와 최대부족캔트를 적용하여 산출한 값이다.

$$R \geq \frac{11.8\,V^2}{C_{\max}+C_{d,\max}} \tag{16}$$

위 식(16)은 단일열차가 운행하는 고속선구에서는 문제가 되지 않으나 여객과 화물의 고속과 저속열차가 운행하는 선구에서는 저속열차에 의한 초과캔트를 검토하여 곡선반경을 식(15)가 만족되도록 결정되어야 한다.

Table 5. Track bed type and cants of each curve radius during passenger(design speed 250km/h)train and cargo traing are mixed

track bed type	curve radius (m)	operation speed (km/h)		average speed (km/h)	setting cant (mm)	cant deficiency (mm)	over cant (mm)	Remark
		high speed (passenger)	low speed (cargo)					
gravel track bed	2,400	250	90	188	160	**147**	**121**	N.G
	3,100[1]	250	90	188	130	**107**	100	N.G
	3,100	**230**[2]	90	175	130	71	100	O.K
	3,100	250	**120**[3]	196	160	77	106	O.K
	3,400[4]	250	90	188	136	80	108	O.K
concrete track bed	2,400[5]	250	90	188	170	**137**	**131**	N.G
	2,400	**230**[6]	90	175	140	120	101	O.K
	2,400	250	**120**[7]	196	180	127	110	O.K
	2,700[8]	250	90	188	145	128	110	O.K
application	3,400[9]	250	90	188	130	86	102	O.K

1), 5) When setting the minimum curve radius on gravel and concrete track, the cant standard is exceeded when setting the cant suitable for the speed of operation.
2), 6) To meet the criteria for deficient and over cant, the speed of the high speed train must be lowered from 250 km/h to 230 km/h.
3), 7) It is necessary to raise the speed of the low speed train from 90 km/h to 120 km/h to meet the standard of deficient and over cant.
4), 8) Minimum curve radius that meets the criteria for lack of maximum and minimum operation speed and excess cants
9) Minimum curve radius to be applied before determining the shape of the diagram when conducting a preliminary survey or preliminary feasibility study for establishing a business plan

여객과 화물이 혼용 운행하는 선구의 자갈도상, 콘크리트도상에서의 설계속도에 따른 설정캔트, 부족캔트, 초과캔트에 적합한 곡선반경을 분석한 결과 Table 5와 같다.

이상과 같이 설계속도 200km/h이하 구간에서는 저·고속열차 혼용구간에서도 최소곡선반경 기준을 만족하나 설계속도 230km/h, 250km/h, 300km/h구간에서는 고속 여객열차와 저속의 화물열차 혼용시 최소곡선반경은 현 설계기준보다 크게 설정하여야 할 것이다. 그렇지 않으면 위 Table 4에서와 같이 고속열차의 속도를 하향하거나 저속의 화물열차 운행속도를 향상하는 방안을 강구하여야 한다. 특히 사업계획 수립단계, 사전조사나 타당성조사 단계에서는 주변현황조사, 측량 및 지반조사가 충분치 않아 콘크리트 도상형식 결정이 어려우므로 최소곡선 반경을 자갈도상에 준하여 크게 설정하여 계획하는 것이 향후 상세설계시 노선의 변경이나 지장물 저촉배제 및 민원예방에 유리할 것이다.

3.4 적정 캔트범위 설정

(1) 열차속도별 설정캔트 적용예(R=4,000m 기준)

단일열차로 운행하는 전용선의 경우 노반설계는 해당 곡선의 최고속도로 하고 궤도설계는 운전선도에 의한 열차운행속도를 적용하여 캔트를 설정하고 있으며, 정거장 전후에는 속도의 저감을 고려하여 적용하고 있다. 저고속 혼용열차의 설정캔트는 열차 최고속도와 최저속도에서 최대 부족캔트 및 최대 초과캔트 이내로 설정하여야 한다.

① 고속열차(250km/h)에 대한 균형캔트는

$$\text{균형캔트}(C_{eg}) = 11.8 \times \frac{V^2}{R} = 11.8 \times \frac{250^2}{4{,}000} = 184\text{mm}$$

② 저속열차(90km/h)에 대한 균형캔트는

$$\text{균형캔트}(C_{eg}) = 11.8 \times \frac{V^2}{R} = 11.8 \times \frac{90^2}{4{,}000} = 24\text{mm}$$

③ 운행횟수비에 따라 Table 7와 같이 균형캔트는 $24mm \leq C_{eg} \leq 184mm$이므로 부족캔트(80mm)와 초과캔트(110mm) 기준을 만족하는 설정캔트는 $184-80 < C \leq 24+110$ 범위 내에 있어야 하므로, 설정캔트는 $104 \leq C \leq 134$로 설정한다.

3.5 혼용열차 운행구간의 최소곡선반경 및 설정캔트 적용

철도의 건설기준에 관한 규정의 최소곡선반경은 단일

열차 종류로 운행되는 전용선에 대한 최소곡선반경으로 저속열차(90km/h)와 혼용 할 경우에는 Table 5와 같이 최소곡선반경을 검토하여 Table 6와 같이 최소곡선반경 조정이 필요하다.

Table 6. Minimum curve radius settings by design speed

Design speed (km/h)	Track bed Type	Minimum curve radius(m)		Adjustment (m)
		Design basis	Change (proposal)	
200	Ballast	1,900	1,900	1,900
	Concrete	1,600	1,600	
230	Ballast	2,600	2,800	2,800
	Concrete	2,000	2,250	
250	Ballast	3,100	3,400	3,400
	Concrete	2,400	2,700	
300	Ballast	4,500	5,100	5,100
	Concrete	3,500	4,050	

동일곡선 반경에서 통과톤수, 열차속도 및 부족캔트의 증가에 따라 레일마모량이 증가하여 열차의 주행안전 및 승차감에 불리하게 작용하고, 궤도구조의 파괴를 촉진시킴으로써 차량 및 궤도유지보수비를 크게 증가시킨다[8]. 마모량, 캔트량, 곡선반경, 열차속도 등 다양한 매개변수별 탈선계수 분석결과 부족캔트 100mm적용시 탈선계수는 30%증가하고, 초과캔트 50mm발생시 탈선계수는 10%증가하므로[9,10] 부족캔트에 의한 승차감 저하 및 탈선위험방지와 초과캔트에 의한 하중편중 최소화를 위하여 교집합 수준의 적정캔트를 설정한다[11].

Table 7. Setting cant when cargo train(90km/h) and passenger train(250km/h) are mixed

high speed train operation ratio	train operation speed	R=4000m		R=5000m	
		balanced cant	setting cant	balanced cant	setting cant
0	90	24	$104 \leq C \leq 134$	19	$68 \leq C \leq 129$
10	116	40		32	
20	138	56		45	
30	156	72		58	
40	173	88		70	
50	188	104		83	
60	202	120		96	
70	215	136		109	
80	227	152		122	
90	239	168		135	
100	250	184		148	

이상과 같이 250km/h의 고속열차와 90km/h의 저속열차가 혼용시 균형캔트는 곡선반경 R=4000m에서 고속열차 횟수비에 따라 24mm에서 184mm로 초과캔트와 부족캔트 범위를 만족하는 설정캔트는 $104 \leq C \leq 134mm$이다.

고속열차의 횟수비가 낮고 저속열차의 횟수비가 높은 비율에서는 낮은 균형캔트에 초과캔트를 더하여 104mm에 가까운 캔트를 설정캔트로 부설하고 고속열차 횟수비가 높고 저속열차 횟수비가 낮은 비율에서는 높은 균형캔트에 부족캔트를 고려하여 134mm에 가까운 캔트를 설정캔트로 부설하여 열차의 운행 안전성 및 승차감을 확보하고 궤도에 주는 압력을 균등하게 유지하여야 한다.

4. 결론

일반철도의 개량 또는 신설하는 노선에 저속 및 고속열차가 혼용하는 곡선구간의 최소곡선반경을 산정하고, 열차운행빈도에 따른 운행속도에 적합한 설정캔트의 적정범위를 산정함으로서 승객의 승차감 향상 및 열차의 주행안전성 확보와 선로유지관리 효율성을 향상하고자 하였다.

첫째, 현재 철도건설규칙, 철도의 건설기준에 관한 규정의 최소곡선반경은 단일차종의 최고운행속도에 대한 부족캔트 범위를 만족하는 최소곡선반경으로 저속의 화물열차(90km/h)와 230km/h이상 고속열차 혼용 운행시에는 저속열차의 초과캔트를 동시에 만족하는 최소곡선 반경으로 Table 6와 같이 확대하여야 한다.

둘째, 도상형식 선정에 따라 최대 설정캔트 및 부족캔트 기준에 의하여 최소곡선반경을 다르게 적용하고 있으나, 사업계획 수립단계나 사전조사 및 타당성조사는 상세 주변현황조사, 측량 및 지반조사가 이루어지지 않은 단계로서 도상형식 결정을 구체적으로 수립하기 어려우므로 최소곡선반경을 자갈도상에 준하여 크게 설정하고 향후 기본계획 및 설계단계에서 도상형식 및 운행열차 빈도에 따라 구체화하여 설정하는 것이 적정하다.

셋째, 고속열차 횟수비가 50%미만으로 작은 경우에는 자승평균법에 의한 열차운행속도가 낮아 균형캔트가 낮게 설정되어 고속열차는 부족캔트 허용 범위인 자갈도상 200km/h이상에서 최대80mm를 초과하게 되므로 저속열차의 균형캔트에 초과캔트 한계치 110mm를 더한 값을 설정캔트의 최대치 134mm로 산정하고 104mm에

가까운 설정캔트로 부설한다.

넷째, 고속열차 횟수비가 50%이상으로 클 경우에는 자승평균법에 의한 열차운행속도가 높아 균형캔트가 높게 설정되어 저속열차는 초과캔트가 허용범위 최대 110mm를 초과하게 되므로 고속열차의 균형캔트에 부족캔트 한계 80mm를 감한 값을 설정캔트의 최소치 104mm로 산정하고 134mm에 가까운 설정캔트로 부설한다.

본 논문에서는 모든 열차의 운행속도를 만족시킬 수 없으나 부족캔트에 의한 승차감 저하 및 탈선위험을 방지하고 초과캔트에 의한 하중편중을 최소화 할 수 있는 최소곡선반경 및 설정캔트 범위를 도출함으로써 대상선로를 주행하는 열차의 안전과 유지관리의 효율성을 제고하고자 하였다.

References

[1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "The 3rd National Rail Network Establishment Plan(2016-2025)", pp.41

[2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Provisions on Railroad Construction Standards, Article 6 Curve radius" , Korean National Railway Construction Standard http://www.law.go.kr/admRulSc.do?menuId=5&subMenuId=41#liBgcolor5

[3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Provisions on Railroad Construction Standards, Article 7 Cant", Korean National Railway Construction Standards, http://www.law.go.kr/admRulSc.do?menuId=5&subMenuId=41#liBgcolor5

[4] Korea Rail Network Authority, "Railway Design Guideline and Manual KR C-14020 Track Linear and Wiring", 2018, pp.54

[5] J. C. Lee, *Analysis of Ride Comfort and Rail Wear in Track with Cant Deficiency*, Master's thesis, Korea National University of Transportation, Uiwang, Korea, pp.68-69, 2016.

[6] G. C. Shin, B. G. Joo, S. H. Jung *A Study on the Rail Wear and Cant Adjustment according to the Increase of Train Speed, Korean Railway Association Annual Fall Conference, jeju, South Korea*, pp.37~44, May 2007

[7] G. E. Kim, *A study on Correlation between Adjusting Cant and rail wear Caused by the Application of Track Improvement Work*, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, pp.40-43, 2013.

[8] C. K. Hong, *A study on Influencing Factors of Rail Wear and its Reduction Measures*, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, pp.57-58, 2002.

[9] P. J. Yoo, *Rail Wear Limit Analysis based on Track Stability in Curved Railway*, Ph.D dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, pp.59-61, 2018.

[10] D. Y. Sung, Y. G. Park, P. J. Yoo, I. C. Baek, J. I. Lee, *Analysis of Derailment Coefficient by Cant and Uneven Rail Wear in Curved Tracks*, *Korean Railway Association Annual Spring Conference*, Yeosu, South Korea, pp.451-452, May 2019.

[11] B. H. Song, *The Evaluation Method for Optimal Cant of Curved Ballast Track on Mixed Traffic Line*, Ph.D dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, pp.114-115, 2019.

이 재 혁(Jae-Hyuk Lee) [정회원]

- 2018년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 동 대학원 글로벌철도시스템학과 (박사과정)
- 2011년 4월 ~ 현재 : (주)도화엔지니어링 철도부 상무 재직
- 2015년 8월 철도기술사

〈관심분야〉
토목공학, 철도건설(선로, 궤도)

김 정 혁(Jeong-Hyeok Kim) [정회원]

- 2001년 2월 : 경희대학교 물리학과 (이학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 (석·박사통합과정)
- 2017년 12월 ~ 현재 : ㈜대련건설 기술연구소 선임연구원 재직

〈관심분야〉
토목공학(도로/철도/교량)

박 용 걸(Young-Gul Park) [정회원]

- 1980년 8월 : 한양대학교 토목공학과 (공학사)
- 1984년 8월 : 한양대학교 구조공학과 (공학석사)
- 1988년 8월 : 한양대학교 구조공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수
- 2016년 한국철도학회 회장 역임

〈관심분야〉
궤도토목, 피로손상