

철도 평면선형 개량시 설계초기조건이 미치는 영향

엄주환*, 최일윤¹
¹한국철도기술연구원

The effects of Design Initial Condition on Renewal of Railway Existing Curves

Ju-Hwan Um^{*}, Il-Yoon Choi¹

¹Korea Railroad Research Institute

요약 철도 선로선형은 한번 건설되면 변경하기가 매우 어렵다. 따라서 철도에서 선로선형의 변경은 일반적으로 큰 경제적 비용을 수반한다. 본 연구에서는 기존 고속철도 및 일반철도의 속도향상을 위한 선형개량 시, 경제성을 고려한 평면선형의 허용개량범위 결정에 설계초기조건(교각)이 미치는 영향에 대해 분석하였다. 분석결과, 교각(Intersection Angle)이 클수록 직선부에 지장물이 있는 경우가 허용범위에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한 교각이 클수록 최대 허용곡선반경은 작아지며, 허용완화곡선장은 길어짐을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 교각의 크기 및 지장물 위치에 따른 개량허용범위를 쉽게 예상할 수 있으며, 속도향상 및 선로개선을 위한 선형 개량시 지장물을 고려한 경제적 설계가 가능할 것으로 예상된다.

Abstract The alignment modifications after completion of railway construction entail a lot of efforts and time as well as high additional costs. In the process of renewal of the existing railway alignment to offer higher-speed services, the effect of initial design parameters(e.g., intersection angle) on determination of allowable degree of improvement of horizontal curves under consideration of economic efficiency is investigated in this study. From the analysis results, in the case that there are obstacles at the tangent line, it was found that the larger angle of intersection has a significant effect on the permissible zone. In addition, as the intersection angle is increased, the permissible values of maximum curve radius and the length of transition curve becomes smaller and longer, respectively. It is expected that this study can contribute to the efficient and accurate prediction of the permissible zone according to the locations of obstacles and the size of intersection angle as well as improvement in the railway alignment without any additional costs.

Key Words : Alignment Renewal, Intersection Angle, Railway Alignment, Speed-Up

1. 서론

최근 세계적으로 철도속도향상을 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 세계적 흐름에 대응해 국내에서도 430km/h급 차세대 고속열차를 개발하고 있으며 동시에 기존선의 속도향상도 꾀하고 있다.[1,2,3] 최근 350km/h로 설계된 호남고속선에서는 차세대 고속열차

(HEMU)의 430km/h 증속시험을 위해 여러 가지 검토가 이루어진바 있다.[4,5]

철도에서 속도향상을 위해서는 궤도구조, 구조물, 전차선, 신호시스템, 선형 등 여러 가지 중요한 요소들과 직접적인 관련이 있다. 이 중에서도 가장 기초적이고 중요한 부분은 선로선형이라 할 수 있다. 철도선로선형은 높은 영구성을 갖는다. 즉, 선형이 바뀌면, 선로의 하부

본 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 철도기술연구사업의 “철도인프라의 유지보수를 위한 고속종합검측 시스템 기술개발”과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ju-Hwan Um(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5683 email: jhum@krri.re.kr

Received February 26, 2015

Revised March 31, 2015

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

구조, 상부구조의 주요한 시스템도 동시에 바뀌어야 한다. 따라서 선로선형의 변경은 높은 경제적 비용을 동반하게 된다.

철도 선형에 대한 연구는 세계적으로 다양하게 수행되어 왔다. 일본의 RTRI 에서는 선로선형과 열차동요와의 상관관계에 대한 연구를 수행하였으며[6], 유럽에서는 선로선형에 대한 많은 연구를 통하여 UIC, EN등에서 열차속도대역별로 선형설계기준을 체계적으로 제시하고 있다.[7] 국내에서는 엄주환 등[8]이 승차감을 고려한 평면선형의 최적화에 대한 연구를 수행한 바 있다. 지금까지 대부분의 연구는 신선설계시 열차속도에 따른 적정선형설계 그리고 승차감, 주행안전성 측면에서의 적정선형설계에 대한 연구들이 주로 수행되어 왔다.

본 연구에서는 신선건설시 곡선부 설계변경, 그리고 기존선 선형개선을 위한 곡선부 개량 등의 기존 설계선형의 변경이 필요할 때, 초기설계조건인 교각 (Intersection Angle)이 향후 허용개량범위에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 허용개량범위 산정은 평면선형상에 있는 지장물을 이동시키지 않고 개량 가능한 허용범위 설정기법을 적용하였다.[8] 여기서 지장물이라 함은 앞서 언급한 바와 같이 신선 건설시에는 주위 지형 지물, 개량시에는 교량, 터널, 전차선주, 분기기 등의 변경하기 어려운 주요 선로구조물을 의미한다. 즉, 개량에 따른 큰 경제적 부담 없이 등가비용으로 개량함에 있어 설계초기조건이 허용개량범위에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다.

2. 선형개량 기본이론

선형 개량시 궤도의 횡방향 이동량은 곡선반경 및 완화곡선장 양쪽 모두에 의해 영향을 받는다. Fig. 1에서 보는바와 같이 평면곡선은 완화곡선-원곡선-완화곡선으로 이루어져 있으며 양단 완화곡선 길이는 같다고 가정하였다. 그리고 양단 접선부의 횡방향 위치와 방향은 고정되었다고 가정하였다. 이러한 가정에 의해서 곡선 선형은 두개의 변수, 즉 곡선반경(R)과 완화곡선장(L_t)으로 정의될 수 있다.

평면선형을 조정하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있다. 여기서는 기존 곡선의 중앙부가 크게 변경되지 않고 지장물의 위치에 따라 쉽게 최적 $R-L_t$ 의 경계조건을 설정하는 방법을 적용하여 해석을 수행하였다.[8]

Fig. 1은 평면선형상 $R-L_t$ 의 허용범위의 경계조건을 설정하는 방법을 도식화 한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 지장물이 기존곡선의 중앙에 위치할 경우에는 \overline{SS}_z (ΔW)가 최소(=zero)가 되는 경우이며, 양쪽 끝단 직선부에 지장물이 있을 경우는 \overline{PP}_z (ΔW)가 최소(=zero)가 되는 경우이다. 그리고 이때 개량을 위한 선형대안들은 각각 다음 식 (1), (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\overline{SS}_z = R_z + \frac{R - R_z - w_1 + w_2}{\cos \frac{\beta}{2}} - R \quad (1)$$

$$\overline{PP}_z = \frac{l_z - l}{2} - (R - R_z - w_2 + w_1) \cdot \tan \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

여기서, R =기존 곡선반경, R_z =개량 곡선반경

w_1, w_2 =기존/개량곡선의 횡이동량

β =인접접선사이의 교각

l = 기존곡선의 완화곡선길이

l_z = 개량곡선의 완화곡선길이

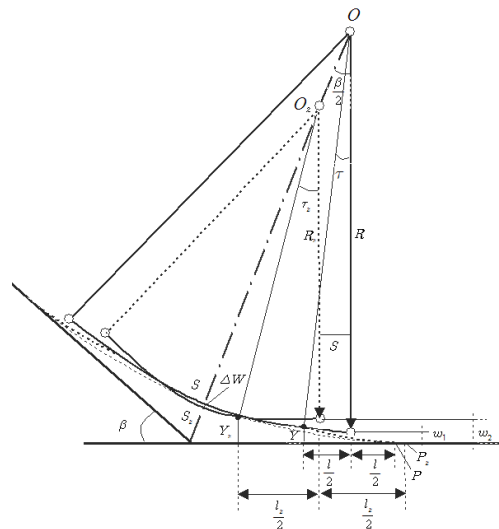


Fig. 1. Schematic of the determination method for $R-L_t$ boundary conditions

3. $R - L_t$ 경계조건 해석

3.1 해석방법

기존 연구에 의하면 지장물이 기존 원곡선 중앙부와 끝단 직선부에 있을 때가 허용범위에 가장 크게 영향을

미친다는 것을 알 수 있다.[8] 따라서 본 연구에서는 앞선 연구결과를 바탕으로 원곡선 중앙부와 끝단 직선부상에 지장물이 있다고 가정하고 해석을 수행하였다. Table. 1에서는 해석에 사용된 변수를 보여주고 있다.

Table. 1. Analysis Parameters

Items	Design Initial Conditions	
	High Speed Line	Conventional Line
Track Bed	Ballasted bed	
Design Speed(km/h)	350	150
Curve Radius(m)	6100	1100
Cant(mm)	160	160
Transition Curve Length(m)	410	175
Intersection Angle(rad)	0.1 / 0.2 / 0.5 / 1.0	

Table. 1에서 알 수 있듯이 해석 변수는 크게 고속철도와 일반철도의 경우로 나누었으며, 선형조건은 현재 철도건설기준을 바탕으로 일반적으로 많이 운행되고 있는 설계속도대역을 기준으로 설정하였다.[9] 일반선의 경우 150km/h 속도대역으로 선형조건을 정의하였으며, 고속선의 경우는 350km/h를 적용하였다. 도상의 종류는 본 연구의 목적에 맞게 쉽게 개량이 가능한 자갈도상을 기준으로 하였다. 설정캔트는 보수적인 평가를 위해 최대설정캔트를 적용하였다. 완화곡선 길이는 철도건설기준에 따라 다음 식 (3)에 의해 산출하였다. 그리고 설계 초기조건인 교각에 대해서는 크기에 따른 영향을 검토하기 위해 Table. 1에서 보는바와 같이 크게 4가지 경우로 가정하고 해석을 수행하였다.

$$L = C_1 \Delta C \tag{3}$$

여기서, L : 완화곡선 길이(m)

$$C_1 : \text{캔트변화량에 대한 배수}(= \frac{7.31 V}{1000})$$

V : 설계속도(km/h)

ΔC : 캔트변화량(mm)

3.2 해석결과

고속철도와 일반철도 설계조건으로 나누어 총 8가지 경우에 대한 곡선반경-완화곡선 허용개량범위 해석을 수행하였다. Fig. 2~ Fig. 9에서 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서 O_1 , O_2 는 선형개량 시 지장물에 의한 고정점을 의미한다. 여기서 O_1 은 원곡선 중앙부에 지장물이 있을 경우이며, O_2 는 양쪽 완화곡선 끝단 직선부에 지장물이 있을 경우를 의미한다.

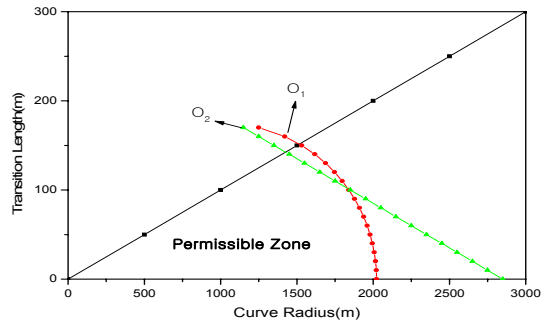


Fig. 2. $R-L_t$ Combination Analysis(R1100 L175 0.1rad)

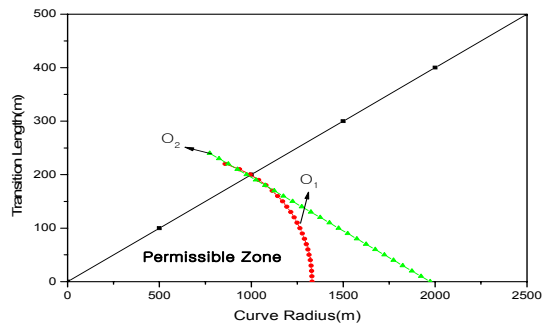


Fig. 3. $R-L_t$ Combination Analysis(R1100 L175 0.2rad)

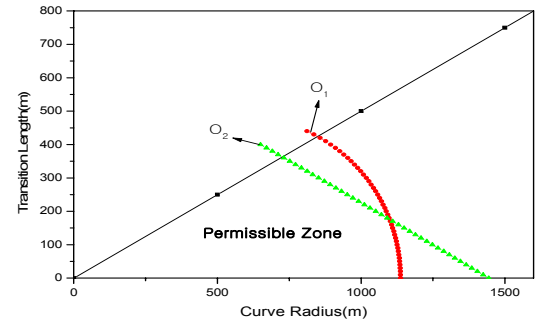


Fig. 4. $R-L_t$ Combination Analysis(R1100 L175 0.5rad)

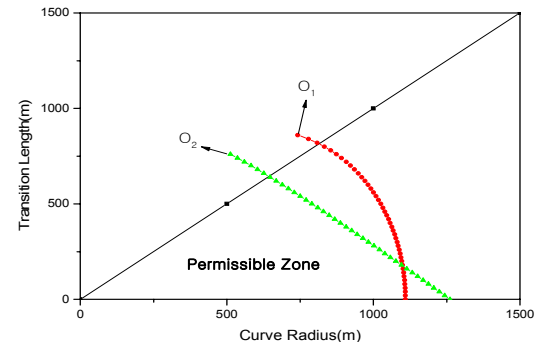


Fig. 5. $R-L_t$ Combination Analysis(R1100 L175 1.0rad)

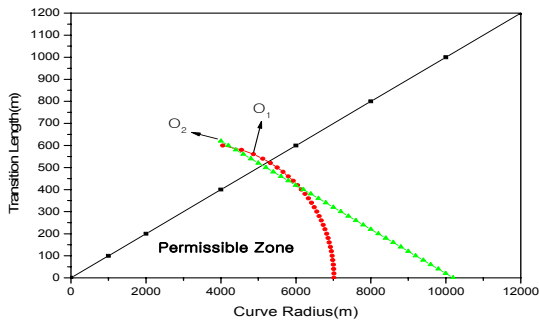


Fig. 6. $R-L_t$ Combination Analysis(R6100 L410 0.1rad)

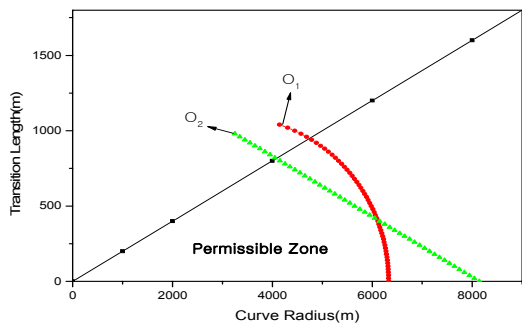


Fig. 7. $R-L_t$ Combination Analysis(R6100 L410 0.2rad)

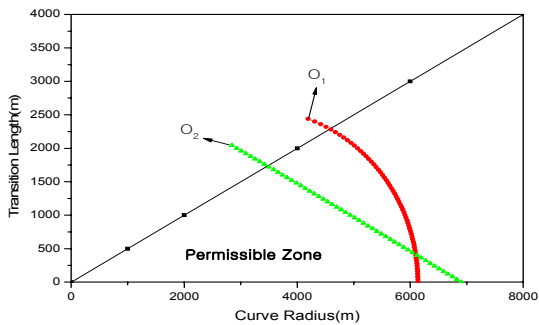


Fig. 8. $R-L_t$ Combination Analysis(R6100 L410 0.5rad)

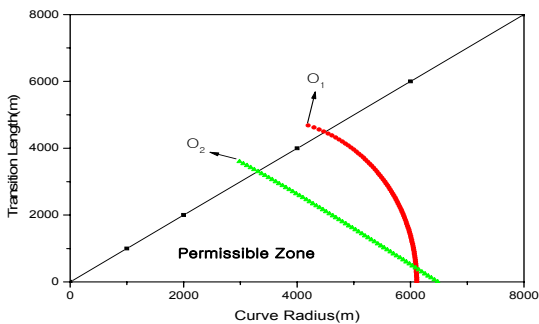


Fig. 9. $R-L_t$ Combination Analysis(R6100 L410 1.0rad)

해석결과, 고속선과 일반선 두 조건 모두 교각 (Intersection Angle)이 클수록 직선부 지장물이 있는 경우가 허용범위에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 그리고 교각이 클수록 전반적으로 최대 허용곡선반경은 작아지며, 허용완화곡선장은 길어짐을 알 수 있는데, 이는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 동일 교각 내에서 곡선반경이 줄어들면 완화곡선장이 늘어나는 기본이론에 의한 것으로 판단된다.

지장물에 의한 고정점의 위치에 따라, 일반철도인 경우는 교각이 0.5rad부터 직선부 지장물에 의해 허용범위가 크게 영향을 받음을 알 수 있으며, 고속철도인 경우는 0.2rad에서부터 직선부 지장물에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

같은 교각의 크기에서 살펴보면, 0.1rad의 경우 일반철도는 최대 허용개량곡선반경이 2022m로 개량전 곡선반경 1100m에 비해 약 1.83배 허용범위가 커졌으나 최대 허용완화곡선장은 140m로서 개량전 175m에 비해 오히려 약 0.8배 정도로 줄어든 것으로 나타났다. 하지만 고속선의 경우는 최대 허용곡선반경이 7018m로 기존곡선반경 6100m에 비해 약 1.15배 증가했으며 최대 허용완화곡선장은 500m로서 기존 410m에 비해 약 1.22배 정도 증가한 것으로 나타났다. 그리고 가장 큰 교각인 1.0rad에서는 일반철도인 경우 개량을 위한 최대 허용곡선반경은 개량전과 거의 동일한 수준으로 나타났으며 최대 허용완화곡선장은 640m로 약 3.66배 증가하는 것으로 나타났다. 고속철도의 경우에서도 최대 허용곡선반경은 일반철도와 마찬가지로 개량전과 거의 동일한 수치가 나타났으나, 최대 완화곡선장의 경우는 3300m로 약 8.05배까지 연장이 가능한 것으로 나타났다. 0.2rad과 0.5rad에서는 일반철도와 고속철도 모두 최대 허용개량곡선반경 및 완화곡선장이 약 1.0~4.2배로 나타났으며 고속철도의 경우가 다소 허용범위가 크게 나타남을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 교각이 클수록 완화곡선장의 허용범위가 지배적으로 커짐에 따라 전반적인 개량범위가 넓어짐을 알 수 있었으며, 같은 교각에서는 곡선반경과 완화곡선장이 큰 고속철도 선형조건인 경우가 대체적으로 허용범위가 커다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 철도선형 개량 시 분기기, 교량, 터널, 전차선주 등과 같은 선로상 지장물의 이동을 최소화 하는 방법을 적용하여 선로선형 조건별 경제성을 고려한 평면선형의 허용개량범위 설정에 대한 해석을 수행하였다. 이와 더불어 선형설계의 주요 초기조건인 교각의 크기가 허용개량범위에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였으며 분석결과는 다음과 같다.

첫째, 곡선반경 및 완화곡선의 크기에 상관없이 교각이 클수록 직선부상에 지장물이 있는 경우가 허용개량범위에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 선형조건별로는 일반철도 선형조건인 경우 0.5rad, 고속철도의 선형조건인 경우는 0.2rad에서부터 직선부 지장물에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타나, 고속철도 선형의 경우 직선부상 지장물이 허용개량범위에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

셋째, 같은 교각 크기에서는 곡선반경과 완화곡선장이 큰 고속철도 선형의 경우가 대체적으로 허용개량범위가 커진다는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터 철도선형 설계 시 설계초기조건인 교각이 클수록 전반적으로 개량할 수 있는 허용범위가 넓어진다는 것을 확인할 수 있었으며, 평면선형의 합리적인 설계초기조건 결정이 향후 경제적인 철도선형개량에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한 본 연구결과를 바탕으로 향후 철도건설규칙, 그리고 각 지자체별 지하철 건설기준 등을 적용하여 개량계획이 있는 노선별, 선형조건별로 실질적으로 설계 가능한 허용개량범위를 정의해 두면 개량 설계시 설계자가 쉽고 빠르게 경제적인 설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] C.S Park, H.G Oh, M.H Kwak, "The Effects of KTX on Development of Railway Technology", Railway Journal, Vol 17. No 2, 2014.

[2] C.Y Choi, K.Y Eum, S.J Han, Y.S Kang, "Behavioral Characteristics of the Roadbed with speed up in HSR", UKC 2014, US-Korea Conference 2014.

[3] N.P Kim, H.M Hur, "The Effect of Wheel-on-Rail Adhesion on the Speed-Up of High speed railway", STECH 2012.

[4] S.C Yang, J.R Shin, Y.J Jeong, "Technical Review for

Speed-Up of Existing Railway Line" Autumn Conference of Korea Society for Railway, pp 423-430, 2000.

[5] Y.S Kang, G.Y Eum, W.I Choi, J.H Park, "Study of behavior of slab track system in Honam High-Speed Railways for HEMU 430-X Speed-up" Spring Conference of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.17, No.1, 2013.

[6] Hashimoto. S, "Analysis of relationship between transition curve profile and railway vehicle's vibration", Q. Rep. RTRI Rep. (Jpn), 30(4), pp 207 - 214, 1989.

[7] European Standard. "Railway applications - track alignment design parameters - track gauges 1435mm and wider", BS EN 13803-1, 2010.

[8] J.H Um, E.K Kim, S.C Yang, "A Study on Determination Method of Radius and Transition Curve Length for Optimum Design in Curve", Journal of The Korea Society for Railway, Vol. 12, No. 2, pp.199-204, 2009.

[9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Railway construction standard(in Korea)", 2013.

엄 주 환(Ju-Hwan Um)

[정회원]



- 2010년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 1997년 12월 : 한국고속철도건설공단 주임연구원
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 미래교통시스템연구실 선임연구원

<관심분야>
철도궤도구조, 궤도선형

최 일 윤(II-Yoon Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한양대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 1997년 12월 : 한국고속철도건설공단 주임연구원
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 첨단고속철도연구실 선임연구원

<관심분야>
궤도설계, 유지보수