

곡선부 선형 최적설계를 위한 적정 곡선반경-완화곡선장 결정기법 연구

A Study on Determination Method of Radius and Transition Curve Length for Optimum Design in Curve

엄주환[†] · 김은겸* · 양신추**

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

Abstract In this paper, a method for determining the boundary conditions which are derived from the random obstacles on the curves was presented. A simple computer program using this method is also developed. This determination method and program can be used for a good engineering tool in optimal curve design and an Radius-transition curve length ($R-L_t$) combination within the permissible zone can be improved without any increased costs.

Keywords : Track alignment, Optimum design, Transition curve

요 지 본 연구에서는 곡선부 선로선형의 최적설계를 위해 신선건설 및 기존선 개량시 지장물의 위치에 따른 곡선 반경(R)-완화곡선장(L_t)의 적정 범위를 간단히 결정할 수 있는 기법을 제시하였다. 또한 이를 이용하여 간단히 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 실제 예를 통한 해석을 수행하여 경우별 곡선반경-완화곡선장의 경계조건에 대한 비교 분석을 수행하였다. 본 해석기법은 곡선상 지장물의 위치에 따른 최적 $R-L_t$ 를 산정할 수 있으며, 경계조건 허용 범위 내에서 $R-L_t$ 의 범위를 조정한다면, 향후 신선 및 개량설계시 지장물 이설에 따른 높은 비용의 절감이 가능하다.

주 요 어 : 선로선형, 최적설계, 완화곡선

1. 서 론

철도에 있어서 선로선형은 건설비와 차량의 주행안정성/승차감에 직접적인 영향을 주는 중요한 요소이나 설계요구 사항에 있어서는 상호 역비례관계에 있어 양 측면을 고려하여 선로선형을 적절히 결정할 필요가 있다. 또한 철도선로선형은 아주 높은 영구성을 갖는다. 즉, 선형이 바뀔 때, 철도선로시스템의 주요한 부분들, 즉, 하부구조, 상부구조, 전차선 시스템 등의 중요한 하부구조 시스템도 동시에 적절히 바뀌어야 한다. 그러므로 선로선형의 변경은 일반적으로 높은 경제적 비용을 동반하게 됨에 따라 신선을 건설할 때에 충분히 검토하여 적정한 설계를 하여야 한다. 철도

선진국인 유럽에서는 선로선형에 대한 많은 연구를 통하여 UIC, CEN 등에서 곡선부 선형 기준들을 열차 속도대별로 뚜렷하게 분리하여 제시를 하고 있으며[1], 일본에서도 RTRI 등에서 곡선선형제원에 따른 열차동요와의 상관관계에 대한 많은 연구를 수행하였다[2].

Baluch(1983)는 곡선부 선로선형의 중요한 요소인 완화곡선 연신 기법을 제시하였으며, Hashimoto(1989)는 완화곡선의 특성에 따른 차량동요와의 관계에 대한 연구를 수행하였다[2,3]. Kufver(1997)는 승차감을 고려한 열차특성에 따른 선로선형 최적화 연구를 수행하였는데, 여기서는 전용 선형해석프로그램을 활용하여 시행착오법을 바탕으로 로장애물의 특정위치에서의 곡선반경에 따른 완화곡선장에 대한 범위를 결정하였다[4].

본 연구에서는 곡선부 선로선형의 최적설계를 위해 신선건설 및 기존선 개량시 건설비용을 최소화할 수 있도록, 곡선상 지장물의 위치에 상관없이 지장물을 이동시키지 않고 이에 따른 곡선반경-완화곡선장의 상관관계를 고려한 최적

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

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

* 정회원, 서울산업대학교, 토목공학과 교수

** 정회원, 한국철도기술연구원, 수석연구원

경계조건을 간단히 결정할 수 있는 기법 및 프로그램을 개발하였다. 또한 이를 이용하여 실제 예를 통한 해석을 수행하여 경우별 곡선반경-완화곡선장의 경계조건에 대한 비교 분석을 수행하였다. 여기서 지장물이라 함은 선형설계 및 개량시 많은 경제적 비용이 소요되는 부분, 즉, 신선 건설 시에는 주위 지형지물, 개량시에는 교량, 터널, 전차선주, 분기기 등의 기존 선로구조물을 의미한다.

2. 기본가정 및 이론정립

2.1 기본가정

선형 개량시 궤도의 횡방향 이동량은 곡선반경 및 완화곡선장 양쪽 모두에 의해 영향을 받는다.

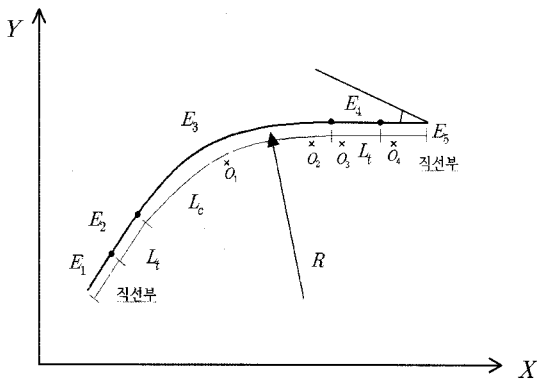


Fig. 1. Curve conditions in x-y plane

Fig. 1에 본 연구에서 가정한 x-y 평면상의 단곡선을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 곡선은 완화곡선-원곡선-완화곡선으로 이루어져 있으며 완화곡선장 E_2 와 E_4 는 같다고 가정하였다[4]. 그리고 양단의 직선부 E_1 과 E_5 의 횡방향 위치와 방향은 고정되었다고 가정하였다. 즉 단곡선에서 직선과 직선이 이루는 교각이 일정하다고 가정하였다. 이러한 가정에 의해서 곡선 선형은 두개의 변수, 즉 곡선반경(R)과 완화곡선장(L_t)으로 정의될 수 있다. 물론 실제로는 복심곡선 및 완화곡선 길이가 다른 경우, 또는 한 쪽만 부설되어 있는 경우 등이 있을 수 있으나, 위의 가정 사항은 선로선형 설계시에 가장 일반적으로 고려되는 사항이다.

그리고 Fig. 1에서 보여주는 $O_1 \sim O_4$ 는 해석시 선로변의 지장물을 정의한 것이며, O_1, O_2, O_3 는 예를 들어 전차선주와 같은 횡방향 이동에 영향을 미치는 지장물을 의미하며, O_4 는 종방향 이동, 즉 교량이나 터널구조물, 분기기 등과 같은 지장물을 의미한다. 여기서 O_1 은 기존원곡선 중앙에 위치함을 의미하고, O_2 와 O_3 는 각각 원곡선과 완화곡선상의 임의의 점에 위치하고 있음을 의미한다.

2.2 기본이론 정립

완화곡선의 길이를 연장하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있지만, 여기서는 기존 곡선의 중앙부가 크게 변경되지 않고 유지보수가 쉬운 방법인 원곡선반경을 줄임으로써 완화곡선장을 증가시키는 방법(Baluch, 1983)[3]을 적용하여 지장물의 위치에 따른 최적 $R-L_t$ 의 경계조건을 제시하였다.

2.1.1 원곡선 중앙부에 지장물이 있을 경우

지장물이 기존곡선의 중앙에 위치할 경우에는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 $\overline{SS}_z(\Delta W)$ 가 'zero'가 되는 경우이다. 즉, 중앙부의 이동량이 최소가 되도록 설계되어야 하며, 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$w_1 = Y_z + R_z \cdot \cos \tau_z - R_z \quad (2)$$

$$w_2 = Y + R \cdot \cos \tau - R \quad (3)$$

$$\overline{S_z O_z} + \overline{O_z O} - R = \overline{SS}_z = \Delta W \quad (4)$$

$$\Delta W = R_z + \frac{R - R_z - w_1 + w_2}{\cos \frac{\beta}{2}} - R \quad (5)$$

여기서, R =기존 곡선반경, R_z =개량 곡선반경
 S, S_z =기존, 개량 원곡선부의 중앙부
 w_1, w_2 =기존/개량곡선의 횡이동량
 β =인접직선사이의 교각

2.1.2 직선부에 지장물이 있을 경우

기존곡선의 양쪽 완화곡선 끝단 직선부에 지장물이 있을 경우 $\overline{PP}_z(\Delta W)$ 가 'zero'가 되는 경우이다. 즉, 직선부의 이동량이 최소가 되도록 설계되어야 하며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{PP}_z = \frac{l_z - l}{2} - (R - R_z - w_2 + w_1) \cdot \tan \frac{\beta}{2} \quad (6)$$

여기서, l = 기존곡선의 완화곡선길이
 l_z = 개량곡선의 완화곡선길이

2.1.3 기존 곡선상에 지장물이 있을 경우

기존 곡선부 임의의 지점에 지장물이 있을 경우, 즉 기존 원곡선부 또는 완화곡선부의 임의의 지점에 지장물이 있을 경우에는 지장물의 정확한 위치좌표를 구한 다음 개량곡선

구할 수 있으며 이에 따른 Y좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Y_{ob2} = \frac{X_{ob2}^3}{6RL} \quad (13)$$

여기서, X_{ob2} =완화곡선상 지장물 X좌표
 Y_{ob2} =완화곡선상 지장물 Y좌표

그리고 기존 완화곡선상에 지장물이 있을 경우에도 기존 원곡선상에 지장물이 있을 경우와 마찬가지로 개량곡선상의 지장물 위치의 좌표는 크게 두 부분으로 나누어서 산정을 하여야 한다. 즉 이 경우에도 지장물의 위치가 개량곡선부에서 원곡선부가 될 수도 있고, 완화곡선부가 될 수도 있기 때문에 개량곡선의 완화곡선상에 지장물이 위치할 때와 개량곡선의 원곡선상에 지장물이 위치할 때를 구분하여 좌표를 산정하여야 하며 원곡선부와 동일한 방법으로 구할 수 있다.

3. R-L_t 경계조건 결정기법 개발 및 해석수행

앞서 제시한 산정기법을 바탕으로 하여 각 지장물에 대한 경계조건을 간단히 해석할 수 있도록 프로그래밍을 하여 해석을 수행하였다. Fig. 3~Fig. 4에서 최적 R-L_t 결정

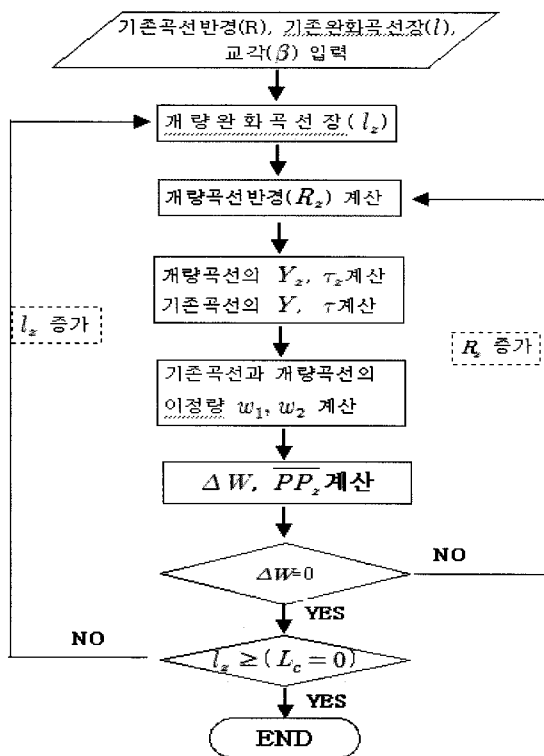


Fig. 3. Block diagram for determination of optimal R-L_t plane (Part of curve center and straight)

위한 블록다이어그램을 보여주고 있으며, Fig. 5~Fig. 7에서는 해석결과를 보여주고 있다.

Fig. 4의 블록다이어그램에서 기존 완화곡선상에 있을 때는 원곡선상에 있을 때와 계산과정이 동일함에 따라 생략하였다.

앞서 언급하였듯이 여기서는 완화곡선-원곡선-완화곡선 조합에서 양쪽 완화곡선의 길이가 같고

고 가정하였으며, 곡선반경 및 완화곡선장은 R=1650m, L_t=110m/70m로서 임의로 가정하였다. 여기서 완화곡선 길이를 두가지로 설정한 것은 초기 완화곡선길이에 따른 특징을 분석하기 위해서이다. 또한 곡선설계시 중요한 변수인 양쪽 직선과 직선이 이루는 교각은 β=0.2rad로 가정하였다.

그리고 지장물의 위치는 Fig. 1에서와 같이 원곡선 중앙부와 직선부, 곡선상 임의의 위치에 있다고 가정하였는데, 여기서 곡선상 임의의 위치는 원곡선상과 완화곡선상 양쪽 모두 고려하기 위해서이며 기존 완화곡선장 L_t=110m일 때

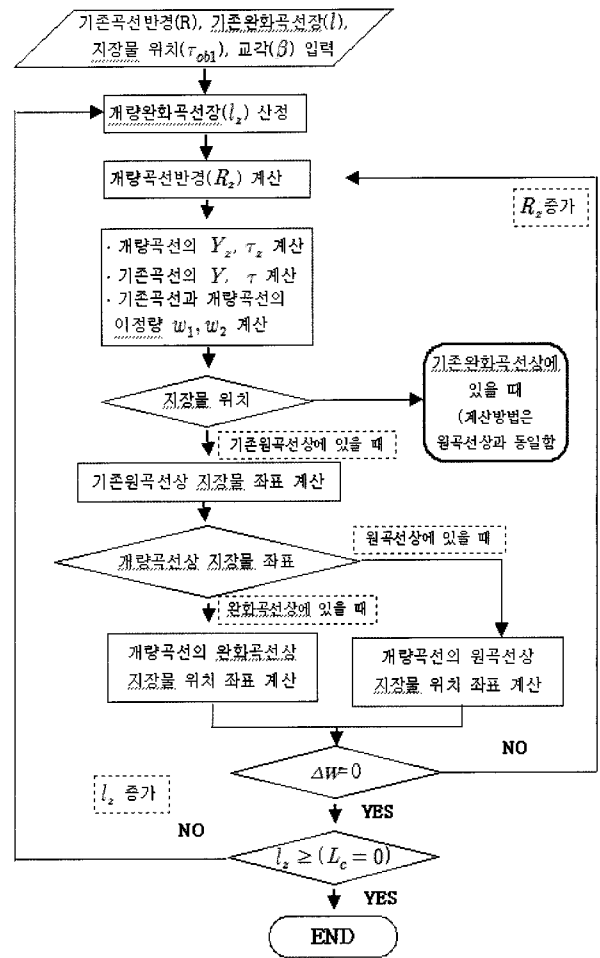


Fig. 4. Block diagram for determination of optimal R-L_t plane (Optional part on the curve)

는 원곡선상은 130m, 완화곡선상은 80m에 지장물이 있다고 가정하였다. 그리고 $L_t=70m$ 일 때는 지장물의 위치는 같다고 보고 완화곡선길이에 따른 변화특성을 파악하기 위해 원곡선상에 지장물이 있을 경우만 해석을 수행하였으며, 지장물의 위치는 동일하다고 가정하였다. 또한 횡방향(Y방향)으로 지장물의 위치가 다를 수 있으므로 이를 고려하기 위해 130m 위치에 있는 원곡선상의 장애물을 횡방향으로 30cm 떨어져 있다고 가정하고 해석을 수행하였다.

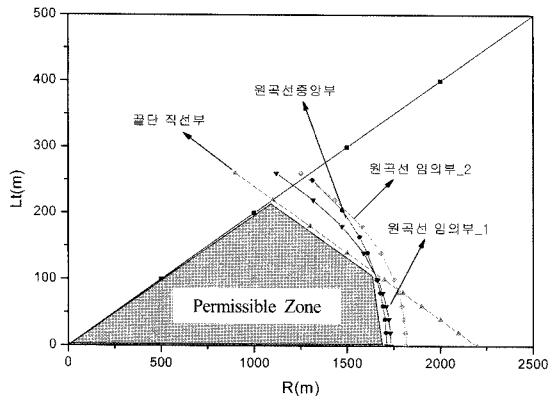


Fig. 5. Optimal $R-L_t$ plane (Circle part, R1650/L110)

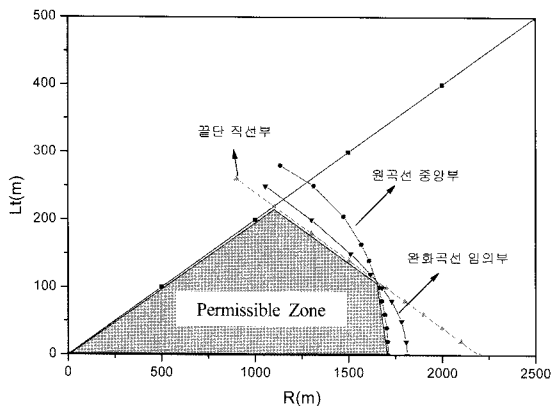


Fig. 6. Optimal $R-L_t$ plane (Transition part, R1650/L110)

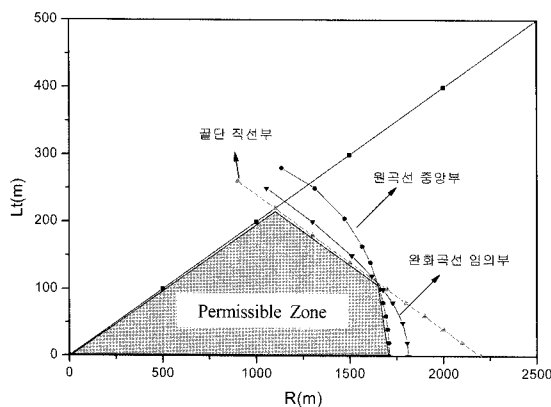


Fig. 7. Optimal $R-L_t$ plane (Circle part, R1650/L70)

다음 Table 1에서 해석수행시의 변수들을 간단히 정리하였다.

Table 1. Analysis parameter

Parameter	Case
Curve Radius(R)	1650m
Transition Length (Lt)	110m
	70m
Position of Obstacle	Circle part X=130m, Y=2.0m
	Transition part X=80m, Y=0.47m
	Lateral shift case(Center of circle) 30cm

Fig. 5에서 원곡선 임의부_1과 원곡선 임의부_2는 횡방향(법선방향)의 지장물 위치에 따른 영향을 고려하기 위해서이며, 원곡선 임의부_2가 30cm 떨어진 위치를 나타낸다.

Fig. 5~Fig. 7에서 최적 $R-L_t$ 범위에 대한 해석결과를 보여주고 있다.

해석결과, 중앙부와 직선부에 지장물이 있을 경우가 대부분 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 횡방향 지장물 위치에 따라서는 궤도중심선에서 멀리 떨어질수록 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 지장물이 완화곡선부상에 위치할 때도 경계조건에 양상은 다소 다르지만 중앙부와 직선부에서 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 그리고 완화곡선장에 따른 경계조건은 Fig. 5와 Fig. 7에서 보듯이 초기 완화곡선이 짧을수록 허용범위가 줄어드는 것을 알 수 있다.

따라서 경계조건에 허용범위내에서 $R-L_t$ 의 범위를 조정한다면, 즉 허용범위내에서 일정한 완화곡선길이에 곡선반경을 증가시키고, 또는 일정한 곡선반경에서 필요에 따라 완화곡선장을 증가시킨다면 신선 및 개량 설계시 지장물 이설에 따른 높은 비용의 절감이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 곡선부 선로선형의 최적설계를 위해 신선 건설 및 기존선 개량시 지형지물의 조건에 따라 건설비용을 최소화할 수 있도록, 지장물의 위치에 상관없이 지장물을 이동시키지 않고 이에 따른 곡선반경-완화곡선장의 허용범위 산정을 위한 최적 경계조건을 간단히 결정할 수 있는 기법을 개발하였다. 또한 실제 예를 통한 해석을 수행하여 경우별 곡선반경-완화곡선장의 경계조건에 대한 비교 분석을 수행하였다.

본 연구의 수행결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 곡선부 선형 설계시 곡선상 지장물 위치에 따른, 즉 지장물이 원곡선부 또는 완화곡선부 어디에 있던 최적 $R-L_t$ 경계조건을 결정할 수 있는 기법을 제시하였으며, 이를 이용한 간단한 계산 프로그램을 개발하였다.
- 2) 중앙부와 직선부에 지장물이 있을 경우가 대부분 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 횡방향 지장물 위치에 따라서는 궤도중심선에서 멀리 떨어질수록 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 동일한 지장물 위치에서 초기 완화곡선 길이에 따른 경계조건변화 특성은 완화곡선이 짧을수록 허용범위가 줄어드는 것으로 나타났다.

이상의 결론으로부터 경계조건내에서 $R-L_t$ 의 범위를 조정한다면, 신선 및 개량설계시 지장물 이설에 따른 높은 비용의 절감이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 차세대 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. European Prestandard, "Railway Applications-Track Alignment Design Parameters - Track Gauges 1435mm and Wider", prENV 13803-1:2002
2. 橋本涉一, 완화곡선의 선형과 차량동요의 관계해석, RTRI Report Vol.3. '89.2
3. Henryk Baluch, Increasing the length of transition curves by a reduction of the main curve radius, Rail international, Vol. 14. No. 1, 1983
4. Bjorn Kufver, Optimization of single horizontal curves in railway alignments, VTI report 424A, 1997
5. Martin Lindahl, Track geometry for high-speed railways, TRIKA-FKT report 2001
6. 국토해양부, 철도건설규칙(해설), 2005

접수일(2008년 8월 28일), 수정일(2008년 11월 20일),
 게재확정일(2009년 4월 11일)