

GPS 기법을 이용한 철도 선형제원의 복원

Reconstruction of Alignment elements in Railway using GPS

정의환* · 이남수**

Jeong, Eui-Hwan · Lee, Nam-Soo

ABSTRACT

The first design elements of horizontal alignment are very important things for improvement or movement in Railway. When the design elements are lost or damaged, it is necessary to recalculation. In this paper, an investigation is made on the method of representation of horizontal alignment as a result of design element using GPS method. The results show that northing calculated about 2~10 meters and easting calculated about 0~7 meters between calculated and design data in center points.

1. 서론

철도는 대중교통 수단으로 가장 일찍이 개발되어 근대 산업발전에 크게 기여하였으나 20세기 중반이후 자동차, 항공기 산업의 발달과 투자의 집중으로 철도시설의 낙후 등 정체화의 길을 걷게 되었다. 그러나 산업의 고도화 및 분업화로 인한 교통수요의 급속한 증가와 다양화로 대량수송, 고속성, 안전성, 정시성, 에너지 효율성 및 환경오염 방지 측면에서 탁월한 장점을 갖는 철도의 역할을 재인식하게 되었다. 철도는 현재 제 2의 도약기에 들어서게 되었으며, 철도 르네상스 시대를 향해 줄달음 치고 있는 실정이다. 앞으로 대륙연계철도 및 동북아 교통 중심지로 자리 잡기 위해서는 기존선 및 고속철도의 정보화 구축이 필수적인 사항으로 대두되고 있다. 특히 철도 선형에 대한 정보화는 다른 시설물의 정보화 구축에 기반 자료를 제공할 수 있기 때문에 이의 선형이 필수적이다.

최근 기존선의 개량 및 이설 하고자 할 경우 기존선의 평면선형 제원은 기본적인 자료로서 필요하게 되는데, 만약 최초 선형자료의 기본인 설계도서가 분실되었거나 훼손되었을 경우에 설계제원의 복원이 불가능하며, 최근 발생하는 각종 재난으로 인한 선로 유실시 선형의 정밀 복구가 어려운 실정이다. 철도선형제원이 기본적인 지리정보 자료로서의 기능을 발휘하기 위해서는 누락된 기존선의 철도 선형에 대한 제원을 알 수 있어야 할 것이다. 이를 위해서는 신선 건설에 해당되는 측량과정을 거쳐야 되지만 이 방법은 시간 및 경제적인 비용이 많이 소요되는 문제점으로 인해 기존선의 선형제원에 대한 정보구축은 아직 초보적인 단계에 불과하다. 이에 최근에 측위 및 항법 시스템으로 활용되고 있는 GPS 방법으로 취득한 데이터를 활용해 선형 제원을 역으로 산출하여 복원된 선형정보와 설계도면에서 제시하고 있는 선형제원을 비교하여 복원 결과를 평가해 보고자 한다.

* 세경대학 토목환경과 조교수, 정의환

** 한국철도대학 시설토목과 교수, 비희원

2. 철도 평면선형 제원의 계산

일반적으로 우리나라의 철도선형은 <직선 - 완화곡선 - 원곡선 - 완화곡선 - 직선>형태가 주로 사용되며, 부득이한 경우에 <직선-원곡선-직선>의 형태가 사용된다. 이러한 철도선형설계는 공사시점의 좌표와 각각의 교점(IP)좌표, 원곡선의 반경(R), 곡선설치에 필요한 변수 및 완화곡선에 관련되는 매개변수를 알면 공사시점에서 20m의 간격으로 선형 좌표 데이터를 구할 수 있지만 이러한 기본적인 데이터의 누락이 발생했을 경우 반대로 철도선형에서의 GPS 측위 데이터를 이용한 선형제원복원 과정은 다음과 같다.

2.1 원곡선부의 중심(O) 및 반경(R) 계산

철도선형 좌표 중에서 원곡선부의 3점의 좌표를 알면 원의 공식을 사용하여 원곡선 중심의 좌표 $O(x, y)$ 와 반경(R)을 계산할 수 있다. 그림 1에서 원곡선부의 3점의 좌표를 원곡선식에 대입한 후 이식을 연립하여 중점의 위치를 구하는 식을(2-1)과 식(2-2)을 얻을 수 있다.

$$A_1 \cdot x + B_1 \cdot y = C_1 \quad (2-1)$$

$$A_2 \cdot x + B_2 \cdot y = C_2 \quad (2-2)$$

여기서,

$$A_1 = 2X_1 - 2X_2$$

$$B_1 = 2Y_1 - 2Y_2$$

$$C_1 = X_1^2 - X_2^2 + Y_1^2 - Y_2^2$$

$$A_2 = 2X_1 - 2X_3$$

$$B_2 = 2Y_1 - 2Y_3$$

$$C_2 = X_1^2 - X_3^2 + Y_1^2 - Y_3^2$$

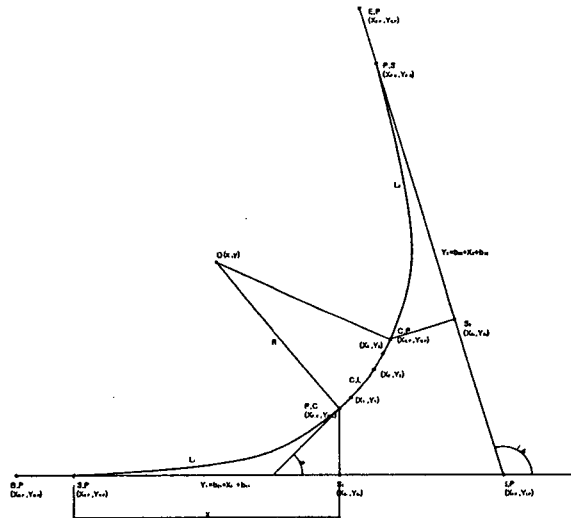


그림 1. 철도곡선부 선형

식 (2-1)과 식 (2-2)의 식을 계산하면, 원곡선 중심의 좌표 $O(x, y)$ 를 계산할 수 있다.

$$x = \frac{C_1 \cdot (B_1 \cdot A_2 - B_2 \cdot A_1) - B_1 \cdot (C_1 \cdot A_2 - C_2 \cdot A_1)}{A_1 \cdot (B_1 \cdot A_2 - B_2 \cdot A_1)} \quad (2-3)$$

$$y = \frac{C_1 \cdot A_2 - C_2 \cdot A_1}{B_1 \cdot A_2 - B_2 \cdot A_1} \quad (2-4)$$

원곡선 중심의 좌표 $O(x, y)$ 와 원곡선 상 임의의 점의 좌표 (X_n, Y_n) 를 원의 방정식에 대입하면, 반경(R)을 계산할 수 있다.

$$R = \sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2} \quad (2-5)$$

여기서,

$n : 1, 2, 3$ 중 임의의 수

2.2 교점(IP) 좌표계산

교점(IP)의 좌표는 선형 데이터에서 두 개의 직선구간 데이터를 취득한다. 취득된 데이터를 최소제곱법에 의하여 두 개의 선형 1차 함수를 구한다. 1차 함수들의 해가 교점(IP)의 좌표가 된다. 교점(IP)의 좌표를 계산하는 방법은 다음과 같다. 먼저 취득된 선형 데이터를 최소제곱법에 의하여 1차 함수를 계산한다. 이때 최소제곱법을 행렬로 표기할 때의 정규방정식은 식(2-6)과 같다.

$$X^T \cdot Y = X^T \cdot X \cdot B \quad (2-6)$$

여기서,

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

X^T : X 의 전치행렬

x_1, x_2, \dots, x_n : 관측된 x 값

y_1, y_2, \dots, y_n : 관측된 y 값

b_1, b_2 : 미지수

미지수 행렬 B 는 식(2-7)에 의하여 구할 수 있다.

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (2-7)$$

취득된 두 개의 직선구간 데이터를 식(2-7)에 대입하면 두 개의 1차 함수 식을 구할 수 있다.

$$Y = b_{21} \cdot X + b_{11} \quad (2-8)$$

$$Y = b_{22} \cdot X + b_{12} \quad (2-9)$$

식(2-8)과 식(2-9)을 연립하면 교점의 좌표 (X_{IP}, Y_{IP}) 를 계산할 수 있다.

$$X_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{12}}{b_{21} - b_{22}}, \quad Y_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{21}}{b_{21} - b_{22}} \cdot b_{21} + b_{11} \quad (2-10)$$

$$\text{or } Y_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{21}}{b_{21} - b_{22}} \cdot b_{22} + b_{21} \quad (2-11)$$

2.3 완화곡선 길이 계산

완화곡선에 관계되는 매개변수 즉 완화곡선 길이(L)는 완화곡선에서 원곡선으로 변하는 지점(P.C)이나 이와 반대의 지점(C.P)에서 두 직선이 이르는 최단거리를 이용하여 횡거를 구한 후 완화곡선 길이 계산식을 이용하여 구할 수 있다. 그림 1로부터 완화곡선과 원곡선과의 교점(P.C, or C.P)에서 직선과의 거리가 가장 짧은 직선 위의 좌표는 다음과 같다.

$$X_{S_1} = \frac{b_{21} - Y_{P.C} - \frac{1}{b_{21}} \cdot X_{P.C}}{b_{21} + \frac{1}{b_{21}}}, \quad Y_{S_1} = \frac{b_{21}^2 - b_{21} \cdot Y_{P.C} - X_{P.C}}{b_{21} + \frac{1}{b_{21}}} + b_{11} \quad (2-12)$$

$$X_{S_2} = \frac{b_{22} - Y_{C.P} - \frac{1}{b_{22}} \cdot X_{C.P}}{b_{22} + \frac{1}{b_{22}}}, \quad Y_{S_2} = \frac{b_{22}^2 - b_{22} \cdot Y_{C.P} - X_{C.P}}{b_{22} + \frac{1}{b_{22}}} + b_{12} \quad (2-13)$$

식(2-12)과 (2-13)에서 얻어진 좌표와 완화곡선 시점(S.P) 및 종점(P.S)의 좌표를 이용하여 완화곡선이 두 직선에 투영된 거리 즉, X를 구한 후 원곡선 시·종점 부에서 얻어지는 접선각을 이용 다음 식과 같이 완화곡선 길이를 결정할 수 있다.

$$L_1 = X \left(1 + \frac{1}{10} \tan^2 \theta_1 \right) \quad (2-14)$$

$$L_2 = X \left(1 + \frac{1}{10} \tan^2 \theta_2 \right) \quad (2-15)$$

이상과 같이 철도평면선형에 관계되는 기본적인 제원과 완화곡선에 관계되는 요소들은 위에서 얻어진 값과 접선각 및 횡거를 이용하면 구할 수 있는 사항들이지만, 곡선부에서 원곡선상의 위치와 직선상에서의 직선 식이 결정되면 완화곡선상에서의 계산은 쉽게 이루어진다.

3. 현장관측 및 결과

3.1 관측 대상지역 및 측량장비

GPS를 이용하여 철도선형 제원을 복원하기 위해 대상지역은 강원도 영월 역에서 화력발전소로 이어지는 구간을 선정하여 측량하였다. 이 지역으로 택한 이유는 실제 기존선에서의 작업을 수행하는데는 열차 운행에 따른 위험성이 존재하여 이러한 위험성을 내포하고 있지 않은 지역을 택하게 되었으며, 이때 사용된 장비는 그림 2와 같은 Promark X 휴대용 수신기를 사용했으며, 사용장비의 정밀도는 수평 위치가 ±3m를 확보할 수 있는 10채널 반송파 코드 수신기이다. 또한 측량결과를 비교하기 위한 데이터를 얻기 위해 TS(Total station) 측량을 실시하여 평면도에서 제시하고 있는 기본적인 제원을 적용하여 점검용 제원을 산출하였다.

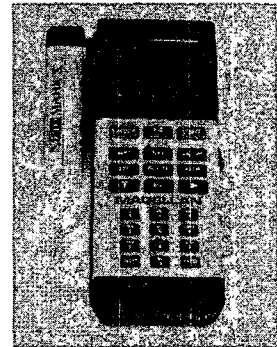


그림 2. GPS 장비

3.2 선로 평면선형제원 복원 수치계산

직선구간에서의 1차 함수의 기울기는 직선구간의 존재하는 데이터에 따라 변화를 보이므로, 직선구간으로 판단된 구간 내 모든 점을 데이터로 사용하여 최소 제곱의 원리를 적용하여 두 직선의 직선식을 계산한다. 다른 직선구간도 같은 방법에 의하여 1차 함수를 구하고, 두 개의 1차 함수의 해를 구하여 교점(IP)의 좌표를 계산하였다.

각 방향의 1차 함수로 결정되는 직선방향의 마지막 점을 완화곡선의 시·종점으로 간주하여 곡선상에서 얻어진 3점식 원방정식을 이용 중심점의 위치 및 곡선반경을 구하였다. 이렇게 구해진 곡선상의 기본요소인 교점의 위치(IP), 곡선반경(R), 원곡선의 중심위치 O(x,y)가 결정되면 평면도에서 제시하는 완화곡선 설치를 위한 해당 급선에서의 상수 값을 이용하여 철도선형에 필요한 제원들을 계산할 수 있다. 또한 직선구간 시점의 좌표, 교점의 좌표, 종점의 좌표가 계산되어진 후에는 GPS 좌표를 평면직각 좌표로 변환하여야한다. 이때 좌표의 변환은 평면위치를 복원하기 위한 내용이므로 2차원 등각 좌표변환방법을 사용했다. 이렇게 얻어진 기본 선형제원을 이용하여 철도선형 계산 프로그램을 사용하여 20(m) 간격의 데이터를 산출하였다.

3.3. 결과

GPS 방법으로 취득된 자료를 이용하여 선형제원의 복원 결과는 표 1과 같으며, 곡선상에서의 중심점에 대한 좌표 결과는 표 2와 같다.

표 1. 철도평면선형 주요제원 복원결과

구분	점검용측량결과	복원결과	편차	
곡선반경(R)	300	290.564	9.436	
교각(IA)	53° 29' 58"	52° 13' 23"	1° 16' 35"	
완화곡선장(L)	43.222	44.576	-1.354	
횡거(X ₁)	43.200	44.550	-1.35	
이정량(F)	0.262	0.288	-0.026	
접선장(TL)	172.998(m)	164.900	8.098	
곡선장(CL)	323.441(m)	309.528	13.913	
완화곡선시점 (S.P)	X(m)	408202.553	408192.380	10.173
	Y(m)	153176.310	153177.152	-0.842
원곡선시점 (P.C)	X(m)	408159.467	408148.024	11.443
	Y(m)	153179.623	153181.452	-1.829
원곡선종점 (C.P)	X(m)	407959.059	407962.062	-3.003
	Y(m)	153294.265	153289.618	4.647
완화곡선종점 (P.S)	X(m)	407934.364	407936.395	-2.031
	Y(m)	153329.726	153326.048	3.678
교점(IP)	X(m)	408029.795	408029.000	0.795
	Y(m)	153185.430	153185.732	-0.302
곡선중심점(O)	X(m)	408196.756	408194.226	2.530
	Y(m)	153477.296	153474.449	2.847

표 2. 곡선상 중심점 좌표 복원 결과 비교

Point No	X(m)			Y(m)		
	점검용	복원결과	편차	점검용	복원결과	편차(m)
0(S.P)	408202.553	408192.380	10.173	153176.310	153177.152	-0.842
1	408182.588	408190.049	-7.461	153177.467	153177.318	0.149
2	408162.668	408170.110	-7.442	153179.239	153178.881	0.358
3	408159.457	408150.239	9.218	153179.623	153181.131	-1.508
4	408142.888	408148.024	-5.136	153182.172	153181.452	0.720
5	408123.347	408130.546	-7.199	153186.416	153184.599	1.817
6	408104.133	408111.138	-7.005	153191.953	153189.413	2.540
7	408085.330	408092.107	-6.777	153198.757	153195.551	3.206
8	408067.022	408073.544	-6.522	153206.799	153202.983	3.816
9	408049.290	408055.535	-6.245	153216.042	153211.674	4.368
10	408032.214	408038.167	-5.953	153226.446	153221.583	4.863
11	408015.868	408021.522	-5.654	153237.965	153232.663	5.302
12	408000.326	408005.678	-5.352	153250.547	153244.862	5.685
13	407985.657	407990.710	-5.053	153264.136	153258.122	6.014
14	407971.926	407976.690	-4.764	153278.672	153272.380	6.292
15	407959.194	407963.684	-4.49	153294.091	153287.568	6.523
16	407959.059	407962.062	3.003	153294.265	153289.618	4.647
17	407947.433	407951.696	-4.263	153310.265	153303.573	6.692
18	407936.264	407940.388	-4.124	153326.855	153320.069	6.786
19(P.S)	407934.364	407936.395	-2.031	153329.726	153326.048	3.678

표 1에서 보여주는 것처럼 주요지점의 위치에서 점검용 데이터와 복원결과를 비교한 결과 X값

에서는 완화곡선과 원곡선 시점에서 가장 많은 차이를 나타내고 있으며, Y값에서는 원곡선과 완화곡선과의 교점에서 가장 많은 차이가 발생했다.

표 2에서 중심점에서의 선형복원 결과는 Y방향보다 X방향에서 차이가 많이 발생했으며 완화곡선의 시점의 위치에서 X방향 오차가 가장 많이 발생했으며, 편차 값의 분포가 불규칙적으로 나타났으나, Y방향의 오차는 완화곡선 종점방향으로 편차량이 증가하는 결과를 보이고 있다. 그림3은 중심선에서의 곡선상 위치관계를 나타낸 것이다.

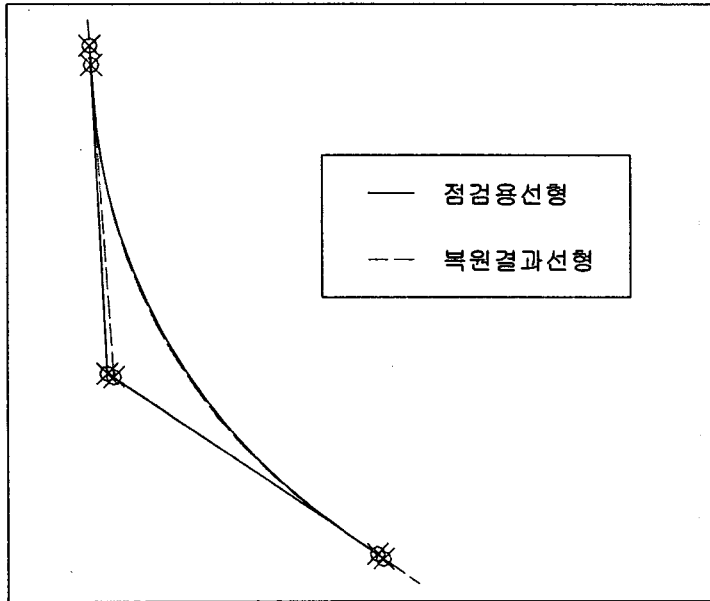


그림 3. 곡선부 선형 복원결과

4. 결론

철도선형의 기본 요소인 설계 제원을 GPS를 활용한 데이터 획득을 통해 철도선형의 설계 제원을 역 추적하기 위해 간단한 실험을 통해 얻은 결과 철도 평면선형에서 중요시되고 있는 완화곡선시점(S.P), 원곡선시점(P.C), 원곡선중점(C.P), 완화곡선중점(P.S)점들에서 X좌표의 최대차이는 원곡선시점에서 11.443m, Y좌표의 최대차이는 원곡선중점에서 4.647m 얻어졌으며, 중심선상에서의 최대편차는 X방향에서 10.173m, Y방향에서는 6.786m으로 철도선형제원을 재현할 수 있었으며, 측정된 데이터에 의하여 훼손되거나 유실된 철도의 평면선형 설계제원을 복원할 수 있으며, 복원결과를 향상시키기 위해서는 정밀도가 좋은 GPS측위 기법을 활용한다면 정확한 평면선형을 복원할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 조규전(2003), “측량정보공학”, 양서각.
2. 차득기(1996), “컴퓨터 측량계산 프로그램집”, 탐구문화사.
3. 이남수(1993), “철도측량학”, 한국철도대학.