

철도 자갈도상 궤도틀림의 줄맞춤을 위한 사장식(교차법) 적용사례

The case study of the Chord-to rail method (Transposition) application for lining track irregularities of a ballast bed track

양희성^{*†}, 김현오^{*}, 백찬호^{*}, 김석호^{*}

Yang Hoe Sung ^{*†}, Hyunoh Kim ^{*}, Chanho Paik ^{*}, Seok Ho Kim ^{*}

Abstract Track irregularities of a ballast bed track proceed continuously due to train service and environmental factors. Track irregularities can be categorized into gauge, lining, cross level and twist irregularity and maintained according to these classification. Among these irregularities, the irregularity of lining goes along not locally but widely due to a long-term operation. And the precision adjustment by measurements in construction phase is limited to adjust the irregularity of lining. There is a chord-to-rail method (Transposition) by a curved-versine to adjust the irregularity of lining under the site condition. This paper introduce the case where the chord-to-rail method is applied to adjust the irregularity of lining.

Keywords : Lining of track, Sharp curve, Chord-to-rail, Transposition

초 록 철도의 자갈도상 궤도틀림은 열차운행과 환경적 요인으로 지속적인 틀림이 발생한다. 이러한 궤도틀림의 종류로는 궤간틀림, 줄틀림, 면틀림, 수평틀림, 평면성틀림으로 대별하여 유지관리하고 있다. 특히 줄틀림은 장기적인 운행과 함께 부분적인 변형이 아닌 넓은 구간에서의 줄틀림이 발생하는 경우가 많고, 이를 정정하는데에는 최초 건설 당시와 같이 측량에 의한 정밀정정에는 한계가 존재한다. 현장여건에 정정하는 방법으로 곡선 종거에 의한 사장식(교차법) 정정법이 존재하는데, 이를 적용한 사례를 소개하고자 한다.

주요어 : 줄맞춤, 급곡선, 사장식, 교차법

1. 서 론

철도 자갈도상의 궤도는 열차운행에 따른 궤도틀림이 발생한다. 특히 줄틀림의 정정은 운행 중인 선로여건에서 최초 부설 당시의 선로 상태로 복원하기에는 어려움이 따른다. 또한 단시간 유지보수 특성을 고려 할 때 측량기를 사용하는데도 곤란을 겪게 된다.

본 논문에서는 측량기를 사용하지 않고 현장에서 곡률(종거)만을 기준하여 간략하게 줄맞춤 정정을 수행할 수 있는 방법인 사장식(교차법) 정정법을 소개하고 적용사례를 제시하고자 한다.

† 교신저자: 서울메트로 경영지원본부 미래사업처(hoesong@seoulmetro.co.kr)

* 서울메트로 경영지원본부 미래사업처

2. 사장식 곡률틀림 정정방법

2.1 현장종거 측정

일반적인 종거의 측정방법은 10m ~ 20m(곡선반경 크기에 따라 선택)의 길이의 현을 이용하여 중앙 검측부로부터 레일두부 하방 14mm지점과 현간의 측면종거(versine 값)를 5m 단위로 측정하는 형태를 취한다. 하지만 기존 운행선에 대한 종거측정 시에는 레일마모와 레일후로(Flow)에 영향이 없는 레일 두부 하방 20mm 위치를 측정하는 것이 보다 정확한 측정결과를 확보할 수 있다.

본 논문에서는 원곡선에서 사장식 곡률틀림 정정방법의 사례분석을 통해, 기존 운행선에서 효율적으로 시공 가능한 선형정정 방안을 제시하고자 한다.

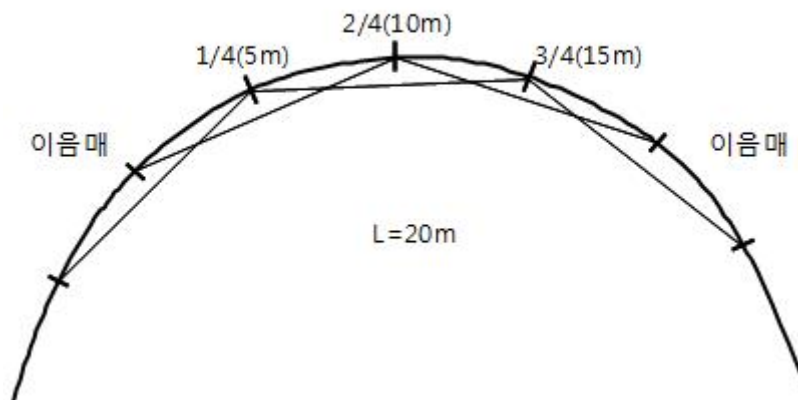


Fig. 1 Alignment Irregularity Measurement Method

주요 용어는

- 측정번호 : 실의 길이 1/2(10m인 경우 5m) 단위로 종거를 측정하는 위치이며, 측정번호는 순차적으로 부여한다.
- 현장종거 : 현장에서 측정한 종거값으로 정척레일(20m)에서 10m 길이의 현으로 선로연장 5m단위로 측정한 값을 말한다

- 계획종거 : $M = \frac{L^2}{8R}$ (M = 중앙종거, R = 곡선반경, L = 실의길이)에 의거 산출된 값을

말한다. 현장에서 곡선반경을 확인하고자 할 경우 $R = \frac{L^2}{8M}$ 이 된다.

- 종거의 차 : 현장종거에서 계획종거를 차인한 치수로 현장종거가 계획종거보다 적은 경우 (-)부호를 붙인다. 즉 (-)가 발생된다면 궤도는 곡선 내방으로 이동하는 것을 의미한다.
- 차의 누계 : 종거의 차를 순차적으로 더하여 나온 값이다.
- 반이동량과 이동량 : 이동량은 종거값을 기준하여 이동하는 것으로 반이동량은 이동량의 1/2이다. 즉 차의 누계로 먼저 반이동량을 구하고 이것을 2배하여 이동량을 산출된다.

이때 유의할 사항은 최초 측점과 최후의 측점은 이동 대상이 아니므로 반이동량이 “0” 이 되도록 해야 한다.

2.2 이동량 산출방법

현장중거 결과를 기준으로 계획중거를 산출하여 각 측점 값을 산출한다. 이때 산출함에 있어 아래 5가지 조건이 충족되어야 정확한 산출을 이루었다 할 수 있다.

- 현장중거의 합계는 계획중거의 합과 반드시 동일해야 함
- 중거의 차(±)의 합계는 반드시 “0” 이 되어야 한다.
- 차의 누계 최종측점도 반드시 “0” 이 되어야 한다.

· 반이정량 최초측점과 최종측점은 반드시 “0” 이 되어 이동량 역시 “0” 이 되어야 함
반이정량 산출은 1행의 반이정량(0)에서 그 행의 차의 누계를 가산하여 그 행의 반이정량을 산출하고 연속하여 계산하고 마지막은 “0” 이 되어야 한다.

이때 마지막 측점의 값이 “+” 이면 상증하감, “-” 이면 상감하증 방법으로 계획중거 값을 수정하여 마지막 측점값이 “0” 이 되도록 하여야 한다.

2.3 계획중거 산출방법

원곡선 측정값 모두를 합하여 측점수에 따라 평균중거를 산출한다. 평균 중거값을 역으로 환산하여 곡선반경을 산출 할 수 있다. 이때 유의사항은 설계곡선 반경은 궤도중심이나 레일중거 측점은 곡선외측레일이므로 궤간의 1/2이(1435mm/2=717.5mm) 가산된 곡선반경이 되어, 설계 곡선반경과 일치하지 않게 된다.

곡선반경은 산출 후 곡선연장을 아래공식으로 산출한다

$$\text{원곡선연장} = \left(\frac{\text{중거합계}}{\text{중거}} \right) \times \text{측점간의거리}$$

원곡선 연장과 측점간의 거리(측점수×측점간격)를 비교하여 원곡선 연장이 짧은 경우는 원곡선의 방향을 산출된 거리만큼 이동되어야 한다는 뜻이 된다.

이때 완화곡선이 있는 곡선에서는 곡선전체가 옮겨야 하는지 단순히 원곡선 길이만 옮겨야 하는지를 검토하여야 한다.

검토방법은 측점번호에서 곡선 끝 측점에서 직선부 방향의 시종점으로 중거 합을 산출하고 중거값이 적은 방향으로 옮기고, 비슷하면 시종점을 동일하게 줄이거나 늘리면 된다.

이렇게 검토하게 되면 현장에서 곡선반경, 원곡선 시종점, 완화곡선 시종점의 위치를 찾아 낼 수 있게 된다.

본 논문에서는 완화곡선 계획 중거 산출방법은 생략하였다.

2.4 산출예시

현장중거의 값이 아래표와 같이 측정 되었고, 계획중거 값이 표1과 같다면 계산 예는 원곡선 이동량 산출 결과는 아래와 같다.

Table 1 Example of Calculation

No	Measured Value	Plan Value	Difference Value	Sum of the difference	Half Displacement	Displacement
1	100	100	0	0	0	0
2	91	100	-9	-9	0	0
3	112	100	12	3	-9	-18
4	108	100	8	11	-6	-12
5	84	100	-16	-5	5	10
6	105	100	5	0	0	0
7	100	100		0	0	
Sum	700	700	0	0		

위의 사례와 같이 이동량의 시종점이 “0” 이 맞게되면 이상적인 곡선에서의 줄뜸림이 발생되었다 할 수 있으나, 현장에서는 일치하지 않게 되어 이동량을 정정해야하는 경우가 대부분 발생하게 된다.

현장 중거 및 계획중거를 산출한 결과가 “산출예시 2” 와 같이 최종 이동량 종점이 “0” 이 도출되지 않으면 계획중거를 정정하여 이동량 종점이 “0” 이 되도록 해야 한다.

정정방법은 원곡선부의 중거는 어디나 일정하며, 완화곡선부는 일정률로 중거가 증감된다. 따라서 계획중거도 일정하여야 할 것이나 건조물의 위치나 노반폭이 여의치 않을 때는 부득이 원도를 변경하여 이동량을 증감할 필요가 있다. 이를 수정하려면 계획중거를 적당히 고쳐 이동량을 조절하므로 손쉽게 할 수 있다.

여기서 중요한 것은 반이동량의 숫자를 줄이려면 먼저 줄이려는 측점의 계획중거를 감한다. 다음 반이동량을 줄이려고 생각하는 수 만큼 측점을 상행으로 거슬러 세어 그점의 계획중거를 증감하면된다.

즉 반이정 최종측점 틀림량이 (+)이면 상증(+),하감(-)으로 계획중거를 정정하고, 반이정 최종측점 틀림량이 (-)이면 상감(-),하증(-)의 법칙으로 계획중거를 변경하여 이동량 종점이 “0” 이 되도록 해야 한다.

산출예시3의 검측 결과를 사례로 계획중거 정정방법을 제시하고자 한다.

이동량 종점이 +6의 틀림량이 발생되었으므로 2mm를 상증, 하감으로 정정하여 이동량 종점을 “0” 으로 산출하여 중거 이동량을 산출한 사례이다.

Table 2 Example of Calculation

No	Measured Value	Plan Value	Difference Value	Sum of the difference	Half Displacement		Displacement
1	32	30	2	2	0		0
2	25	30	-5	-3	2		4
3	34	30	4	1	-1		-2
4	32	30	2	3	0		0
5	27	30(+2)증	-5	-2	3		6
6	32	30	2	0	3	1	2
7	29	30	-1	-1	5	1	2
8	29	30(-2)감	1	0	6	0	0
9	30	30	0	0	6	0	0
10	30	30	0	0	+6	0	0
Sum	300	300	0	0			

정정방법으로는 측점 (8)을 2감하여 28로하고 6은 그 수의 3배이므로 측점은 3행을 위로 올라가 측점(5)의 계획중거를 2증하여 32로 계산한 결과로 차행인 측점(6)부터 2씩 순차적으로 감되어 3행 아래인 측점(8)에서 6을 감해주어 반이동량이 0이 되었다.

다른 방법으로는 계획중거를 1개소에서 3-6을 증감할 수도 있으나 1개소에서 많은 계획중거를 변경하면 곡선의 원도가 불량하여지므로 증감량의 치수를 가능한 한 줄여서 1-2mm 정도로 하는 것이 바람직하다.

다음은 이동량이 - 인 경우 상감(-),하증(+)으로 이동량을 산출한 결과 예시이다.

Table 3 Example of Calculation

No	Measured Value	Plan Value	Difference Value		Sum of the difference		Half Displacement		Displacement
1	32	30(-1)감	2	3	2	3	0		0
2	31	30(-1)감	1	2	3	5	2	3	6
3	25	30	-5		-2	0	5	8	16
4	27	30	-3		-5	-3	3	8	16
5	29	30	-1		-6	-4	-2	5	10
6	34	30(+1)증	4	3	-2	-1	-8	1	2
7	32	30(+1)증	2	1		0	-10	0	0
Sum	210	210	0		0				

정정방법으로는 측점(7)의 계획중거를 1증하여 31로 하고 10증 하려면 10행위로 올라가야 하나 측점이 7행밖에 없으므로 측점(1)에서1감하여 29로하면 6증효과가 발생되고 측점(6)에서 1증31로 하고 4부족은 4행위인 측점(2)에서 1감29로 하여 정정한 사례이다.

3. 적용사례

3.1 급곡선 원곡선 종거검측

적용한 사례는 최급곡선(곡선반경 60m)으로 현장 원곡선 측정 결과 단일 원곡선내에 운행 과정 중 복심곡선이 형성되어 있었다.

이러한 복심곡선 형성의 원인을 분석하면 차량기지 내 무인운행 과정 중 원곡선 내에서 일시 정차 후 출발하는 운행계획과 관련된 요소와, 급곡선(R60) 자갈궤도에 833mm 간격의 침목(wood sleeper)간격 등 불리한 궤도 제원에 기인하여 발생하는 도상저항력 저하 등이 주된 원인으로 분석된다.

현장측정 결과(종거)를 바탕으로 본 논문 2장에서 제시한 사장식 곡률틀림 정정방법에 의해 이동량을 산정한 결과 현실적으로 운행선 현장에 적용 가능한 이동량 산정이 사실상 불가능하다는 결론에 도달하였는데, 그 사유는 원곡선 내에서의 복심곡선에 따른 영향으로 분석되었다.

이러한 경우 곡선을 분할하여 각각의 곡선에 개별적으로 사장식 곡률틀림 정정방법을 적용하는 것이 효율적이다. 하지만 이번 사례는 불규칙한 궤도틀림, 레일의 비정상마모 등 대상 원곡선 내에서 발생하고 있는 궤도열화 현상에 대한 근본적인 해결을 목표로 하였기에, 이동량을 최소화 하면서 전 곡선연장(170m)을 효율적을 정정할 수 있는 수정된 사장식 곡률틀림 정정방법을 적용하였다.

계획종거의 변경이 약 6차레에 걸쳐 수정한 결과 가장 이상적인 이동량을 확보하였고, 이동량 종점에서 “0”에 도달하는 만족한 결과 값을 도출하였다.

그 결과는 다음 표와 같다.

Table 4 Example of Calculation

No	Measured Value	Radius of Curve	Plan Value (A Neighbor's Mean Value)	Value Adaptation	Calibration Value	Difference Value	Sum of the difference	Half Displacement	Displacement
1 (건널목)	182	68.681	182	182	182	0	0	0	0
2	183	68.306	183	183	183	0	0	0	0
3	183	68.306	184	184	184	-1	-1	0	1
4	187	66.845	214	214	211	-24	-25	-1	-1
[5]	271	46.125	212	212	210	61	37	-25	-51
6	177	70.621	210	210	208	-31	5	11	23
7	183	68.306	179	199	198	-15	-10	17	33
8	177	70.621	197	197	195	-18	-28	7	14
[9]	231	54.113	203	203	202	29	1	-21	-41
10	202	61.881	216	216	213	-11	-10	-20	-39
11	216	57.870	212	212	211	5	-5	-30	-60
12	217	57.604	226	226	221	-4	-9	-35	-70
[13]	245	51.020	217	217	216	29	20	-44	-88

14	188	66.489	210	210	210	-22	-2	-24	-47
15	197	63.452	188	188	188	9	8	-25	-51
16	178	70.225	192	192	189	-11	-3	-18	-35
[17]	200	62.500	181	181	184	16	13	-21	-41
18	165	75.758	193	193	193	-28	-15	-8	-15
19	215	58.140	199	199	200	15	-1	-23	-46
20	218	57.339	232	230	220	-2	-3	-24	-47
[21]	264	47.348	230	230	229	35	32	-27	-53
22	207	60.386	215	215	212	-5	28	6	11
23	173	72.254	181	181	194	-21	7	33	67
24	162	77.160	184	184	184	-22	-15	40	81
[25]	217	57.604	186	186	188	29	14	25	51
26	180	69.444	204	204	204	-24	-10	39	78
27	215	58.140	208	208	212	3	-7	29	57
28	229	54.585	245	235	235	-6	-13	21	43
[29]	290	43.103	236	236	234	56	43	8	17
30	188	66.489	210	210	210	-22	21	52	103
31	153	81.699	173	183	201	-48	-27	73	145
32	177	70.621	197	197	197	-20	-46	46	92
[33]	260	48.077	214	214	213	47	0	0	-1
34	206	60.680	206	206	206	0	0	0	0
합계	6,936	62.700	6,918	6,936	6,936	0			

정정 결과 6개소의 이음매에서 (-)값이 도출되었고, 2개소의 이음매에서 (+)값이 도출되었다. 이동량을 최소화하는 방안으로 도출되었고, 복심곡선 현상을 최대로 완화 하였다 할 수 있다.

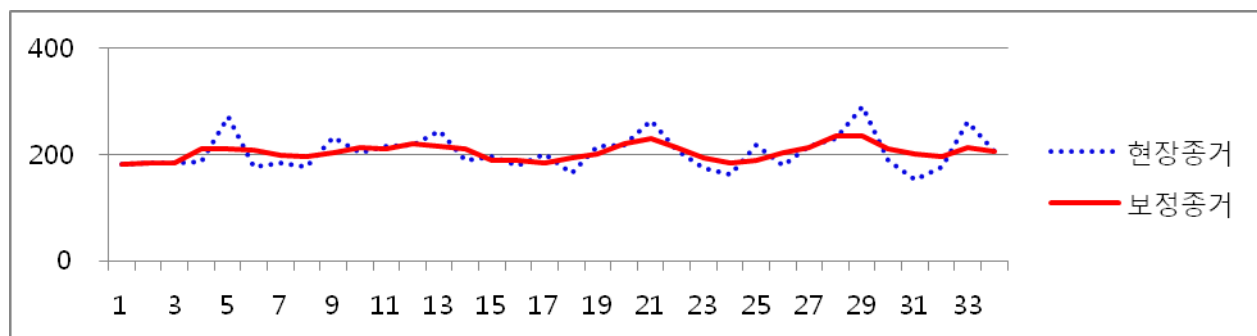


Fig. 2 The comparison of Alignment calibration results

정정량을 도표화 하여 검토한 결과 이미지와 같이 현장중거, 계획중거, 보정한 결과의 중거 과정에서 현장 여건에서 가장 이상적인 방향으로 정정되었음을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 자갈도상 급곡선에서 열차운행 여건에 따라 필연적으로 발생하는 궤도틀림을 현장 여건에 맞도록 정정하기 위한 “사장식 곡률틀림 정정방법” 적용한 사례를 제시 하였다.

연구 결과 사장식 곡률틀림 정정방법은 측량기를 사용하지 않고 현장에서 곡선구간 선형을 분석하고, 궤도 정정량을 가장 이상적으로 찾아가는 방안을 알 수 있었다.

본 논문에 제시 되었듯이 사장식 곡률틀림 정정방법은 곡선구간 내 궤도틀림이 국부적으로 발생한 운행선의 경우에는 가장 효과적인 정정방법이 될 수 있다. 하지만, 곡선 내에 열차주행 에 따른 궤도변형 형태가 복심 등으로 나타나는 경우에는 궤도 정정량 산출에 일부 어려움이 발생되어 현장 여건에 따라 이동량을 최소화 하는 방안으로 수정·적용 할 수 밖에 없다는 한계도 인식하게 되었다.

최근에는 궤도틀림 정비 등의 선로유지보수 작업에 대형기계장비를 투입하는 경우가 일반적이다. 하지만 본 연구 결과 기존 시설물과의 인터페이스가 중요한 기존선 구간에 국부적이고 불규칙한 궤도변형 발생하는 경우에는 “사장식 곡률틀림 정정법”은 하나의 좋은 대안이 될 수 있다는 것을 본 사례를 통해 증명하고자 하였다.

참고문헌

사장식 해설 배포자료(양연석 코레일 동해시설관리사무소)