

국내·외 현황 분석을 통한 도시철도 곡선부 선로선형 설계기준 연구

A Study on the Design Criteria of the Alignment in the Curve for Urban Rail Transit

신정렬¹, 홍재성², 이우동³, 김길동⁴, 한석윤⁵, 양신추⁶

Jeong-Ryol Shin, Jae-Sung Hong, Woo-Dong Lee, Gil-Dong Kim, Seok-Yun Han, Sin-Chu Yang

Keywords : alignment, urban rail transit, cant, curve radius, transition curve, curved railway

ABSTRACT

With designing alignment of railway for urban rail transit, a greater attention is paid to the riding safety and the comfort of the passengers. Especially, cant, transition curve, minimum curve radius are considered as very important alignment factors for the curve. For the above alignment factors, in this study, comparative studies on the design criteria of foreign rail transit are conducted. And reasonable design criteria of the alignment for urban rail transit are proposed.

1. 서론

우리나라 지하철 선로 계획시 직선부를 채택하는 것이 운전 및 유지보수면에서 유리하나, 현장 지형지물, 주변 환경 및 인접 노선 등의 제반 여건상 부득이하게 곡선부를 설치할 수밖에 없는 경우가 많다. 하지만, 우리나라의 서울 1기, 2기 지하철을 포함하여 부산, 대구, 인천, 광주, 대전 지하철의 곡선부 선로선형 설계시 몇몇 항목에 대하여 각기 상이한 선형 기준을 적용하고 있으며, 적용 환경이 상이함을 감안할 때 다소 불합리하게 적용된 항목이 있는 실정이다.

본 연구에서는 지하철 곡선부에서의 설계시 민감한 선형 항목인 정거장 최소곡선반경, 캔트량, 완화곡선 길이의 설계 기준에 대하여 우리나라와 일본 영단 지하철, 영국 Jubilee 신선, 독일 지하철에서 적용하고 있는 선형 기준과의 비교·분석을 토대로 승객의 안전, 열차 주행 안전과 승차감을 고려한 합리적인 도시철도 선로 선형 설계기준 개선(안)을 제시하였다.

2. 곡선 정거장 최소곡선반경

곡선 정거장의 최소곡선반경 결정시 승강장 연단에서 차량간의 과도한 이격거리, 캔트에 의한 승차감 불량, 그리고 열차 가·감속시 캔트부족량에 의한 레일과 차륜의 편마모 발생 등의 문제를 고려하여야 한다.

2.1 승강장 연단/차량간 이격거리

곡선 정거장에서는 승강장 연단과 차량간에 최대 및 최소 이격거리가 발생하게 되는데 곡선반경별로 이를 산정하면 Table 1과 같다. 현재, 대형전동차가

1 정회원, 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, 주임연구원
2 정회원, 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, 선임연구원
3 정회원, 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, 선임연구원
4 정회원, 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, 책임연구원
5 정회원, 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단, 단장
6 정회원, 한국철도기술연구원 국토토목연구본부, 본부장

Table 2 Gap between platform and train in the curve

정거장 곡선반경	최소 이격거리 e_{min} (mm)	최대 이격거리 e_{max} (mm)	
		대형 전동차 (차체길이19.5m)	중형 전동차 (차체길이17.5m)
300	50	208	178
400	50	169	146
500	50	145	127
600	50	129	114
700	50	118	105
800	50	109	98
900	50	103	93
1000	50	98	88
1200	50	90	82
1500	50	82	76
2000	50	74	69
2500	50	69	65
3000	50	66	63

운행중인 서울시 지하철에서 곡선 정거장의 허용 최소 곡선반경인 400m의 경우, Table 1에서 보듯이 승강장 연단과 차량간 최대이격거리가 169mm가 되어 승객의 차량 승·하차시 안전사고가 우려된다. 그리고 중형전동차가 운행 혹은 건설중인 부산, 대구, 인천, 대전, 광주 지하철에서는 곡선 정거장의 허용 최소곡선반경인 600m의 경우, Table 1에서 보듯이 승강장 연단과 차량간 최대이격거리가 114mm가 되어 서울시 지하철의 경우보다는 작은 값이나 이 역시 승객의 차량 승·하차시 안전사고가 우려된다.

2.2 곡선 정거장에서의 캔트량 및 캔트부족량

서울시 지하철에서 적용하고 있는 정거장 최소곡선반경 400m인 곡선 정거장의 승강장 길이가 165m(대

형전동차 8량 길이 160m에 앞·뒤 여유 5m)인 경우, 열차가 승강장 단부를 들어설 때의 통과속도는 통상 감속도 3.5km/hr/sec를 고려하면 식(1)에 의해 약 64.5km/hr가 된다. 그러면, 승강장 진입속도에 대하여 실제로 필요로 하는 캔트량 즉, 균형 캔트량은 식(2)에 의해 약 123mm가 된다. 그러나, 실제 열차가 정지한 상태에서 승객의 승차감 문제가 발생할 수 있기 때문에 부득이하게 캔트부족량을 두게 된다. 캔트부족량을 많이 적용하여 설정 캔트량을 줄인다면 열차 정차시 승객의 승차감 문제는 해결되나, 열차가 감속시 과도한 캔트부족으로 인해 승차감이 저하될 뿐만 아니라 레일에 편마모가 발생하게 되는 등 유지보수면에서 불리하게 된다.

$$\text{승강장 진입속도, } V = \sqrt{7.2 \cdot a \cdot l} \quad (1)$$

$$\text{균형 캔트량, } C_{eq} = 11.8 \cdot V^2/R \quad (2)$$

※ a : 감속도(3.5km/hr/sec), l : 승강장 길이(m)

Table 2에 곡선 정거장 길이별, 곡선반경별 균형 캔트량을 나타내었고, 정거장에서의 캔트량을 30mm로 제한하는 경우의 캔트부족량을 나타내었다. 현재, 대형전동차가 운행중인 서울시 지하철에서 곡선 정거장의 허용 최소곡선반경인 400m의 경우, Table 2에서 보듯이 10량 편성인 경우 캔트부족량이 122mm, 8량 편성인 경우 93mm로 열차 가·감속시 승차감 저하와 함께 레일의 편마모가 우려된다. 그리고 중형전동차가 운행 혹은 건설중인 부산, 대구, 인천, 대전, 광주 지하철에서는 곡선 정거장의 최소곡선반경을 600m까지 허용하고 있는데, 10량 편성인 경우 캔트부

Table 3 Equivalent cant and cant deficiency of the curved railway in the station

곡선 반경 (m)	$l = 205m$ (대형10량 편성)				$l = 165m$ (대형8량 편성)				$l = 185m$ (중형10량 편성)				$l = 149m$ (중형8량 편성)			
	V	C_{eq}	C	C_{def}	V	C_{eq}	C	C_{def}	V	C_{eq}	C	C_{def}	V	C_{eq}	C	C_{def}
300	72	203	30	173	64	164	30	134	68	183	30	153	61	148	30	118
400	72	152	30	122	64	123	30	93	68	138	30	108	61	111	30	81
500	72	122	30	92	64	98	30	68	68	110	30	80	61	89	30	59
600	72	102	30	72	64	82	30	52	68	92	30	62	61	74	30	44
700	72	87	30	57	64	70	30	40	68	79	30	49	61	63	30	33
800	72	76	30	46	64	61	30	31	68	69	30	39	61	55	30	25
900	72	68	30	38	64	55	30	25	68	61	30	31	61	49	30	19
1000	72	61	30	31	64	49	30	19	68	55	30	25	61	44	30	14
1200	72	51	30	21	64	41	30	11	68	46	30	16	61	37	30	7
1500	72	41	30	11	64	33	30	3	68	37	30	7	61	30	30	0
2000	72	30	30	0	64	25	25	0	68	28	28	0	61	22	22	0
2500	72	24	24	0	64	20	20	0	68	22	22	0	61	18	18	0
3000	72	20	20	0	64	16	16	0	68	18	18	0	61	15	15	0

※ l : 승강장 길이, 단위 : V (km/hr), C_{eq} (mm), C (mm), C_{def} (mm)

족량이 62mm가 되어 열차 가·감속시 다소 승차감 저하와 함께 레일의 편마모가 우려되며, 8량 편성인 경우 캔트부족량이 44mm로 다소 양호하다.

2.3 영국에서의 최소곡선반경 기준

영국에서는 정거장에서의 최소곡선반경을 1,000m로 하여, 균형 캔트량 자체를 작게 함으로써 캔트부족량을 줄일 수 있어 열차 정차시 및 열차 가·감속시 승객의 승차감을 제고시키고, 승강장 연단과 차량간의 이격거리도 줄일 수 있어 승객의 안전성을 향상시키고 있다.

2.4 곡선 정거장에서의 최소곡선반경 기준(안)

Fig. 1은 곡선 정거장에서의 곡선반경별 승강장 마감면과 차량간의 최대 및 최소이격거리를 나타내었고, Fig. 2는 캔트량을 30mm로 제한하는 경우에서의 곡선반경별 캔트부족량을 나타내었다.

Fig. 1과 Fig. 2로부터, 승강장 연단과 차량간 이격거리를 100mm내외로 제한함으로써 승객의 승·하차시 안전을 확보하고, 설정 캔트량 30mm에서 캔트부족량을 40mm로 제한하여 열차 정차시 및 열차 가·감속 운행시 승객의 승차감을 향상시키고, 레일 편마모 현상을 저감시켜 유지보수면에서 유리하게 하기 위하여 곡선 정거장의 적정 곡선반경을 대형전동차인 경우 900m, 중형전동차인 경우 800m로 한다.

3. 곡선 선로 캔트량

곡선부에서의 캔트는 열차 탈선·전복 등 열차 주행안전과 승객의 승차감 및 궤도부담의 평균화를 위한 중요한 선형 항목으로서, 곡선부 통과시 차량이 내·외측으로 전도되지 않도록 내측 전도에 대한 안전율을 3, 외측 전도에 대한 안전율을 4로 정하여 곡선반경별 열차 통과속도를 정하고 있다. 다음 Table 3은 현재 서울 지하철에서의 곡선반경별 설계속도를 나타낸다.

3.1 각 국의 설정 캔트량 기준

우리나라에서 캔트는 다음 식(3)과 같이 산정하고 허용캔트부족량 C' 을 0~100mm로 하여 현장여건에 맞도록 조정하여 적용하고 있으며, 최대캔트량은 160mm로 제한하고 있다[1].

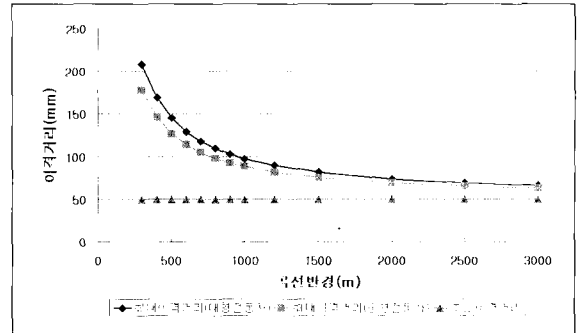


Fig. 1 Gap between platform & train

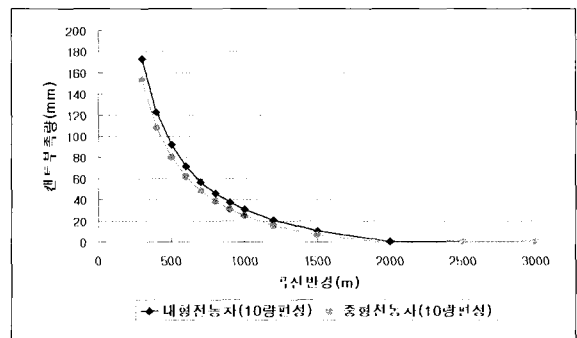


Fig. 2 Cant deficiency in the curved station (actual cant ; 30mm limited)

Table 4 Design velocity(Seoul Subway)

곡선반경(m)	200	250	300	400이상
설계속도(km/hr)	55	65	70	80

서울 지하철에서는 곡선부에서 C' 을 일반적으로 40mm로 적용하여 캔트량을 정하고 있으며, 서울지하철 9호선의 경우 C' 을 0mm 즉, 캔트를 균형캔트량 그대로 적용하고 있다. 한편, 분당선 등에서는 모든 곡선부에서의 캔트를 균형캔트의 68%로 일률적으로 적용하고 있다.

일본 지하철에서는 다음 식(4)를 사용하여 캔트를 적용하고 있으며, 최대캔트는 협궤인 구간에서는 115mm, 표준궤인 구간에서는 142mm로 제한하고 있다[2].

독일에서는 다음 식(5)을 사용하여 캔트를 적용하고 있으며, 이때 허용캔트부족량 C' 은 130mm 이하이다. 또한, 최대캔트는 유도상궤도 구간에서는 160mm, 콘크리트궤도 구간에서는 170mm로 제한하고 있다.

영국 지하철에서는 다음 식(6)을 사용하여 캔트를 적용하고 있으며, 이때 허용캔트부족량 C' 은 90mm

이하($\approx 90 - C_{ca}/4$)이다. 또한, 최대캔트는 150mm로 제한하고 있다.

$$C = 11.8 V^2/R - C' \quad (3)$$

$$C = 8.4 V^2/R \text{ (궤간 1.067m의 경우) ,}$$

$$C = 11.3 V^2/R \text{ (궤간 1.435m의 경우)} \quad (4)$$

$$11.8 V^2/R - C' \quad (5)$$

$$11.82 V^2/R - C' \quad (6)$$

Table 4에 각 국의 곡선반경별 설정캔트량을 나타내었다. Fig. 3에서와 같이 곡선반경에 따라 속도 차이가 나는데 서울시 지하철 기준에서처럼 열차속도와 무관하게 균형캔트량에 부족캔트량을 40mm씩 적용하여 캔트량을 설정한다면 곡선반경이 커질수록 균형캔트량에 대한 설정캔트량 비율이 현저하게 떨어지는 것으로 보아 본 설정 방법은 다소 불합리한 방법이라 사료되며, 서울지하철 9호선 기준에서처럼 균형캔트량을 그대로 적용하는 것도 다음 4절에 설명할 완화곡선 길이가 길어져 선형계획에 있어서 상당히 어려움이 따를 뿐만 아니라, 실제 지하철에서 차량이 역간거리 제한에 따라 속도를 제한받는 경우 혹은 ATC 운전에서 따라 규정속도보다 저속으로 곡선부를 운행하는 경우가 빈번하므로 균형캔트량을 그대로 적용함은 오히려 승차감에 역효과를 줄 수 있다.

한편, 영국 Jubilee 신선 기준은 각 곡선반경별 캔트부족량을 최대 캔트부족량 90mm에서 균형캔트량

의 일정 비율을 차감한 값으로 하여 각 곡선반경별 설정 캔트량을 산정하는데, Fig. 3에서와 같이 이 방법 역시 서울시 지하철과 같이 곡선반경이 클수록 균형캔트량에 대한 설정캔트량 비율이 현저하게 떨어지는 데다가, Fig. 4에서 곡선반경 2,000m이하구간에서는 서울시 지하철에서의 캔트부족량보다 캔트부족량이 더 커서 합리적이지 않은 방법이라 사료된다. 하지만, 일본기준과 분당선 기준에서처럼 균형캔트량의 일정 배율을 적용하는 것은 Fig. 4에서와 같이 곡선반경이 작을수록 캔트부족량이 커지는 경향이 있지만, 곡선반경에 대한 최대 캔트부족량을 40mm이하로 제한을 둬으로써 이 문제를 해결할 수 있다. 하지만, 일본 기준은 균형캔트량의 96%를 설정캔트량으로 함으로써 다음 4절에 설명할 완화곡선 길이가 길어져 선형계획에 있어서 상당히 어려움이 따른다.

3.2 설정 캔트량 기준(안)

설정 캔트량은 일본 기준과 분당선 기준에서처럼 균형캔트량의 일정배율을 적용하되, 곡선반경이 작은 경우에 캔트부족량 상한치를 40mm이하로 제한을 하고, 균형캔트량의 적정배율을 적용하여 산정할 필요가 있다. 여기에서, 적정배율은 곡선반경이 2,000m인 경우에 균형캔트량 38mm인 점과 현 서울시 지하철 기준에서 최대 허용캔트부족량이 40mm인 점을 감안하여, 최대 균형캔트량을 갖는 곡선반경 250m인 경우의 균형캔트량 199mm에 대한 비율은 대략 20%이므로, 적정 배율을 80%로 하였다. 이에 대하여, Table 4

Table 5 Comparison of cant values and recommended cant

곡선반경 (m)	설계속도 (km/hr)	균형캔트량 (mm)	설정 캔트량(mm)			
			서울 1,2기 기준	일본 영단 지하철 기준	영국 Jubilee 신선 기준	설정캔트량(안)
200	55	178	138	142	133	143
250	65	199	159	142	150	160
300	70	193	153	142	150	154
400	80	189	149	142	146	151
500		151	111	142	99	121
600		126	86	121	68	101
700		108	68	103	45	86
800		94	54	90	28	76
900		84	44	80	15	67
1000		76	36	72	5	60
1200		63	23	60	0	50
1500		50	10	48	0	40
2000		38	0	36	0	30
2500		30	0	29	0	24
3000		25	0	24	0	20

에 설정 캔트량 제안치를 나타내었으며, Fig. 5과 Fig. 6에 각각 곡선반경별 균형캔트량에 대한 설정캔트량 비율과 곡선반경별 캔트부족량에 대한 그래프를 각국의 그래프와 비교하여 나타내었다.

4. 완화곡선 길이

곡선부에서 캔트 체감을 위한 완화곡선의 길이는 열차 주행의 안전과 승객의 승차감에 직접적으로 영향을 미치는 주요 항목이며, 선형 설계시에도 이를 감안하여 설계하는 매우 중요한 항목이다.

4.1 각국의 완화곡선 길이 기준

일본 등 국외 지하철에서의 완화곡선의 길이는 식(7)과 같이 열차 주행시 캔트의 시간적 변화율에 대한 승차감 한도를 고려하여 정하고 있다.

$$\frac{\{\text{캔트량의 시간적 변화율}\}}{\{\text{열차주행속도}\}} = \frac{\{\text{캔트량}\}}{\{\text{완화곡선길이}\}} \quad (7)$$

일본의 경우, 캔트량의 시간적 변화율에 기초한 완화곡선 길이를 열차속도에 따라 초당 38.6mm까지 변화하는 것을 희망치로, 초당 57.1mm까지 변화하는 것을 허용치로 하고, 그 중간값을 취하여 식(8)과 같이 산정하고 있다[2].

독일의 경우에는 캔트량의 시간적 변화율을 초당 37.0mm까지 변화하는 것을 허용치로 하여 다음 식(9)와 같이 산정한다.

영국의 경우에는 캔트량의 시간적 변화율을 초당 35.0mm까지 변화하는 것을 허용치로 하여 다음 식(10)과 같이 산정한다.

우리나라의 경우에는 미국 AREA기준을 참고하여 초당 31.75mm까지 변화하는 것을 허용치로 하여 다음 식(11)과 같이 산정식을 정하였지만, 속도별로 완화곡선 길이를 다르게 적용하지 않고, 식(11)에 현재 4급선의 최고속도 70km/hr를 고려하여 즉, 캔트의 600배를 적용하여 완화곡선 길이를 정하고 있다(부득이한 경우 캔트의 450배)[1].

$$L = 0.0062 \cdot C \cdot V = 0.07 V^3/R \quad (8)$$

$$L = 0.0075 \cdot C \cdot V = 0.0847 V^3/R \quad (9)$$

$$L = 0.0079 \cdot C \cdot V = 0.0893 V^3/R \quad (10)$$

$$L = 0.00875 \cdot C \cdot V = 0.1 V^3/R \quad (11)$$

※단위 : L(m), C(mm), V(km/hr), R(m)

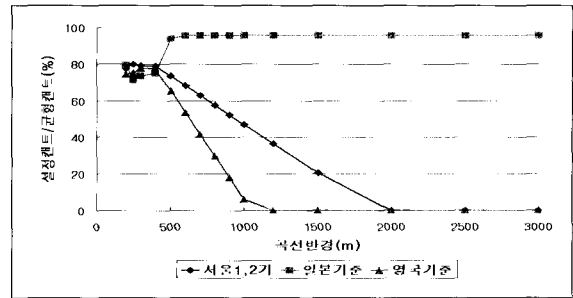


Fig. 3 Ratio of actual cant and equivalent cant

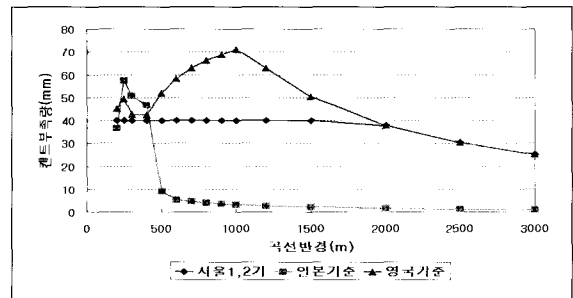


Fig. 4 Standard value curve of cant deficiency

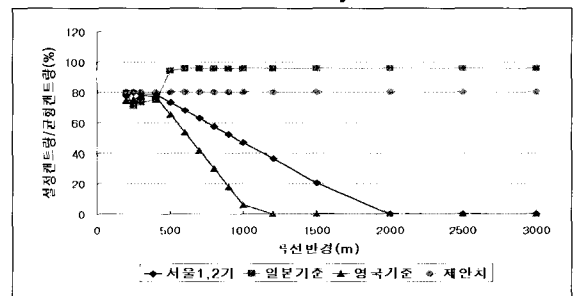


Fig. 5 Ratio of actual cant and equivalent cant(recommended)

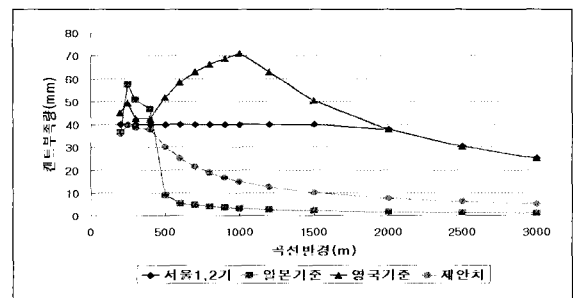


Fig. 6 Cant deficiency curve(recommended)

상기한 바와 같이, 외국에서는 완화곡선 길이를 캔트량의 배수로 적용되며, 배수값을 열차속도에 따라

변동·적용하고 있다. Table 5는 Table 4의 각 국의 곡선반경별 캔트량을 기준으로 상기 식(8)~식(11)을 활용하여 산정한 각 국의 완화곡선 길이를 나타낸다. Table 5에서 보듯이, 완화곡선 길이를 설정 캔트의 600배로 일괄 적용하는 서울시 지하철에서는 곡선반경이 작을 경우 완화곡선 길이가 국외 기준에 의한 값보다 상당히 긴 것을 알 수 있다. 그리고 독일의 경우와 비교하여 곡선반경이 500m이상으로 클 경우에는 서울시 지하철에 적용되고 있는 값과 동일한 것을 알 수 있다.

4.2 완화곡선 길이 기준(안)

앞서 설명한 바와 같이 우리나라의 경우 속도별로 완화곡선 길이를 다르게 적용하지 않고 설정 캔트의 600배로 적용하는 방법은 곡선반경이 작은 경우 다소 불합리한 것으로 사료되므로, 국내 기준도 국외에서와 같이 완화곡선 길이를 속도별로 다르게 적용하되, 복잡한 도심내에 적용되는 도시철도 기준임을 감안하여 독일 기준을 따라 즉, 캔트량이 초당 37.0mm까지 변화하는 것을 허용치로 하여 산정하는 것이 타당한 것으로 사료된다. Table 6의 제안치는 Table 5의 설정 캔트량(안)에 대하여, 캔트량이 초당 37.0mm까지 변화하는 것을 허용치로 하여 산정한 완화곡선 길이를 나타내며, Fig. 7은 제안치를 포함하여 각 국의 완화곡선장 비교 그래프이다. 완화곡선 길이는 짧을수록 선형설계시 유리하지만, Fig. 7에서 보듯이 완화곡선 길이의 제안치는 곡선반경이 400m이하로 작은 경우 현 서울시 지하철 기준보다 작은 것을 알 수 있으며, 곡선반경이 400m이상으로 큰 경우에는 다소 큰 것을 알 수 있다. 이는 기존 서울시 지하철 기준은 균형캔트량에 40mm씩 캔트부족량을 두고 캔트량을 정하고 그 값에 속도와 관련없이 600배를 하여 완화곡선 길이를 적용한 반면, 본 제안치는 설정캔트량을 균형캔

트량에 비례하여 산정하고 그 값에 캔트의 시간적 변화에 의한 승차감을 고려하여 외측 완화곡선 길이를 산정하기 때문이다.

Table 6 Comparison of the transition curve length

R (m)	V (km/hr)	완화곡선장(m)				
		서울 1,2기	독일	일본	영국	제안치
200	55	83	57	48	58	59
250	65	96	78	57	77	78
300	70	92	80	62	83	81
400	80	89	89	70	92	91
500		67	67	70	63	72
600		52	52	60	43	60
700		41	41	51	28	52
800		33	33	45	18	45
900		26	26	40	9	40
1000		21	21	36	3	36
1200		14	14	30	0	30
1500		6	6	24	0	24
2000		0	0	18	0	18
2500		0	0	14	0	14
3000	0	0	12	0	12	

5. 결론

본 연구에서는 지하철 정거장 최소곡선반경, 캔트량, 완화곡선 길이의 선형 항목에 대하여 일본 등 국외 지하철 선형기준과의 비교·분석을 통하여, 승객의 안전, 열차주행 안전성, 승차감을 제고시킬 수 있는 다음의 선로선형 기준 개선(안)을 제시하였다.

지하철 정거장 최소곡선반경은 대형전동차 운행의 경우 900m, 중형전동차 운행의 경우 800m로 하고, 곡선부에서의 캔트부족량을 일반적으로 40mm로 적용하던 것을 곡선반경별 균형캔트량의 20%로 일률적으로 적용토록 한다. 그리고 완화곡선의 길이는 기존 설정캔트량의 600배로 일률적으로 적용하던 것을 곡선반경별 열차속도에 따라 캔트의 시간적 변화에 의한 승차감을 고려하여 완화곡선 길이를 적용토록 한다.

참고문헌

1. 서사범(2002), "선로공학", 열과알, pp. 227~274
2. 渡辺 健의(昭和38年), "地下鐵道の設計", 山海堂, pp. 43~53

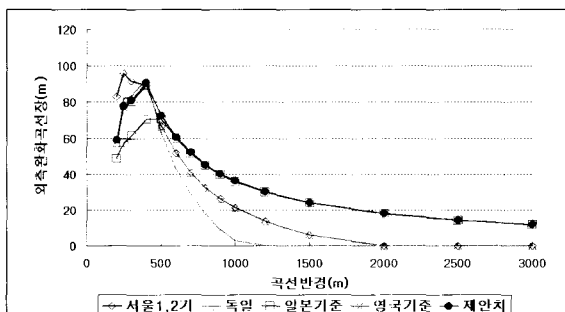


Fig. 7 Graph of transition curve length and recommended value