

종곡선/평면곡선 경합어부에 따른 최적평면선형조건 및 승차감 비교 분석

Comparative Study on Ride Comfort and Optimum Horizontal Curve Conditions for Superimposition of Vertical and Horizontal Curve

엄주환[†] · 최일윤¹ · 양신추¹ · 이일화² · 김만철¹

Ju-Hwan Um · Il-Yoon Choi · Sin-Chu Yang · Il-Hwa Lee · Man-Cheol Kim

Abstract Superimposition of horizontal and vertical curves may hamper the ride comfort and running stability of train and largely affect the maintenance costs. However, in many cases, it is not easy to make a track alignment plan because of the geographic conditions or undesirable environmental factors. In this paper, a comparative study on the effect of superimposition of vertical and horizontal curve on the ride comfort and optimum horizontal curve conditions was performed. That is, optimal cant and ride comfort analysis with and without a vertical curve superimposed on the horizontal curve were evaluated. Also the superimposition effect on ride comfort and alignment conditions in high speed zone were evaluated. From the analysis results, it was found that the ride comfort is similar to that at the only horizontal curves when applying the compensation cant for the superimposed site.

Keywords : Superimposition, Vertical curve, Ride comfort, Optimal cant

초 록 철도에서 평면곡선과 종곡선의 경합은 승차감 및 열차의 주행안전성을 저해시키는 원인이 되며, 유지 보수비용에도 큰 영향을 미친다. 그러나 철도노선 계획 시 지형조건 및 예기치 않은 환경적 요인에 의해 선형경합이 필요하게 될 경우가 발생된다. 본 연구에서는 종곡선과 평면곡선의 경합이 곡선부에서의 승차감 및 평면곡선의 최적선형조건에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위해 평면곡선과 종곡선이 경합하였을 경우와 경합하지 않고 평면선형만 있을 경우에 대한 최적캔트량 및 승차감을 비교분석 하였으며, 고속영역에서 선형경합이 곡선선형조건과 승차감에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과 경합한 경우라도 보정캔트를 부설한다면 승차감 측면에서 평면선형만 부설한 경우와 유사한 조건이 될 수 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 선형경합, 종곡선, 승차감, 최적캔트

1. 서 론

철도노선의 계획에 있어서 곡선반경 및 종단선형의 부설 기준은 선로선형 결정시 기본적으로 매우 중요한 요소가 된다. 평면곡선의 경우 열차속도에 따른 적정 캔트 및 완화곡선장은 차량의 주행 안전성과 승차감에 중요한 영향을 미치며, 종단선형 또한 열차의 등판능력과 수직방향 가속도에 의해 차량의 주행 안전성 및 승차감에 영향을 미친다. 그리고 부득이하게도 선형이 경합하는 경우에는 열차의 주행 안정성과 승차감뿐만 아니라 선로 유지보수에도 큰 영향을 미치게 되므로 설계에서는 가급적으로 경합을 피하고 있다.

그러나 철도 노선계획 시 지형조건 및 사회 환경적 요인에 의하여 종곡선과 평면곡선의 경합이나 신축이음매 등 특수 개소와 종곡선/평면곡선의 경합 등 선형경합이 필요하게

될 경우가 발생된다. 실제로 국내 고속선 및 기존선에 평면곡선과 종곡선의 경합이 상당수 존재하고 있다. 이러한 경우 궤도틀림 및 궤도재료 열화 등의 문제가 발생될 수 있으며, 승차감 및 주행 안전성에 영향을 끼칠 수 있다.

평면곡선의 최적선형에 관한 연구는 Baluch(1983), Hashimoto(1989), Kufver(1997,2000) 등에 의해 많은 연구가 진행되었다[1-3,4]. 하지만 평면곡선과 종곡선의 경합에 대해서는 국내외적으로 연구실적이 거의 없는 실정이며, 다만 최근 들어 엄주환 등(2009,2010)에 의해 기존선 속도향상 및 초고속화에 대비하여 곡선부 선형 최적 설계 및 평면곡선과 종곡선의 경합에 대한 일부 연구가 이루어진 바 있다[5,8]. 여기서 엄주환 등(2009,2010)은 Kufver(1997)의 연구결과를 바탕으로 곡선부에서의 최적 곡선반경-완화곡선장 결정기법을 제시하였으며, 또한 평면/종곡선 경합시 승차감 측면에서의 최적평면선형을 간단히 구할 수 있는 알고리즘 및 검증에 관한 연구를 수행하였다[5,8].

본 연구에서는 이러한 선행연구결과를 바탕으로 하여 평면곡선과 종곡선이 경합하였을 경우와 경합하지 않고 평면선형만 있을 경우에 대한 최적 캔트량 및 승차감을 비교분

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실

E-mail : jhum@krri.re.kr

¹한국철도기술연구원 차륜궤도연구실

²한국철도기술연구원 철도구조연구실

석 함으로서 고속영역에서 선형 경합이 곡선선형조건과 승차감에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 최적선형 평가방법

곡선부 궤도선형을 최적으로 설계하기 위해서는 차량의 주행안전성을 만족하는 범위내에서 승차감이 최대가 되도록 설계하여야 한다.

철도에서의 승차감 평가 방법에는 UIC, ISO 등에서 규정하는 통계적 방법이 일반적으로 널리 사용되고 있으나 이러한 방법들은 전체선로를 대상으로 하는 통계적 방법이다.[6,7] 따라서 Kufver(1997) 등은 곡선부 승차감에 미치는 중요한 선형요소인 완화곡선부 전용 승차감 평가방법으로 CEN 및 BSI(2006)에서 제안하고 있는 방법이 가장 합리적인 방법이라고 제안하고 있다[4]. 또한 엄주환(2010) 등은 이러한 평가방법을 바탕으로 하여 종곡선과 평면곡선 경합 시 곡선부 최적선형 설계기법을 제시하였다. 여기서 설계변수는 곡선반경 R, 종곡선 반경 r, 완화곡선장 Lt, 캔트부족량 Cd, 유효롤계수 fr, 그리고 열차속도 v이며, 제약조건(Boundary condition)은 R-Lt 조합 산정시의 주위 지장물(Fixed point)과 차량의 주행안전성, 궤도부담력으로 설정하였다[5]. 본 연구에서는 이를 이용하여 승차감이 최대가 되는 최적선형조건을 평가하였다.

다음 식(1) 및 식 (2)는 종곡선/평면곡선 경합 시 최적평면선형도출을 위한 승차감 목적함수와 최적캔트량의 간략 식을 나타내고 있다[5].

$$P_{crs} = [A + B \cdot C_d \cdot f_r - 11.1] + 0.185 \left[C \cdot \frac{v}{L_t} \right]^{2.283} \quad (1)$$

$$C_{ds} = \frac{11.1 - A}{B \cdot f_r} \quad (2)$$

여기서,

P_{crs} : 종곡선/평면곡선 경합조건을 고려한 간략화 승차감 지수(%)

C_{ds} : 최적캔트부족량

$$A = f_r \cdot \frac{v^4}{Rr} \cdot (2.912 + 2.111 \cdot \frac{v}{L_t})$$

$$B = \left(1 - \frac{v^2}{gr}\right) \cdot (186.460 + 135.170 \cdot \frac{v}{L_t})$$

$$C = 38.197 \cdot f_r \cdot (C_{eq} - C_d) - 5.850 \cdot \frac{v^2 \cdot (f_r - 1)}{R \left(1 - \frac{v^2}{gr}\right)}$$

v : 열차속도(m/s)

R : 평면곡선반경(m)

r : 종곡선 반경(m)

Lt : 완화곡선장

g : 중력가속도(m/s²)

Ceq : 평면곡선상 균형 캔트량

Cd : 캔트부족량

fr : 유효롤계수(Effective roll factor)로서 궤도면 가속도에 대한 차량면 가속도의 비로서 정의

최적선형을 결정하기 위해서는 먼저 고정점에 따른 최적 R-Lt 경계조건 결정알고리즘을 이용하여 해당 선로에서 각각의 고정점별 경계조건을 결정하여야 한다. 여기서 만약 선로의 한쪽 측면으로의 고정점들을 이동하지 않는 범위 내에서 곡선선형의 큰 변경을 하여야 한다면, 즉 예를 들어 곡선의 내측으로는 고정점들에 의해 구속되어 있고 외측으로 큰 변경을 하여야 한다면 이에 따른 최적 해(Optimal solution)는 다음 Fig. 2에서와 같이 각 속도 대에서 가장 작은 곡선

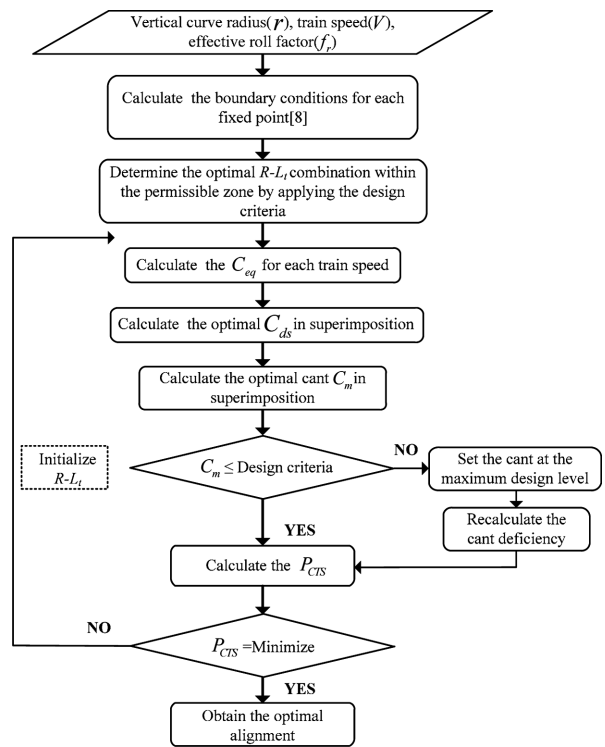


Fig. 1 Optimal solution algorithm[5]

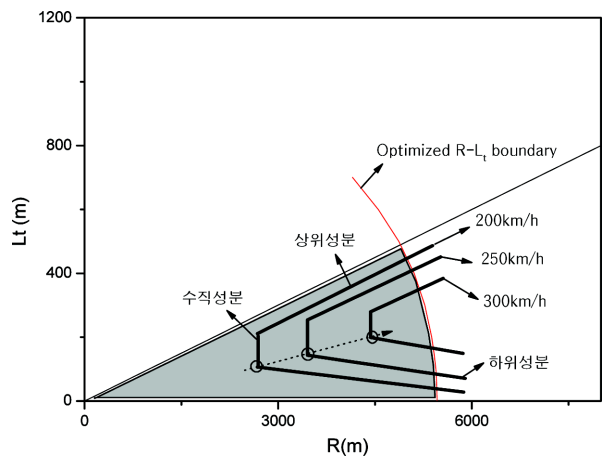


Fig. 2 Optimal solution in permissible speed

반경과 완화곡선의 조합을 가지는 점들이 그 속도대에서 최적 해에 해당된다. 여기서 각각의 성분들은 선형기준을 나타내는데, 수직성분은 각속도대역에서의 최소곡선반경, 상위 성분은 각 속도대역에서 원곡선 최소곡선길이, 그리고 하위 성분은 최소 허용 완화곡선장으로 정의된다. Fig. 1에서 최적켄트가 설계기준을 초과할 때는 철도의 건설기준에 관한 규정에 따라 설계기준 값으로 설정하고 이에 따른 켄트 부족량을 재산정하여야 한다. 그리고 산정된 켄트 부족량을 이용하여 식(1)에 의해 승차감 목적함수를 산정하면 해당 선형조합에서 승차감이 최대가 되는 선형조건이 된다. 이러한 방법으로 허용경계조건인 모든 최적 선형조합들에 대해 승차감 목적함수를 산정하고 그 중에서 목적함수가 최소가 되는 선형조합을 선정하면 최적 경계조건 내에서 승차감이 최대가 되는 선형조건을 결정할 수 있다.

3. 최적선형 도출 및 승차감 분석

3.1 해석조건 및 방법

해석에 적용한 선형조건은 곡선부의 양쪽 끝단 직선과 직선이 이루는 교각(Intersection angle)별, 그리고 R-Lt조합별, 열차속도별, 경합여부에 따라 총 72개의 경우에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 본 해석에 사용한 R-Lt조합은 엄주환(2009) 등에 의해 제시된 최적조합결정기법을 이용하였으며[8], 동일한 조건에서의 비교분석을 위해 열차속도별로 6

개의 동일한 조합으로 경합여부에 따른 간략화 해석을 수행하였다. 해석조건은 기존 경부고속선의 경우에 대해 최소설계기준(R5000 r25000)으로 부설되었을 때의 개량조건을 가정하였다. 즉 최소선형을 R5000, r25000로 가정하고 속도향상 시 개량가능한 R-Lt범위를 설정하였다. 그리고 현재 최고운행속도 300km/h를 기준으로 비교 분석하기 위해 열차속도는 250km/h, 300km/h, 350km/h으로 가정하였으며, 교각(Intersection angle) I에 따른 비교분석을 위해 0.1rad, 0.5rad으로 임의로 가정하였다. 그리고 승차감 평가를 위한 최적켄트부족량은 식(2)에서 제시한 방법으로 각 선형조건별로 산정하였으며 이에 따라 최적켄트량을 산정한 후 승차감을 평가하였다.

Table 1은 해석조건을 나타내고 있다.

Table 1 Analysis parameters

Train speed (km/h)	Intersection angle I(rad)	Vertical curve radius(m)
250/300/350	0.1/0.5	25000

3.2 최적선형도출 및 승차감 비교 분석

Table 2 ~ 5는 경합 여부에 따른 선형조건별 최적켄트량과 승차감 해석결과를 보여주고 있다. 해석결과, 경합한 경우가 속도별 최적켄트량이 3~10mm 정도 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 곡선부의 양단 직선과 직선이 이루는 교

Table 2 Analysis results(Superimposition, 0.1rad)

Case	Train speed (km/h)	Intersection angle I (rad)	Vertical curve radius (m)	Horizontal curve radius (m)	Transition curve length (m)	Cant (mm)	Ride comfort (P_{CTS})
1	250	0.1	25000	4499	500	124	0.06
2				5360	400	97	0.05
3				5830	300	87	0.08
4				6130	200	84	0.19
5				6300	100	87	1.06
6				6330	50	95	6.69
7	300			4499	500	180	5.73
8				5360	400	164	0.30
9				5830	300	149	0.47
10				6130	200	143	1.08
11				6300	100	146	5.64
12				6330	50	154	32.07
13	350			4499	500	180	28.78
14				5360	400	180	16.64
15				5830	300	180	12.47
16				6130	200	180	12.46
17				6300	100	180	25.21
18				6330	50	180	81.68

Table 3 Analysis results(Superimposition, 0.5rad)

Case	Train speed (km/h)	Intersection angle I(rad)	Vertical curve radius (m)	Horizontal curve radius (m)	Transition curve length (m)	Cant (mm)	Ride comfort (P_{CTS})
1	250	0.5	25000	4987	500	107	0.04
2				5011	400	107	0.07
3				5030	300	108	0.14
4				5044	200	111	0.38
5				5052	100	118	2.19
6				5054	50	126	13.02
7	300			4987	500	179	0.22
8				5011	400	179	0.37
9				5030	300	180	0.75
10				5044	200	180	2.63
11				5052	100	180	12.47
12				5054	50	180	52.88
13	350			4987	500	180	20.77
14				5011	400	180	21.56
15				5030	300	180	23.27
16				5044	200	180	27.49
17				5052	100	180	44.98
18				5054	50	180	103.58

Table 4 Analysis results(Non-Superimposition, 0.1rad)

Case	Train speed (km/h)	Intersection angle I (rad)	Horizontal curve radius (m)	Transition curve length (m)	Cant (mm)	Ride comfort (P_{CTS})
1	250	0.1	4499	500	119	0.05
2			5360	400	94	0.04
3			5830	300	84	0.06
4			6130	200	81	0.14
5			6300	100	84	0.91
6			6330	50	92	5.97
7	300		4499	500	180	3.17
8			5360	400	155	0.25
9			5830	300	141	0.38
10			6130	200	135	0.90
11			6300	100	138	4.80
12			6330	50	145	27.60
13	350		4499	500	180	25.19
14			5360	400	180	12.95
15			5830	300	180	8.60
16			6130	200	180	8.25
17			6300	100	180	20.10
18			6330	50	180	75.44

Table 5 Analysis results(Non-Superimposition, 0.5rad)

Case	Train speed (km/h)	Intersection angle I (rad)	Horizontal curve radius (m)	Transition curve length (m)	Cant (mm)	Ride comfort (P_{CTS})
1	250	0.5	4987	500	103	0.03
2			5011	400	103	0.05
3			5030	300	104	0.11
4			5044	200	107	0.31
5			5052	100	113	1.92
6			5054	50	121	11.69
7	300		4987	500	169	0.18
8			5011	400	169	0.31
9			5030	300	170	0.61
10			5044	200	172	1.64
11			5052	100	180	9.04
12			5054	50	180	48.50
13	350		4987	500	180	17.20
14			5011	400	180	17.86
15			5030	300	180	19.38
16			5044	200	180	23.24
17			5052	100	180	39.79
18			5054	50	180	97.31

각(Intersection angle)의 크기에 따라서는 교각이 큰 경우가 전반적으로 최적켄트량이 큰 것으로 나타났는데, 이는 교각이 커지면 최적 R-Lt 조합에서 곡선반경이 바뀌게 되며 이에 따른 최적켄트량도 변화하게 되기 때문이다[8].

Fig. 3 ~ 6은 경합어부에 따른 각 선형조건별 승차감 목적함수를 이용한 간략화 해석결과와 최적선형 범위를 나타내고 있다.

해석결과, 경합어부에 상관없이 전반적으로 속도가 증가할수록 승차감이 나쁜 것으로 나타났으며, 같은 속도 대에서는 교각 I의 크기에 따라서 최적 완화곡선장 범위가 약 100m 정도 그리고 승차감 지수(Pct)는 최대 20이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 즉 교각이 클수록 최적 완화곡선장이 길어지는 것으로 나타나는데, 이는 본 연구에서 적용한 Baluch(1983)의 이론에 따라 교각이 커지면 부설 가능한 곡선반경이 줄어들게 되며 이에 따라 완화곡선장이 길어지기 때문으로 판단된다.

최적선형은 Fig. 1의 최적선형 결정 알고리즘에 의해 Fig. 3 ~ 6에서 나타난 바와 같이 승차감이 최대가 되는 하나의 선형조건이 결정될 수 있다. 하지만 Fig. 3 ~ 6에서 보듯이

본 연구에서는 승차감이 급격히 변화하는 구간을 제외하고 승차감 지수가 낮은 부분 중 승차감의 차이가 미소한 부분들에 대해 최적 선형범위라고 정의하였는데, 이는 미소한 차이가 나는 부분에 대해서 선형범위를 정해주는 것이 최소값을 제안하는 것 보다 여러 가지 복합적인 요소를 고려하여야 하는 선형설계 시 더욱 합리적인 것으로 판단되기 때문이다.

Fig. 7 ~ 8에서는 경합한 경우와 경합하지 않고 평면곡선만 있는 경우에 대한 비교 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 경합한 경우가 평면선형만 있는 경우보다 대부분 승차감 수치가 높게 나타나 승차감이 좋지 않은 것으로 나타남을 알 수 있다. 특히 속도가 높을수록 경합한 경우와 그렇지 않은 경우와의 승차감 차이가 더욱 큰 것으로 나타났다. 그러나 열차속도가 300km/h 이하에서는 아주 짧은 완화곡선장을 제외하고는 평면선형만 있는 경우와 비교해서 그 값의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있는데, 이러한 결과는 경합한 경우라도 보정 켄트량을 고려하고 추가 켄트량에 의한 완화곡선장을 연장한다면 승차감 측면에서는 평면선형과 비교해서 큰 차이가 없음을 보여주는 결과라고 판단된다.

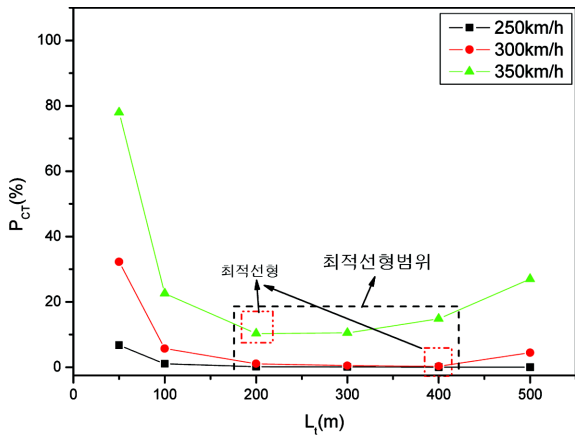


Fig. 3 The results of simplified analysis (Superimposition, I=0.1rad)

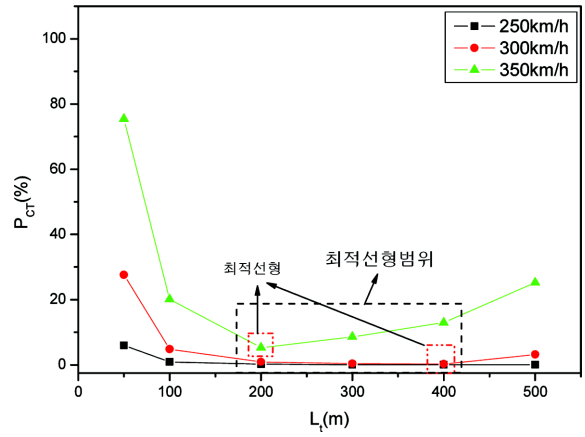


Fig. 5 The results of simplified analysis (Non-superimposition, I=0.5rad)

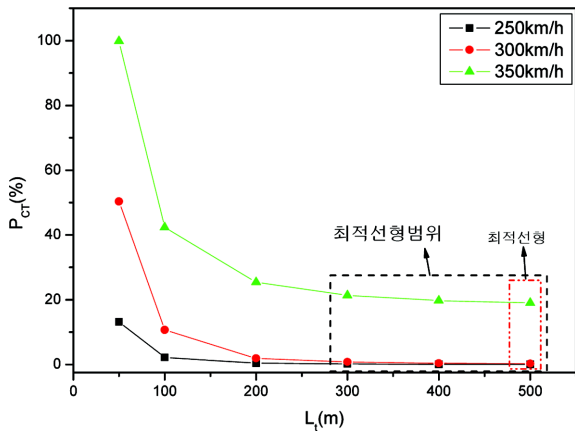


Fig. 4 The results of simplified analysis (Superimposition, I=0.5rad)

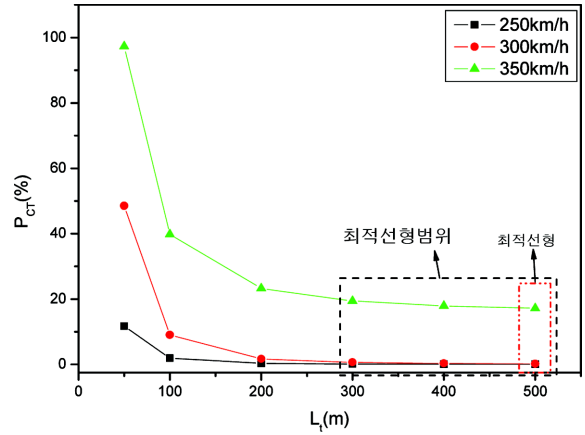


Fig. 6 The results of simplified analysis (Non-superimposition, I=0.5rad)

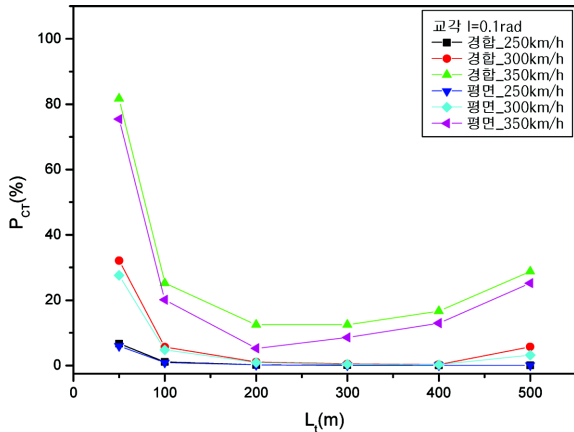


Fig. 7 Comparison of Pct results with speed increase (I=0.1rad)

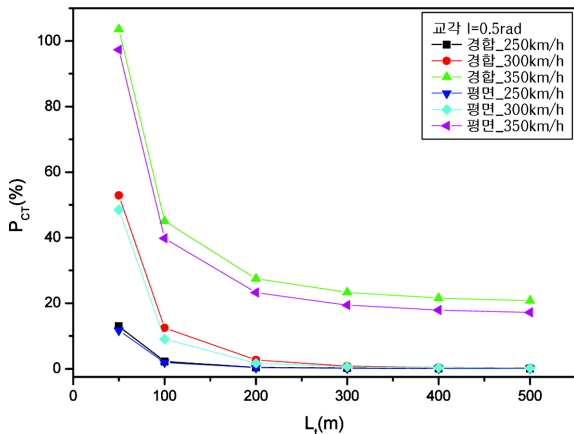


Fig. 8 Comparison of Pct results with speed increase (I=0.5rad)

그리고 특정한 속도 및 선형조건에서 속도에 비해 최적완화곡선장이 짧게 나타나는 경우를 볼 수 있는데, 이러한 경우는 열차의 운영조건 및 다양한 속도에 대해 종합적으로 고려하여 검토를 하여야 할 것으로 판단되며 해당(각 국 및 운영기관의 기준)기준을 만족하는 범위가상으로 산정하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 종곡선과 평면곡선의 경합 여부가 곡선부에서의 승차감 및 평면곡선의 최적선형조건에 미치는 영향에 대한 비교 분석을 수행하였다. 여기서 곡선부 선형 최적화 해석기법은 엄주환 등(2009, 2010)에 의해 제안된 선형연구결과를 이용하였으며, 이를 바탕으로 평면곡선과 종곡선이 경합하였을 경우와 경합하지 않고 평면선형만 있을 경우에 대한 최적켄트량 및 승차감을 비교분석함으로써 고속영역에서 선형 경합이 곡선선형조건과 승차감에 미치는 영

향을 파악하고자 하였다. 그 결과, 경합한 경우가 속도별 최적켄트량이 3~10mm 정도 크게 나타났음을 알 수 있었으며, 교각이 큰 경우가 전반적으로 최적켄트량이 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 경합한 경우가 그렇지 않은 경우보다 대부분 승차감 수치가 높게 나타나 승차감이 좋지 않은 것으로 나타남을 알 수 있었다. 또한 경합한 경우라도 보정 켄트량을 고려하고 이에 따른 완화곡선장이 연장된다면 승차감 측면에서는 평면선형만 부설된 경우와 유사한 조건이 될 수 있다는 결과도 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 평면곡선과 종곡선 경합 시 적절한 보정켄트, 즉 종곡선에 의해 발생하는 초과 원심력 보상을 위한 보정켄트를 추가로 부설한다면 승차감 및 차량의 주행안정성이 더욱 좋아질 것으로 판단되며, 향후 선형경합에 대한 정량적인 설계기준(안) 수립 시 기초 데이터로서 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 차세대 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. Baluch, "Optimization of transition length increase", Rail international, Vol 13. No.10, 1983.
- [2] Shoichi Hashimoto, "Analysis of Relationship between Transition Curve Profile and Railway Vehicle's Vibration", RTRI Report, Vol.3. No.2. 1989.2.
- [3] Bjorn Kufver, "Optimization of single horizontal curves in railway alignments", VTI report 424A, 1997.
- [4] Bjorn Kufver, "Optimization of horizontal alignments for railways", Doctorial thesis, 2000.
- [5] J.H. Um, S.C. Yang, E.K. Kim, I.Y. Choi, et.al. (2010) A study on evaluation method of ride comfort considering superimposition of vertical and horizontal curve, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(3), pp 309-316.
- [6] UIC Code 518-OR (2005) "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour-Safety-Track fatigue-Ride quality", 3rd edition, International Union of Railway.
- [7] ERRI B 153/RP 21 "Application of ISO Standard 2631 to railway vehicles", 1993.
- [8] J.H. Um, E.K. Kim, S.C. Yang (2009), A study on determination method of radius and transition curve length for optimum design in curve, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(2), pp 199-204.

접수일(2010년 10월 14일), 수정일(2010년 11월 30일), 게재확정일(2010년 12월 6일)