

중곡선/완화곡선 경합 해외사례 및 해석적 검토



엄주환
한국철도기술연구 선임연구원
T.010.6288.8633
jhum@krii.re.kr

1. 서언

철도노선 설계 시 평면 및 종단선형의 적정설계는 매우 중요한 요소라고 할 수 있는데, 특히 이들 두 선형이 경합하는 경우에는 선로유지보수, 차량의 주행안전성과 승차감 등에 큰 영향을 끼친다. 그러므로 설계에서는 가급적 경합을 피하고 있으며, 이러한 선로경합을 피하기 위해서 설계상의 어려움과 더불어 많은 경제적 비용이 수반될 수 있다.

국내에서는 “철도건설규칙 및 건설기준 규정(2009)”에서 완화곡선과 중곡선의 경합은 허용하고 있지 않으며, 평면원곡선과 중곡선의 경우에만 부득이한 경우에 대해 경합을 허용하는 것으로 되어 있다. 그 또한 정량적인 기준은 없는 실정이다. 실제로 국내 경부고속선의 경우 상당부분의 평면곡선이 중곡선과 경합되어 있는 것이 현실이다. 그러나 이러한 기준들은 지금까지 콘크리트궤도에 비해 상대적으로 궤도강성이 약하고 유지보수가 어려운 자갈도상궤도에 주로 적용되어온 기준이다.

따라서 자갈도상궤도에 비해 유지보수가 거의 필요 없으며, 구조적 안전성이 뛰어난 콘크리트 궤도의 경우 열차의 주행안정성 및 승차감기준을 만족하는 범위 내에서 어느 정도의 선로경합은 완화할 필요성이 있으며, 최근 이를 포함한 선형기준개정에 대한 검토가 이루어지고 있는 실정이다.

최근 철도선진국인 독일에서도 콘크리트 궤도구간인 쾰른-프랑크푸르트 구간에서 중곡선과 완화곡선을 경합하

여 부설한 실적이 있으며, 경합개소 또한 상당히 많은 부분을 차지하고 있다.

본 고에서는 중곡선과 완화곡선의 경합에 대한 해외사례 및 기준에 대해 간단히 기술하였으며, 이와 더불어 시뮬레이션을 통하여 완화곡선과 중곡선 경합 시 열차의 승차감 및 주행안전성과 궤도작용력에 대한 검토를 수행하여 콘크리트 궤도상 중곡선/완화곡선 경합 조건에 대한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 해외사례 및 기준

평면원곡선/완화곡선, 중곡선, 분기기 및 교량에 의한 일반적인 부설 기준은 모두 이들이 경합하지 않는 조건이며, 궤도정비가 곤란한 각종 선형의 경합, 특히 고속구간에서는 가능한 피해야 한다는 것은 논할 것도 없다. 그러나 선로선형 결정시 이들의 경합을 피하기 위해서는 막대한 공사비를 요할 경우도 있기 때문에, 부득이한 경우에 대해 국내외에서 일부 허용을 하고 있다.

국내에서는 평면원곡선과 중곡선에 한해서만 부득이한 경우에 대해 경합을 허용하고 있다. 일본의 경우는 차량의 부상을 고려하여 차체상하 진동가속도를 0.1g(종래에는 신간선에 대해 승차감측면에 0.05g 적용)로 적용하여 최소 중곡선 반경을 산정하고 있으며, 평면곡선과 중곡선을 함께 부설하는 경우에 있어서는 캔트를 고려한 별도의 검토를 통하여 한계값을 제시하고 있다. 유럽의 경우는 기본

표 1. 독일 Köln-Frankfurt구간 평면곡선/중곡선 경합 현황

No.	완화곡선 이점	중곡선 연장(m) ¹⁾	중곡선 이점	경합여부			평면 곡선반경 (m)	캔트 (mm)
				원곡선	완화곡선	원곡선 및 완화곡선		
1	SP=113km500	339.52m	시점=113km680 종점=114km019			●	4002	160
	PC=114km000							
	CP=114km200	736m	시점=114km632 종점=115km368		●		4002	160
	PS=114km700							
2	SP=115km250	1,150.56m	시점=115km424 종점=116km575			●	3697	170
	PC=115km700							
	CP=116km700							
	PS=117km150							
3	SP=118km100	766.56m	시점=117km616 종점=118km383		●		4002	160
	PC=118km400							
	CP=118km950	792m	시점=119km004 종점=119km796		●		4002	160
	PS=119km250							
4	SP=120km200	523.68m	시점=120km230 종점=120km769			●	3697	170
	PC=120km550							
	CP=122km350	132.32m	시점=122km433 종점=122km566		●		3697	170
	PS=122km700							
		433.44m	시점=123km283 종점=123km716		●			
5	SP=123km600	623.84m	시점=124km288 종점=124km911	●				
	PC=123km950							
	CP=125km650	566.4m	시점=125km416 시점=125km983			●	4997	130
	PS=126km000							
6	SP=126km700	383.68m	시점=127km208 종점=127km591			●	4652	140
	PC=127km000							
	CP=127km400							
	PS=127km700							
7	SP=128km100	320m	시점=128km340 종점=128km660			●	4097	155
	PC=128km400							
	CP=129km350							
	PS=129km650							
8	SP=129km900	576m	시점=129km712			●	4097	155
	PC=130km200		종점=130km288					
	CP=131km200	108.16m	시점=130km745 종점=130km854	●				
	PS=131km500							
9	SP=132km700	344m	시점=132km728 종점=133km072			●	4297	150
	PC=133km000							
	CP=133km700							
	PS=134km000							

No.	완화곡선 이점	종곡선 연장(m) ¹⁾	종곡선 이점	경합여부			평면 곡선반경 (m)	캔트 (mm)
				원곡선	완화곡선	원곡선 및 완화곡선		
10	SP=134km200	368m	시점=134km316 종점=134km684			●	3702	170
	PC=134km500							
	CP=136km200	432m	시점=135km384 종점=135km816	●				
	PS=136km500	72m	시점=136km464 종점=136km536		●	3702	170	
11	SP=138km300	472m	시점=138km264 종점=138km736		●		4002	160
	PC=138km800							
	CP=139km500	560m	시점=139km220 종점=139km780			●	4002	160
	PS=140km000							
12	SP=142km250	528m	시점=142km586 종점=143km114			●	3972	155
	PC=142km650							
	CP=142km950							
	PS=143km350							
13	SP=152km850	290.4m	시점=153km154 종점=153km445			●	5147	125
	PC=153km050							
	CP=153km300							
	PS=153km500							
14	SP=153km750	489.12m	시점=153km605			●	6402	100
	PC=154km050		종점=154km094					
	CP=155km100	231.84m	시점=154km684 종점=154km915	●				
	PS=155km400	533.28m	시점=155km233 종점=155km766		●	6402	100	
15	SP=156km300	437.44m	시점=156km081 종점=156km518		●		4002	160
	PC=156km750							
	CP=157km750	651.84m	시점=157km674 종점=158km325			●	4002	160
	PS=158km200							

주 1) 종곡선 반경 r=16,000m

개념은 동일하나, 가속도값의 적용에 있어서 일본과 달리 평면곡선(원곡선)과 종곡선이 함께 부설되는 경우를 고려하여 가속도값을 제시하고 있다. 즉 Euro Code에서 허용하고 있는 최소 평면곡선반경에 따른 캔트의 효과가 이미 고려되어 있기 때문에 허용된 범위의 평면곡선과 종곡선을 함께 부설하는 것에 제약을 두지 않고 있는 것으로 보인다. 최근 국내에서도 평면원곡선과 종곡선 경합에 대한 다양한 연구를 수행한 바 있으며, 이를 바탕으로 정량적 설계 방법에 대한 검토가 이루어졌으며 이와 더불어 콘크리트 궤도상 완화곡선과 종곡선의 경합에 대한 기준안화에 대

해서도 검토가 이루어지고 있다.

그리고 최근 독일의 경우 콘크리트도상 궤도를 적용한 Köln-Frankfurt 노선에서 그림 1과 같이 종곡선과 완화곡선의 경합을 허용하여 선형설계의 효율성을 증가시키고 있다.

다음 표 1은 그림 1에서 보여주는 Köln-Frankfurt 구간의 선로일람약도의 일부를 정리하였으며, 선형경합 현황을 잘 보여주고 있다. 표 1에서 볼 수 있듯이 종곡선이 평면원곡선 및 완화곡선과 각각 경합을 하는 경우와 평면원곡선 및 완화곡선과 동시에 경합을 하는 경우가 있음을 알 수 있는데, 여기서 후자인 동시에 경합(종곡선과 평면원곡선/완



그림 1. Köln-Frankfurt 노선에서의 완화곡선과 종곡선 경합 사례

화곡선 경합)하는 경우가 가장 많음을 알 수 있다. 선형조건은 평면곡선반경은 약 R4000m~R6500m, 종곡선반경은 r16000m로 부설되어 있으며, 캔트는 선형조건에 따라 100mm~170mm까지 다양하게 부설되어 있다.

3. 종곡선/완화곡선 경합의 해석적 검토

본 장에서는 종곡선과 완화곡선의 경합여부에 따라 차량/궤도선형 상호작용 해석을 수행하여 도상종별 열차의 주행안정성, 승차감, 그리고 궤도작용력의 비교 분석결과에 대해 간단히 기술하였다.

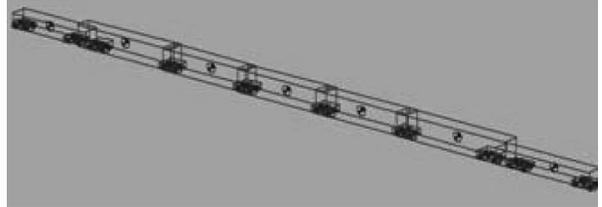


그림 2 해석에 사용된 차량모델

3.1 해석모델 및 조건

① 차량모델

해석에 사용된 프로그램은 상용프로그램인 VAMPIRE를 이용하였으며, 차량모델은 한국철도 기술연구원에서 개발한 한국형고속열차모델을 이용하였다. 해석차량은 총 7량으로 구성되어 있으며, 10개의 보기와 20개의 윤축을 가지고 있다. 다음 그림 2는 해석에 사용된 차량모델 현황을 보여주고 있으며, 표 2에서는 해석차량의 주요 제원을 나타내고 있다.

② 궤도모델

선형매개변수 해석을 위한 궤도구조모델은 VAMPIRE 상의 기본모델을 활용하였으며, 레일은 UIC60레일을 적용하였다. 표 3에서 해석에 사용된 물성치를 보여주고 있다. 콘크리트도상에 대해서는 일부 실험값을 적용하였다.

표 2. 차량의 주요 제원

구분	항 목		주요사항
일반사항	속 도	최고설계/운행속도	385/350 km/h
	편 성	편성량 수	7 량(131m)
	열차제원	동력차(L*W*H)	22,690 × 2,814 × 4,062 mm ³
		동력객차(L*W*H)	21,845 × 2,970 × 4,055 mm ³
		객차(L*W*H)	18,700 × 2,970 × 3,690 mm ³
중 량	영차	310 ton (7량)	
	만차	330 ton (7량)	
대차	대차형식	구동대차 6대, 객차대차 4대(관절형)	
	스프링하중량	동력차	2,196 kg
		동력객차	2,539 kg
		객차	2,142 kg

표 3. 궤도물성치

항목	자갈도상)	콘크리트도상
궤도수직강성(MN/m)	100.0	70.0 ²⁾
궤도수직댐핑(MNs/m)	0.2	0.228 ²⁾
침목-지반 횡강성(MN/m)	37.0	∞
침목-지반 횡댐핑(MNs/m)	0.24	0.24
레일-침목 횡강성(MN/m)	43.0	43.0
레일-침목 횡댐핑(MNs/m)	0.24	0.24

1) VAMPIRE 기본값, 2) 실험값

③ 해석조건 및 선형모델링

중곡선과 완화곡선 경합에 따른 궤도형식별 영향을 해석적으로 검토하기 위해 현행 국내에서 적용하고 있는 철도건설기준규정(2008)을 바탕으로 하여 표 4에서 보는 바와 같이 가장 불리한 조건을 적용하여 차량의 주행안정성을 검토하였다. 또한 중곡선의 형태별, 즉 볼록(convex)/오목(concave)곡선에 대해서도 비교검토를 수행하였다.

열차속도에 따른 영향을 분석하기 위해, 해석 시 열차속도는 현재 국내 고속선의 운행속도와 향후 속도향상을 고려하여 300km/h, 350km/h, 400km/h에 대해 검토를 수행하였다.

그림 3과 그림 4은 중곡선이 볼록(convex)과 오목(concave)일 경우에 대한 각각의 선형모델링을 보여주고 있다.

3.2 승차감 평가 및 궤도작용력 기준

철도에서의 승차감 평가 방법에는 UIC, ISO등에서 규정하는 통계적 방법이 일반적으로 널리 사용되고 있다. 스웨덴의 Kufver(1997)는 곡선부 승차감에 미치는 중요한

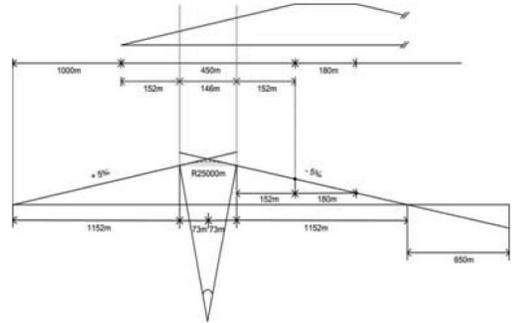


그림 3. 완화곡선/볼록중곡선 경합모델

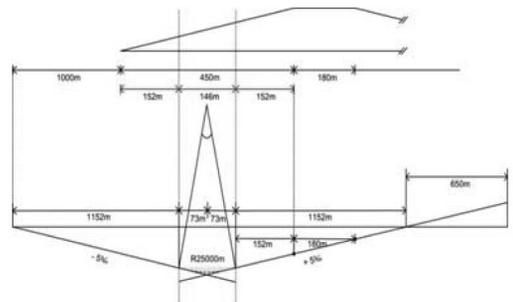


그림 4. 완화곡선/오목중곡선 경합모델

선형요소인 완화곡선부 전용 승차감 평가방법으로 BSI(2009)에서 제안한 (Passenger Comfort)방법이 가장 합리적인 방법이라고 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서도 방법을 적용하여 경합구간의 승차감을 평가하고자 한다.

다음 식(1) 및 식 (2)는 완화곡선부 승차감 평가방법인 방법에 대한 실험식을 나타내고 있다.

표 4. 해석변수

구분	선형조건		비고
평면곡선	곡선반경(m)	5000	철도건설기준 (Critical case)
	칸트(mm)	180	
	칸트부족량(mm)	110	
	완화곡선장(m)	450	2.5 × ΔC
	원곡선장(m)	180	철도건설기준
	교각(I.A)(rad)	0.1	-
중곡선	기울기(%)	5	-
	중곡선반경(m)	25000	철도건설기준
	중곡선장(m)	146	

• 입석(Standing)

$$P_{CT} = \underbrace{\max(28.54 \cdot \ddot{y} + 20.69 \cdot \ddot{y} - 11.1, 0)}_{P_{CT1}} + \underbrace{0.185 \cdot (\dot{v})^{2.283}}_{P_{CT2}} \quad (1)$$

• 좌석(Seated)

$$P_{CT} = \underbrace{\max(8.97 \cdot \ddot{y} + 9.68 \cdot \ddot{y} - 5.9, 0)}_{P_{CT1}} + \underbrace{0.120 \cdot (\dot{v})^{1.626}}_{P_{CT2}} \quad (2)$$

여기서,

P_{CT} : 승차감을 표현하는 승객들의 만족도로 나타낸 백분율(percentage) 단위.

\ddot{y} : 차체의 횡가속도의 절대최대값(m/s²)

\ddot{y} : 차체의 횡저크의 절대최대값(m/s³)

\dot{v} : 차체의 롤 속도의 절대최대값(degree/s)

P_{CT} 는 완화곡선상에서 횡가속도, 횡저크, 롤속도를 고려하여 평가하는 시스템이며 평가기준은 백분율(%)로서, 이 값이 클수록 승차감이 나쁘다는 것을 의미한다. 그리고 본 연구에서는 불리한 조건을 고려하여 입석에 대해서만 평가를 수행하였다.

표 5에서는 궤도작용력에 대한 각국의 기준을 나타내고 있다. 표 5에서 알 수 있듯이 UIC 518에서는 윤중에 대해 좀더 자세히 분류를 하고 있으며, 스웨덴(VTI)의 경우 곡선부에서의 레일횡압(Guiding force)을 좀더 강화하고 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 해석결과 및 분석

경합 시 차량의 주행안전성 및 승차감을 분석하기 위해 현재 국내의 철도건설기준규정(2008)에서 가장 불리한 선형조건을 적용하여 경합조건별 해석을 수행하였다. 그림 5~그림 8에서 도상종별, 경합조건별 해석결과를 보여주고 있다.

해석결과, 그림에서 알 수 있듯이 도상종류에 상관없이 대부분 속도가 높을수록 승차감은 나쁜 것으로 나타났으며, 주행안전성 및 궤도에 미치는 힘들이크게 나타남을 알 수 있었다.

승차감(P_{CT}) 측면에서는 그림 5에서 알 수 있듯이 자갈도상과 콘크리트도상, 그리고 경합과 경합되지 않은 경우에 대해 큰 차이 없이 유사한 결과가 나타남을 알 수 있다. 그러나 그림에서 보듯이 미소한 차이긴 하지만 열차속도 350km/h 이하에서는 오목 종곡선에서 다소 승차감 지수가 크게 나타나 승차감이 좋지 않은 것으로 나타났으며, 400km/h에서는 볼록 종곡선에서 승차감 지수가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 완화곡선과 같은 곡률변화구간에서 종곡선과의 경합으로 차량의 거동이 다소 불규칙하게 나타나기 때문으로 판단되며, 속도가 증가할수록 상향 가속도 성분이 증가하여 볼록종곡선의 승차감 지수가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

표 5. 궤도작용력 기준

	UIC 518	EN	스웨덴VTI
윤중 (Wheel Force)	250km/h < V_{lim} < 300km/h, $Q_{lim} \leq 170kN$ $V_{lim} > 300km/h$, $Q_{lim} \leq 160kN$	170kN	170kN
궤도횡압 (Track shift force)	$(\sum Y_{2m})_{lim} = \alpha(10 + \frac{P_0}{3})$ $P_0 = \text{축중}(kN)$, $\alpha = 1.0$, 화물: 0.85	$(\sum Y_{2m})_{lim} = \alpha(10 + \frac{P_0}{3})$ $P_0 = \text{축중}(kN)$, $\alpha = 1.0$, 화물: 0.85	$(\sum Y_{2m})_{lim} = \alpha(10 + \frac{P_0}{3})$ $P_0 = \text{축중}(kN)$, $\alpha = 0.85$
레일횡압 (Guiding Force)	$250m \leq R \leq 600m$, $Y_{lim} = 60kN$	$250m \leq R \leq 600m$, $Y_{lim} = 60kN$	$R > 300m$, $Y_{lim} = 45kN$ $R \leq 300m$, $Y_{lim} = 55kN$
탈선계수 (Climbing Ratio)	$(Y/Q)_{2m} = 0.8$	$(Y/Q)_{2m} = 0.8$	$(Y/Q)_{2m} = 0.8$

윤중은 그림 6에서 볼 수 있듯이 경합된 경우가 경합되지 않은 경우보다 약 1~7kN 정도 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 경합 여부에 관계없이 도상종별로는 거의 유사한 것으로 나타났다. 중곡선의 형태별로는 미소한 차이지만 오목중곡선이 3~7kN 정도 크게 나타났다

횡압의 경우도 그림 7에서와 같이 경합여부와 도상종별로 아주 미소한 차이가 발생하였으며, 오목중곡선의 경우가 전반적으로 다소 크게 나타났다.

탈선계수는 경합여부 및 도상종별에 관계없이 최대값의 차이가 0.062 이하로 아주 미소한 차이가 발생하였으며, 오목중곡선의 경우가 전반적으로 크게 나타났다. 횡압과 탈선계수도 일반적(평면원곡선과 중곡선경합)으로는 블록중곡선의 경우가 크게 나타나지만, 앞서 언급하였듯이 곡률이 변화하는 완화곡선상에서의 경합으로 인해 차량의

거동이 다소 불규칙하게 나타나기 때문에 판단된다.

이상의 결과로부터, 현행 국내기준상 가장 불리한 선형 조건으로 해석을 수행한 결과에서도 도상종별로 중곡선과 완화곡선 경합시 차량의 주행안전성 및 궤도에 미치는 작용력이 표 5의 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 고에서는 철도선형에서 중곡선과 완화곡선의 다양한 경합조건에 대한 기초검토를 위해 국내외 관련기준과 해외사례에 대해 간략히 소개하였으며, 또한 자갈도상과 콘크리트 도상에 대해 중곡선과 완화곡선의 경합조건별로 차량/궤도선형 상호작용 해석을 수행하여 차량의 주행안

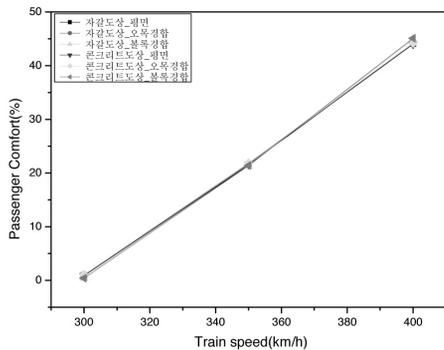


그림 5. 경합조건별 승차감 비교결과

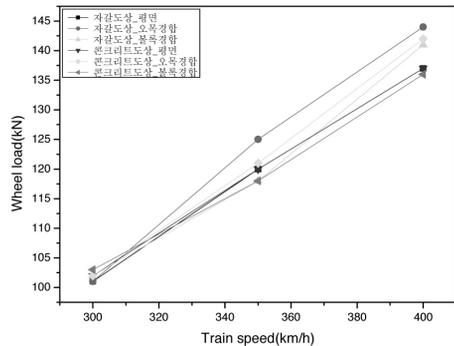


그림 6. 경합조건별 윤중 비교결과

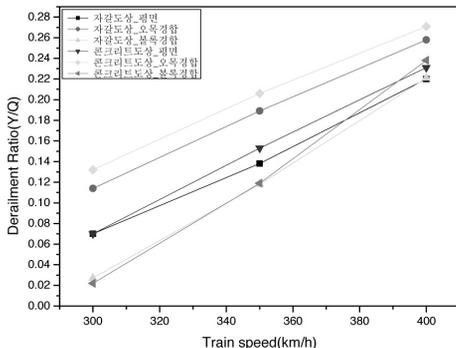


그림 7. 경합조건별 탈선계수 비교결과

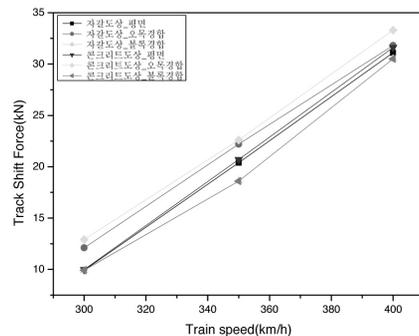


그림 8. 경합조건별 횡압 비교결과

전성과 승차감, 그리고 궤도작용력을 비교 분석 하여 완화곡선상 종곡선과의 경합에 대한 영향을 해석적으로 살펴보고자 하였다.

해석결과, 완화곡선과 종곡선이 경합되었을 때, 승차감은 경합인 경우가 평면선형만 있는 경우에 비해 1.0~1.2배 정도로서 거의 유사하게 나타났으며, 궤도작용력에 대해서는 윤증이 최대 144kN, 횡압이 최대 33.3kN으로 나타나 기준과 비교해 안전함을 알 수 있었다. 그리고 탈선계수는 평면선형만 있는 경우에 비해 약 1.2~1.9배 정도 크게 나타났으나, 기준치인 0.8에는 훨씬 못 미치는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 해외사례에서도 알 수 있듯이 콘크리트궤도상 평면곡선(완화곡선 및 원곡선)과 종곡선과의 다양한 경합조건을 허용하고 있음을 알 수 있었으며, 해석결과에서도 경합인 경우에도 승차감 및 주행안전성, 그리고 궤도작용력 측면에서는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타나, 향후 콘크리트궤도에 대해서도 종곡선과 완화곡선의 경합도 가능할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구를 바탕으로 향후에도 경합의 다양한 조건에 대한 충분한 해석

적인 검토를 통해 구체적인 경합조건에 대한 설계 및 시공방안에 대해서도 보완검토가 수행되어야 할 것으로 사료된다. ☺

♣ 참고 문헌

- [1] 국토해양부(2009) 철도건설규칙 및 건설기준 규정
- [2] 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
- [3] BS EN 12299 Railway applications(2009) Ride comfort for passengers-Measurement and evaluation, BSI.
- [4] Bjorn Kolver(1997) Optimization of single horizontal curves in railway alignments, VTI report 424A
- [5] 엄주환, 최일윤, 양신주, 이일화, 김만철(2010), 종곡선/평면곡선 경합여부에 따른 최적평면선형조건 및 승차감 비교분석, 한국철도학회논문집, 제13권 6호.
- [6] AEA Technology, VAMPIRE User Manual.
- [7] S.C. Yang, E. Kim, J.H. Lee, J.H. Um, et al(2009) 고속철도 체결장치 적정교환주기 산정 연구, 한국철도기술연구원 연구보고서