

경부선 틸팅열차의 가능 운전시간 추정 연구

A Study on the Possible Running Time Estimation of Tilting Train on the Gyeongbu line

노 학 래* · 한 성 호†
(Hag-Lae Rho · Seong-Ho Han)

Abstract - A rising attention is paid to the railway system in many countries. KOREA is also of the opinion that the railway has to play a more important role in the near future to face up to the problems that increase gradually in the transport sector. To attract more traffic to the rail networks, it is important for rail modes to have running time competitiveness. Tilting trains, where it is possible to tilt the car-body towards the center of the curve, are a less expensive alternative to shorten travelling times on existing lines. Running time for tilting train is one of the most important factors, with which passenger demand forecasting or economic feasibility analysis will be done. This paper evaluates the speed limitation of tilting train around curves and also presents calculation process of its simulated possible running time. Then the adequacy of estimated time is verified with running time for Korean prototype tilting train TTX (Tilting Train eXpress) by actual test run. As a case study, the estimated running time for the production version of tilting train and its time saving are presented compared with 2012's conventional Saemaul trains and non-tilting trains on the Gyeongbu line in the Korean rail network.

Key Words : Tilting train, Possible running time simulation, Speed limit on curve, Ride comfort

1. 서 론

지난 몇 십년동안 철도차량의 설계, 개발 분야에서 일어난 가장 혁신적인 진보는 순수 기계 시스템만 사용되던 철도차량에 전기전자/제어기술이 통합 적용되어 열차의 고속화가 이루어졌다는 것이다. 차량의 고속화와 더불어 능동제어(active control) 기술은 고속주행에 따른 열차의 성능요구조건과 승차감 조건을 보장하는 주요 수단이 되었으며, 틸팅 시스템은 철도차량에 적용된 첫 번째 능동제어 기술사례로서, 유럽 철도교통시장에서는 비교적 성숙된 상업적 운영기술로 인정받고 있다[1]. 이탈리아의 펜돌리노(Pendolino), 스웨덴의 X-2000과 같은 틸팅열차는 기존선에서 200km/h 이상의 상업운전속도(high commercial speed)로 양질의 서비스를 제공하여 성공을 거둔 좋은 예라 할 수 있다[2].

우리나라에서는 2001년부터 틸팅열차 연구사업이 시작되어 한국형 틸팅열차(TTX: Tilting Train eXpress) 제작이 2006년 완료되었다. 2007년 4월부터는 코레일 영업노선에서 틸팅열차 시운전 시험이 시작되어 2012년 9월 14일 현재 총 시험운전 누적 주행거리가 157,558.8km (충북선 25,580.3km, 호남선 81,648.6km, 중앙선 32,317.7km, 태백선 1,828.4km,

영동선 228.8km, 경부선 15,917.7km) 에 이르게 되었다. 이 과정에서 한국형 틸팅열차는 큰 오류나 장애 없이 신뢰성과 안전성을 입증하였으며, 2012년 9월 본 연구사업은 틸팅열차의 실용화를 속제로 남겨 놓은 상태에서 종료되었다.



그림 1 한국형 틸팅열차 TTX의 외관

Fig. 1 Photographs of the Korean TTX

한편, 본 사업을 통하여 개발된 추진/제동장치는 2011년 180km/h 경춘선 ITX-청춘과 경부선 150km/h 간선형 EMU (Electric Multiple Unit) 열차의 상용화 모델(ITX-새마을)에 적용되는 성과를 보였다.

본 논문에서는 틸팅열차와 같은 새로운 열차시스템 도입 시 승객수요 추정 및 경제성 분석의 입력요소가 되는 운전시간 추정방법을 제시하고, 경부선 사례검토를 통하여 틸팅열차의 운전시간 단축효과를 검토하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 틸팅열차는 곡선구간에서 차체틸팅(car-body tilt)을 통하여 일반열차보다 곡선통과 허용속도를 높일 수 있는데 2장에서는 틸팅열차의 곡선통과 제한속도를 설정하는 4단계 프로세스와, 이러한 속도설정의 기준이 되는 승차감 한계값을 승객, 선로(track), 차량의 관

† Corresponding Author : High-speed Train Systems Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea
E-mail : shhan@krii.re.kr

* Policy-Technology Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute, Korea

접수일자 : 2015년 3월 10일

수정일자 : 2015년 5월 20일

최종완료 : 2015년 9월 3일

점에서 제시하였다. 3장에서는 시뮬레이션 기법을 활용한 열차 운전시간 산정 과정을 기술하고, 실제 시운전 운전시간과의 비교를 통하여 시뮬레이션 운전시간의 적정성을 검증하였다. 4장에서는 사례연구로 경부선의 틸팅열차 가능 운전시간을 추정하고, 일반열차 대비 틸팅열차의 운전시간 단축효과를 기술하였다. 결과 요약 및 본 논문의 결론은 5장에 이어진다.

2. 틸팅열차의 곡선통과 제한속도 설정

2.1 틸팅열차의 곡선통과 제한속도 설정 프로세스

그림 2는 차체틸팅과 관련된 파라미터를 보여준다. 일반적으로 선로의 곡선부에는 캔트(cant)라는 기울기가 있으며, 이것은 일반열차가 제한속도에서 곡선을 주행할 때 발생하는 원심가속도의 횡방향 성분을 중력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시켜 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키는 역할을 한다. 열차의 곡선 통과속도를 증가시키면서 동시에 승객이 경험하는 승차감(횡가속도) 조건을 유지하기 위해서는 틸팅구동기(tilt actuators)를 활용한 추가적인 캔트, 즉 차체틸팅 γ 가 적용되어야 한다.

틸팅열차의 곡선 제한속도는 전복의 위험성(derailing risk)과 승차감 저하(danger of discomfort)의 2개 조건을 고려하여 설정되며, 그림 3은 틸팅열차의 곡선 제한속도를 결정하는 4단계 프로세스를 보여준다.

기본적으로 선로의 선형조건(track geometry)은 열차 허용속도의 상한치(upper limit)를 정의하는 중요한 요소이다. 따라서 속도결정의 예비단계에서는 현재 및 장래의 선로 평면선형, 곡선반경, 완화곡선 길이, 부설캔트, 허용속도 등을 조사한다.

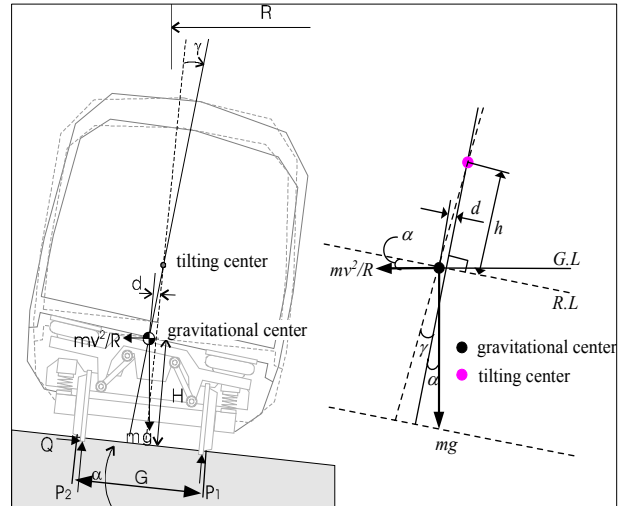


그림 2 곡선주행 시 틸팅열차에 작용하는 힘의 균형 [3, p.5]
Fig. 2 Equilibrium of forces acting on tilting train

where, G=lateral distance between wheel/rail contact,
H=center of gravity of the vehicle,
R=circular curve radius,
v=speed of tilting train, m=mass,
d=outward shift of the center of gravity
h=distance b/w tilting and gravitational centers
g=acceleration of gravity (9.81 m/s²)
 α =slope in degree of the track, γ =tilting angle
P₁ & P₂=wheel loads of the rail,
Q=lateral wheel pressure of the rail
G.L=ground level, R.L=Rail level

제한속도 설정 1단계에서는 중력 중심에 작용하는 힘의 균형과 모멘트 균형, 1/3 법칙(one-third rule)에 따라 식 (1)과

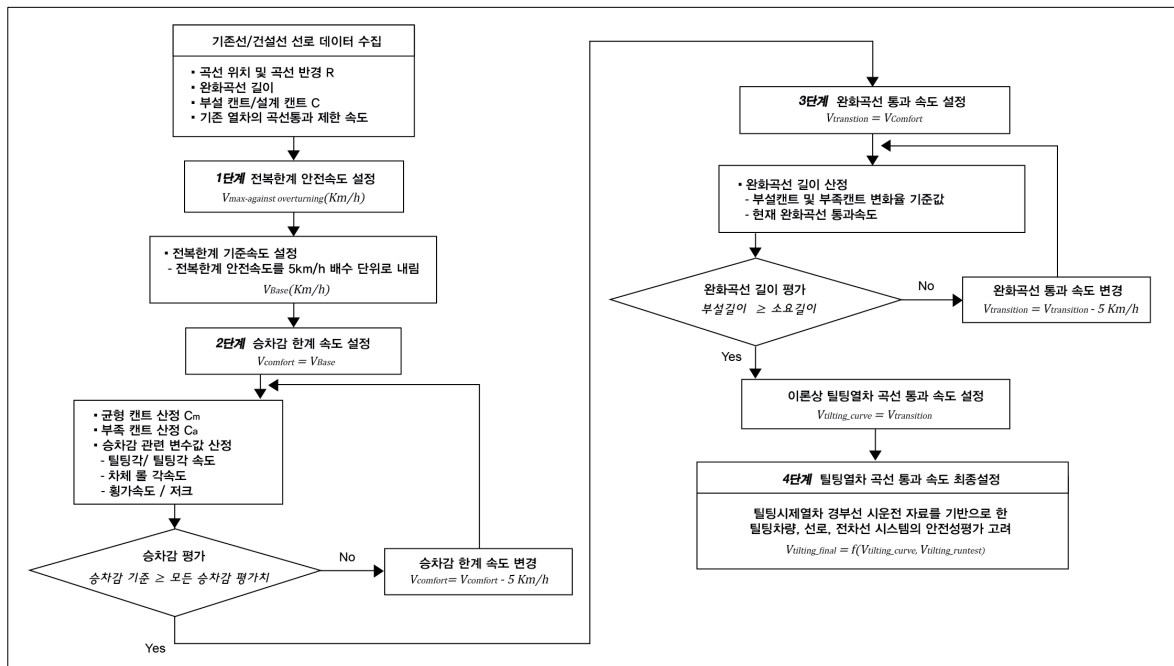


그림 3 틸팅열차의 곡선 통과 최고 제한속도 설정 4단계 프로세스

Fig. 3 4-steps process in setting the maximum speed limit of tilting train around curves

같이 곡선에서의 전복에 대한 최대 안전속도를 구한다. 식 (1)은 틸팅열차가 전복의 위험 없이 곡선을 안전하게 통과할 수 있는 최대 가능속도로서, 우리나라에서는 열차 제한속도를 5km/h 단위로 규정하기 때문에 식 (1)에서 계산된 속도는 5km/h의 배수로 내림하여, 이를 “전복한계 기준속도”라 정의한다.

$$V_{max_against\ overturning} = 3.6 \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot \sin\alpha - \left[\frac{g \cdot (6 \cdot d - G)}{6} \right] \cdot \cos\alpha}{\left[\frac{(6 \cdot d - G)}{6 \cdot R} \right] \cdot \sin\alpha + \frac{H}{R} \cdot \cos\alpha}} \quad (1)$$

“전복에 대한 안전”이라는 관점과는 별도로 승객의 승차감 관점에서 제한속도 검토도 필요하다. 따라서 2단계에서는 우선 “전복한계 기준속도”에서의 균형켄트와 부족켄트를 계산한다. 차체틸팅은 추가적인 켄트로서 이 부족켄트를 사용하며, 틸팅각은 기준속도와 완화곡선 길이, 곡선반경, 부족켄트 및 틸팅보상율을 기준으로 계산된다. 횡가속도, 횡가속도 변화율, 틸팅 각속도 및 롤 가속도 등 승차감 관련 변수값은 틸팅각과 차량의 롤계수를 이용하여 계산될 수 있다.

2단계에서는 모든 승차감 관련 변수값이 기준값을 초과하지 않는 지를 검토하여(예를 들어 횡방향 가속도 0.08g), 이러한 기준을 만족할 경우 기준속도는 곡선부 틸팅열차의 승차감 한계속도로 설정된다. 그렇지 않을 경우 승차감 한계속도는 기준속도를 5km/h 감한 속도로 설정되며, 다시 승차감 관련 기준의 만족 여부를 점검한다. 이러한 과정은 곡선에서의 승차감 관련 기준이 모두 만족 될 때까지 반복된다.

일반적으로 기준철도에는 틸팅열차의 장점이 충분히 발휘될 수 있는 것 보다 완화곡선이 훨씬 짧게 설치되어 있다. 따라서 현재 부설 또는 장래 건설될 완화곡선의 길이에 적합하게 틸팅열차의 허용 가능 속도가 결정되어야 한다. 3단계에서는 켄트 및 부족켄트의 시간당 변화량 한계값에 따른 완화곡선 길이가 부설 또는 장래 설치될 완화곡선 길이 보다 길 경우 완화곡선 통과속도를 5km/h씩 감하여 완화곡선 길이에 적합한 허용가능 속도를 구할 때 까지 반복하여 계산한다.

3단계에서 곡선의 선형조건을 고려하여 설정된 틸팅열차의 이론적 곡선통과 허용속도는 4단계에서 TTX 기준선 주행시험 결과를 반영하여 운전시간 산정에 적용될 틸팅열차 곡선통과 제한속도로 보정된다.

2.2 틸팅열차의 곡선통과 제한속도 설정 시 승차감 기준

틸팅열차가 운행되는 유럽의 선로표준은 표 1에서 보는 바와 같이 일반열차 및 틸팅열차의 켄트, 부족켄트, 켄트 변화율 및 부족켄트 변화율에 대한 지침을 제시한다. 반면, 한국의 철도건설규칙에는 일반열차의 부족켄트 및 켄트변화율이 규정되어 있으나, 틸팅열차의 경우 이에 대한 규정이 없는 실정이다. 표 1에서 보는 바와 같이 유럽의 선로표준은 주어진 선형조건에서 틸팅열차의 켄트 및 부족켄트 변화율이 일반열차의 변화율 보다 높은 값을 허용하고 있음을 알 수 있다. 이는 틸팅열차가 일반열차 보다 향상된 속도로 완화곡선을 주행하기 때문에, 켄트 변화율 및 부족켄트 변화율

모두가 높게 나타나는 것이다.

표 1 일반열차 및 틸팅열차의 켄트 기준 비교

Table 1 Comparison b/w different standards on non-tilting & tilting trains

구분	스웨덴 ¹⁾	CEN ²⁾	한국 ³⁾
켄트	mm	150	160
일반열차			
부족켄트	mm	150	100~130
부족켄트 변화율	mm/s	51	50
부족켄트 변화율	mm/s	56	55
틸팅열차			
부족켄트	mm	245	275
켄트 변화율	mm/s	60	75
부족켄트 변화율	mm/s	79	100

1) National Standards in Sweden, issued by BV(Banverkert), 1996 [4,5]

2) European Committee Standardization, EN 13803-1:2010, [4,5]

3) 철도건설규칙(National Standard Specification for Railroad Construction in Korea), 2009

승객의 승차감 기준은 승객이 불편하다고 간주하는 한계와 관련이 있으며, 다음과 같은 기준이 사용된다.

- 최대 차체 가속도(횡가속도) 0.08g, 최대 횡저크 0.1g/s (곡선에서의 불편감)

- 최대 롤 각속도 5°/s (멀미(motion sickness)의 위험도)

이러한 승객의 승차감 불편 한계 요구조건은 다음과 같은 선로 관련 요구조건으로 변환된다.

- 최대 켄트 160mm, 최대 부족켄트 265mm

- 최대 켄트 변화율 60mm/s, 최대 부족켄트 변화율 79mm/s (스웨덴 기준) : 틸팅열차의 켄트 및 부족켄트 변화율에 대한 상세 시험자료가 부족하고, 국내 철도건설규칙에는 관련 규정이 없으므로, 본 논문에서는 승차감 수준 및 완화곡선 길이 평가를 위한 켄트 및 부족켄트 변화율 평가기준으로 스웨덴 기준을 적용함.

또한 선로 관련 요구조건은 차량(열차) 관련 조건으로 변환될 수 있으며, 다음 한계값이 사용되었다.

- 최대 틸팅각 8° 이하

- 최대 차체 틸팅 각속도 4°/s 이하

3. 시뮬레이션을 통한 열차운전시간 추정 과정 및 검증

3.1 시뮬레이션을 통한 열차운전시간 산정 프로세스 설정

철도시스템에서 각각의 열차는 선로 최고속도, 차량의 최고속도 및 가.감속 성능 등 제약조건 하에서 운동방정식을 만족하며 이동한다. 본 논문에서는 Newton 제2법칙의 운동방정식 모델을 기반으로 한 열차운전성능 분석 시뮬레이션 프로그램을 활용하여, 열차의 물리적 효율이 최대로 활용될 때의 기술적 최소운전시간(technical minimum running time)을 산정하였다.

그러나 시뮬레이션을 통하여 산출된 기술적 최소운전시간은 여유시간(recovery time) 등이 포함된 상업운행 열차시각

표의 열차운전시간과는 차이가 있다. 또한 시뮬레이션에서는 운전자 개개인의 습성이나 반응행태를 모두 모사할 수 없고 운전자의 평균적인 운전행태 만이 모형화 되기 때문에 열차운전시간 산출 시에는 인간요소(human factor)에 대한 추가적인 고려도 필요하다. 따라서 본 논문에서는 최대한 현실적인 톨팅열차 운행시간 추정을 위해 그림 4와 같은 프로세스를 통하여 열차운전시분을 산정하였다.

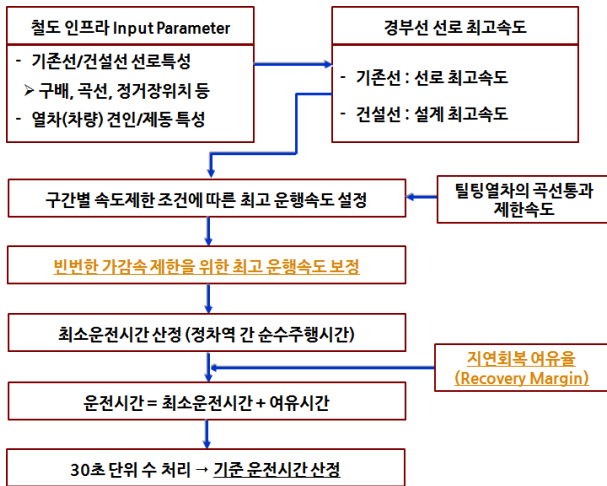


그림 4 시뮬레이션을 통한 열차운전시간 산정 과정
Fig. 4 Running time calculation process by simulation

1) Step 1 : 선로 최고속도의 설정
열차는 차량성능에 따른 최고속도로 주행하는 것이 아니라 해당 노선의 시설수준에 따른 선로 최고속도 이하로 운행된다. 선로최고속도는 기존 운영선의 경우 『열차운전시행세칙』에서 각 노선별로 규정되어 있으며, 신규 건설선의 경우에는 설계 최고속도를 적용한다.

2) Step 2 : 속도제한 조건에 따른 최고 운행속도 설정
선로 최고속도, 열차성능 최고속도, 곡선/구배/정거장통과 속도 제한조건에 따른 구간별 최고 운행속도를 설정한다.

3) Step 3 : 빈번한 가·감속 제한을 위한 최고 운행속도 보정
시뮬레이션에서 열차는 최대 가속 및 최대 제동 성능을 이용하여 주행하기 때문에 운전시간을 단축할 수 있으나, 그 결과 가·감속이 빈번하게 발생하고 에너지 소모가 많아지게 된다. 그러나 실제 운전 시 기관사는 선로조건을 미리 알고 예측운전이 가능하기 때문에, 최고 운행속도의 변화가 짧은 구간에서는 가·감속에 의한 증속·감속 운전을 하지 않고 등속운전을 한다. 다음 그림 5에서 보는 바와 같이 최단시간 운전(점선)에서는 2번째 가속이 짧게 이루어지고 다시 감속 운전을 하게 되나, 실제 운전(파선)에서는 최고 운행속도의 변화구간이 짧아 가·감속 운전을 하지 않고 등속운전을 하게 된다. 본 논문에서는 그림 6의 파선과 같이 최고 운행속도 변화가 짧은 구간(1km 이하)에서는 등속운전이 이루어지도록 최고 운행속도를 조정하였다.

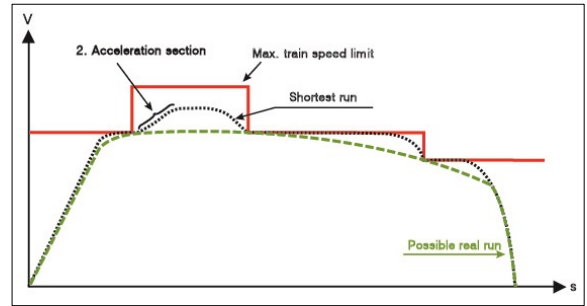


그림 5 열차운전 전략 [6]
Fig. 5 Train-run strategy

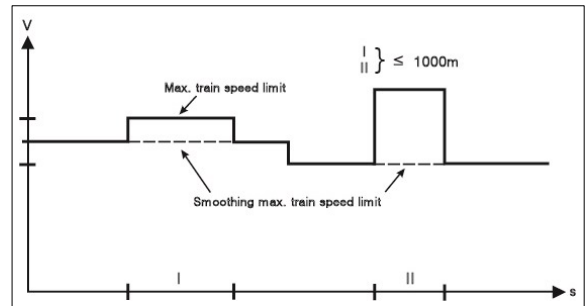


그림 6 최고 운행속도의 보정 [6]
Fig. 6 Revised train-speed limit

4) Step 4 : 최소운전시간의 산정
정차역간 순수 주행시간(pure running time)은 열차성능 (train performance)과 운동방정식에 따라 계산된 물리적으로 가능한 최소 운전시간이다. 본 논문에서는 보정된 최고 운행속도와 열차성능자료를 기준으로 열차성능 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 열차의 최소운전시간을 산정하였다.

5) Step 5 : 여유시간(recovery time) 고려 운전시간 산정
순수 주행시간만을 고려하여 열차운전계획을 수립할 경우 소규모 지연(small delay) 발생 시 열차는 이러한 지연을 회복할 수 있는 기회를 거의 갖지 못하게 된다. 따라서 열차 주행 중 발생하는 지연을 만회하거나 정거장 진·출입 시 제동취급 등에 여유를 갖기 위해서는 순수 주행시간에 여유시간이 포함되어야 한다.

여유시간은 그림 7에서 보는 바와 같이 ㉠ 열차의 모든 주행경로 상에 균일한 비율로 배분되거나, ㉡ 열차 주행경로의 말단이나 대규모 중간 터미널(large intermediate terminals)에 집중적으로 배치되는 경우도 있다. 일반적으로 회복 여유시간은 순수 주행시간에 대한 일정비율로 계산되며, 유럽철도의 경우 이러한 보상시간(time supplement)은 순수 주행시간의 3~7% 수준이며, 북미철도의 여객열차에 있어서는 6~8% 정도이다[7].

6) Step 6 : 가능 운전시간(possible running time)의 산정
Step 5에서 산정한 각 역간 운전시간은 1초 단위로 되어 있어 이 시간단위를 15초 또는 30초 단위로 수 처리하여 가능 운전시간을 산정하는 것이 실용적으로 편리하다. 본 논문에서는 Step 5의 운전시간을 30초 단위로 수 처리 하여 가능 운전시간을 산정하였다.

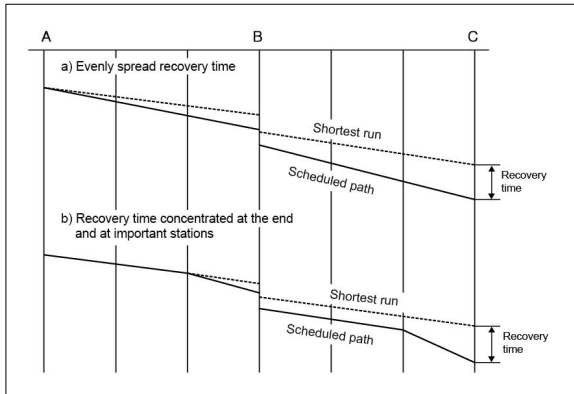


그림 7 회복 여유시간의 포함 원리 [7]
Fig. 7 Adding recovery time to a shortest run times

3.2 시뮬레이션을 통한 열차운전시간 추정 검증

열차의 운전시간은 해당 열차의 동적 능력(가속 및 감속 성능)에 강하게 영향을 받는다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 보다 신뢰성 있는 운전시간을 산정하기 위해서는 열차의 동적 성능에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 시운전 주행시험을 통한 성능 비교가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 표 2의 톨팅 시제열차 TTX의 성능요소와 그림 8의 호남선 노안역 부근 2.9km 직선구간의 선로자료를 기준으로, 실제 주행시험과 시뮬레이션 상의 가속성능 프로파일을 비교·검토하였다.

표 2 한국형 톨팅 시제열차 TTX의 성능 사양

Table 2 Key specifications, Korean TTX-experimental

구 분	TTX
차량 편성	6량 1편성 tilting EMU* (동력차 4량, 부수차 2량)
운행 최고속도	180 km/h
열차 길이	143 m
만차 중량	322 ton
초기(기동) 가속도	0.50 m/s ²
상용 감속도	0.89 m/s ²
비상 감속도	1.00 m/s ²
주행 저항	$R=7,889+58.69v+0.6507v^2$ (N), where v is speed (km/h)
기동 견인력	202 kN
정토크 종단속도	85 km/h
정전력 종단속도	135 km/h

* Electric Multiple Unit (전기동차)

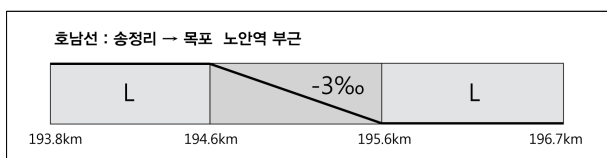


그림 8 TTX 가속성능 시험구간
Fig. 8 Track location for a acceleration test of TTX

표 3과 그림 9는 TTX 실제 주행시험과 시뮬레이션에서의 속도별 가속거리를 보여주는 것으로, 시뮬레이션에 의한 가속거리가 실제 주행시험의 가속거리 보다 9.6%~2.8% 길게 나타났다. TTX 형상에 따른 공기저항의 영향 등을 시뮬레이션 상에서 주행저항식을 통하여 근사치로 모사하였다는 점을 고려할 때, 가속성능에 대한 시뮬레이션 결과와 실제 주행시험 결과는 거의 차이가 없는 것으로 판단된다.

표 3 TTX의 속도별 가속거리 비교

Table 3 Comparative TTX acceleration distance

속도 (km/h)		50	100	150
가속 거리 (m)	TTX 실제 주행시험 (A)	177	743	2,136
	TTX 시뮬레이션 (B)	194	776	2,196
편차 (B-A, m)		17	33	60
편차 비율 [(B-A)/A, %]		9.6%	4.4%	2.8%

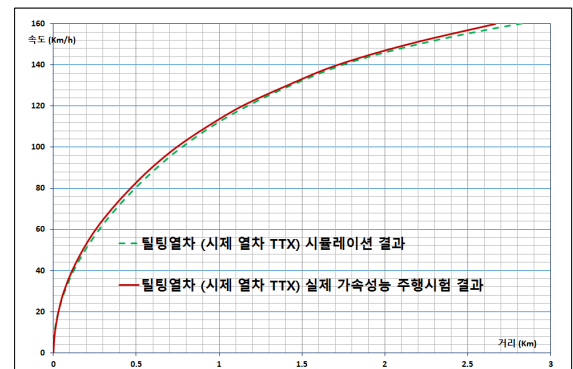


그림 9 TTX 가속곡선 비교 (주행시험 vs 시뮬레이션)
Fig. 9 Comparative TTX acceleration curves b/w actual test run & simulation

한편, 표 4는 TTX의 경부선 대전~동대구 구간 실제 시운전 운전시간 측정결과와 시뮬레이션 운전시간 추정결과를 비교하여 보여주는 것으로, 2가지 운전시간 사이에는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 다만, 구미~대구 구간에서 시뮬레이션 운전시간 보다 시운전 운전시간이 1분 30초 짧은 것으로 나타났는데, 이는 시운전 열차가 이 구간에서 정규열

표 4 TTX 운전시간 비교 (실제 시운전 vs. 시뮬레이션)

Table 4 Running time comparison b/w TTX actual test & simulation

구 간	거리 (km)	TTX 실제 시운전 운전시간 (시:분)	TTX 시뮬레이션 운전시간 (시:분:초)
대전~김천	87.54	0:47	0:47:00
김천~구미	22.87	0:13	0:13:00
구미~대구	46.38	0:24	0:25:30
대구~동대구	3.18	0:03	0:03:00
합 계*	160.27	1:30	1:31:30

* 합계에는 중간 정차역 정차시분 3분 포함 (정차역별 1분 정차)

차에 대한 간섭을 최소화하기 위해, 열차 및 선로조건에 따른 최고성능 운전을 하였기 때문이다. 따라서 틸팅열차와 같이 새로운 열차시스템의 가능 운전시간 추정에 본 논문에서 제시하는 시뮬레이션 프로세스를 활용하는 것에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 사례연구 : 틸팅열차 경부선 가능 운전시간 추정

4.1 틸팅열차 투입대상 노선

경부선은 2004년 경부고속철도 개통과 더불어 복선전철로 개량된 노선으로, 가까운 장래에 경부선에 대한 시설개선 또는 고속화 개량은 없을 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 이용자들은 경부선의 속도향상 및 신규 열차 서비스 도입을 통한 경쟁력 향상을 요구할 것이며, 인프라 개선을 위한 대규모 투자 없이 여객열차의 고속화를 달성하기 위해서는 틸팅열차 도입이 대안으로 고려될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 10의 경부선 서울~부산 구간을 틸팅열차 서비스 투입 후보노선으로 고려하였다.

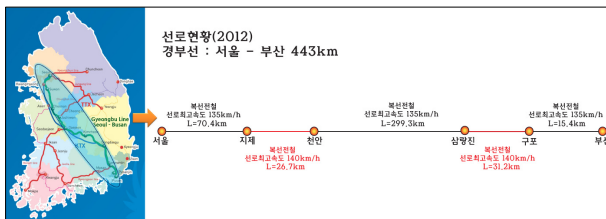


그림 10 경부선 선로 현황
Fig. 10 Track conditions of the Gyeongbu line

경부선 서울~부산 구간의 총연장은 2012년 기준 443km이며 곡선연장은 전체연장의 42%인 258.4km에 달한다. 그림 11에서 보는 바와 같이 전체연장의 17%인 75.4 km는 곡선반경 R=600m 곡선이고, R=800m 곡선은 전체연장의 6.7%인 29.9km이다. 전체연장 대비 36.1%의 곡선이 R=1,200m 이하의 곡선으로 구성되어 있다.

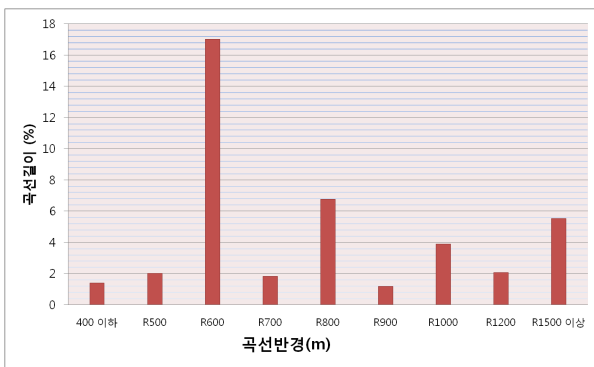


그림 11 경부선 서울~부선의 곡선반경별 곡선 분포
Fig. 11 Distribution of curves on the Gyeongbu line

4.2 틸팅열차 상용화 모델의 성능기준

틸팅열차 운전시간 산정에는 다음 표 5와 같은 TTX 상용화 모델의 성능기준이 사용되었다. 이 열차에는 2010년 10월 입찰공고 된 코레일의 최고운행속도 150km/h 간선형 전기동차(non-tilting EMU) 성능사양이 적용되었으며, 장래 TTX의 생산모델(production version)로 가정되었다.

표 5 최고속도 150km/h 틸팅열차 상용화 모델의 성능요소
Table 5 Key performance factors for the production model of TTX (v_{max}=150km/h)

구분	TTX 상용화 모델
차량 편성	6량 1편성 tilting EMU (동력차 3량, 부수차 3량)
운행 최고속도	150 km/h
열차 길이	141 m
만차 중량	340 ton
초기(기동) 가속도	0.69 m/s ²
상용 감속도	0.83 m/s ²
비상 감속도	1.11 m/s ²
주행 저항	R=4,094+46.92v+0.6570v ² (N), where v is speed (km/h)
기동 견인력	263 kN
정토크 종단속도	65 km/h
정전력 종단속도	110 km/h

TTX 상용화 모델의 최고 운영속도는 경부선 선로 최고 속도에 맞추어 150km/h로 하향 조정되었고, 이에 따라 기동 견인력 유지 종단속도(정토크 종단속도) 및 정전력 종단속도도 각각 65km/h, 110km/h로 조정되었다. 또한 이 열차는 TTX 보다 훨씬 빠르게 가속되는데, 이러한 가속능력의 차이는 초기가속도 및 기동견인력의 실질적인 개선을 가정하였기 때문이다.

4.3 열차 운전시간 산정의 조건

장래 열차운행방식은 거점역간 급행운전 형태로 이루어지며, 서울, 부산 시중착역 포함 총 16개역에서 정차하며(서울, 영등포, 수원, 평택, 천안, 대전, 영동, 김천, 구미, 대구, 동대구, 경산, 청도, 밀양, 구포, 부산), 정차역별 정차시분은 1분(60초)으로 가정하였다.

코레일의 “열차운전시행세칙”에 따르면, 선로구간에서는 해당 구간 특성에 따른 속도제한 규정을 적용받는다. 따라서 하구배 구간 및 역구내 구간에서는 일반열차 및 틸팅열차 모두 이 세칙의 속도제한 규정을 따라야 한다. 한편 이 세칙에서는 곡선구간의 속도제한을 일반열차에 대해서만 규정하고 있다. 따라서 틸팅열차의 곡선부 제한속도는 구간별, 곡선반경별로 그림 3의 4단계 프로세스에 따라 설정되었다. 이에 따른 틸팅열차의 속도제한은 개별곡선의 선형조건에 따라 다음 표 6에서 보는 바와 같이 일반열차의 제한속도보다 0~30km/h 높게 설정되었다.

표 6 경부선 곡선반경별 곡선통과 제한속도 비교 (일반 vs. 틸팅)

Table 6 Max. acceptable speed comparison on curve of Gyeongbu line b/w non-tilting & tilting train

곡선 반경 (m)	400	500	600	700	800	900	1000	1200 이상
일반열차 (A) (km/h)	90	100	110	115	125	130	135	140
틸팅열차 (B) (km/h)	90~110	100~130	110~135	130~135	125~135	130~135	135	140
B-A (km/h)	0~20	0~30	0~25	15~20	0~10	0~5	0	0

4.4 틸팅열차의 경부선 가능 운전시간 추정

본 논문에서는 열차운전성능 시뮬레이션 프로그램인 TPS-ONC ver. 2.0을 활용하여 경부선의 정차역간 기술적 최소 운전시간을 산정하였고, 여기에 열차운전 여유율(recovery margin) 10%를 추가하여 가능 운전시간을 추정하였다.

표 7은 서로 다른 열차 운전시간을 보여준다. 우선 3번째 열의 운전시간은 2012년 코레일 웹사이트의 열차운전시각표에서 구한 것으로, 중간 정차역에서의 정차시간을 포함한 새마을호 열차의 평균 운전시간을 나타낸다. 그 다음으로 현재의 속도제한 규정을 적용하여 일반 EMU열차의 운전시간을 시뮬레이션 하였을 경우, 그 운전시간이 5번째 열에 나타나 있으며, 곡선 구간의 제한속도를 틸팅열차의 최대 허용가능 속도까지 높일 경우 틸팅열차의 운전시간은 6번째 열에 표시되어 있다.

그림 12에서 보는 것과 같이 경부선 서울~부산 간 틸팅열차의 가능 운전시간은 4시간 20분이 소요되는 것으로 예상되며, 이는 2012년 새마을호 열차의 운전시간 4시간 51분

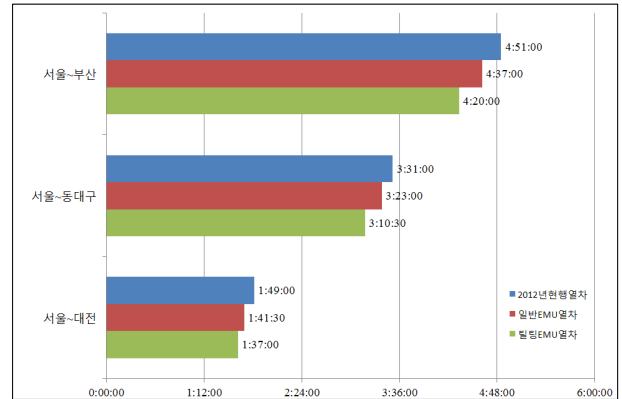


그림 12 경부선 새마을 열차, 일반열차 및 틸팅열차의 가능 운전시간 비교

Fig. 12 Possible running time comparison b/w Saemaul, non-tilting & tilting train on the Gyeongbu line

과 비교할 때 최대 31분의 단축 가능성이 있을 것으로 판단된다. 이러한 운전시간 단축은 2가지 효과로 분리될 수 있을 것이다. 첫 번째 효과는 디젤동력 열차를 전기동차(EMU) 열차로 변경함으로써 열차의 동적성능 개선에 기인한 것으로서, 전체 운전시간 단축의 45%인 14분이 이 효과에 의한 것이라 판단된다. 한편 나머지 55%인 17분은 틸팅장치에 의한 운전시간 단축효과로 볼 수 있다.

서울~천안 구간에서는 틸팅기술에 의한 시간단축 효과보다는 EMU 열차로의 변경에 따른 효과가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 서울~천안 구간이 2복선 전철화사업 따라 곡선반경이 큰 선형으로 개량됨으로써 틸팅기술에 의한 곡선부 증속효과 보다는 열차의 동적성능 개선에 의한 직선부

표 7 경부선 새마을 열차, 일반열차 및 틸팅열차 가능 운전시간 비교

Table 7 Possible running time comparison b/w Saemaul, non-tilting & tilting train on the Gyeongbu line

구 간	거리 (km, 2012)	2012년 새마을호 평균 운전시간 (A)	10% 여유율 반영 시뮬레이션 추정 운전시간			
			일반 EMU 열차의 추정 운전시간 (시:분:초) (B)	틸팅 EMU 열차의 추정 운전시간 (시:분:초) (C)	단축율 (%)	
					$\frac{A-B}{A}$	$\frac{B-C}{B}$
서울~수원	41.5	0:30:00	0:27:30 (▽0:02:30) ¹⁾	0:27:00 (▽0:00:30) ²⁾	8.3	1.8
서울~천안	97.1	1:05:00	0:59:30 (▽0:05:30) ¹⁾	0:58:30 (▽0:01:00) ²⁾	8.5	1.7
서울~대전	166.8	1:49:00	1:41:30 (▽0:07:30) ¹⁾	1:37:00 (▽0:04:30) ²⁾	6.9	4.4
서울~김천	254.6	2:44:00	2:36:00 (▽0:08:00) ¹⁾	2:26:30 (▽0:09:30) ²⁾	4.9	6.1
서울~동대구	327.1	3:31:00	3:23:00 (▽0:08:00) ¹⁾	3:10:30 (▽0:12:30) ²⁾	3.8	6.2
서울~밀양	382.6	4:12:00	4:00:30 (▽0:11:30) ¹⁾	3:45:00 (▽0:15:30) ²⁾	4.6	6.4
서울~부산	443.1	4:51:00	4:37:00 (▽0:14:00) ¹⁾	4:20:00 (▽0:17:00) ²⁾	4.8	6.1

1) ()는 새마을호 열차 대비 일반 EMU 열차의 단축시간을 나타냄.
 2) ()는 일반 EMU 열차 대비 틸팅 EMU 열차의 단축시간을 나타냄.

속도향상 효과가 높게 나타났기 때문이다.

한편, 선형개량이 이루어지지 않은 천안~대전 구간의 경우, 열차성능 개선에 따른 시간단축 가능성(2분) 보다 틸팅 기술에 의한 가능성(3분 30초)이 더 높게 나타났으며, 이를 통해 볼 때 틸팅기술은 선형개량이 이루어지지 않은 기존선(existing line)의 속도향상에 적합한 기술로 판단된다.

5. 결 론

틸팅열차 기술은 곡선부 캔트가 부족하여 승객이 느끼는 횡방향 가속도를 상쇄할 수 없는 기존선의 속도향상에 적합한 기술이기 때문에, 새로운 트랙을 건설하지 않고 비용효과적(cost effective)으로 운전시간을 단축할 수 있는 해결책이 될 수 있다.

본 논문에서는 틸팅열차의 곡선부 제한속도 설정방법과 시뮬레이션을 통한 가능 운전시간 추정 방법을 제시하고, 사례연구로서 경부선에 선형개량 없이 틸팅열차를 투입할 경우 운전시간을 추정하였다. 이를 통해 기존 새마을 열차 대비 어느 정도 운전시간 단축효과가 있는지를 알아보았다. 경부선 서울~부산 구간에서는 약 11%의 운전시간 단축효과가 있으며, 이 중 45%는 EMU 형식으로 열차성능이 향상됨에 따라 나타난 효과이며, 나머지 55%는 틸팅장치에 의한 곡선부 속도향상에 기인한 것으로 분석된다. 틸팅의 경제적 활용성은 이와 같이 인프라 시설에 대한 막대한 투자 없이 열차의 운전시간을 단축할 수 있다는 점에 있는 것이다.

틸팅열차와 같은 새로운 열차시스템 도입 시 기존의 운전시간 산정방법은 열차의 성능과 선로 특성에 따른 기술적 최소운전시간을 보정 없이 사용함으로써, 수요추정 오차를 증가시키는 오류를 나타내기도 한다. 따라서 본 논문에서 제시한 운전시간 산정 방법은 시뮬레이션에 의한 운전시간 산정 시 기관사의 운전특성과 지연에 따른 보상 여유시간 등을 고려함으로써 보다 현실적인 운전시간 추정방법을 제안하였다는 점에서 의의가 있을 것이다.

한편, 틸팅 기술에 의한 시간단축 효과가 실질적인 경제성 향상효과로 이어지기 위해서는 “틸팅열차의 속도향상으로부터 발생하는 추가수익이 틸팅장치를 차량에 설치할 때 발생하는 차량가격 상승을 상쇄할 수 있는가? [8]”라는 경제적 타당성 검토에 대한 추가 연구도 생각해 볼 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 국토교통부 재원으로 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 지원을 받아 한국철도기술연구원에서 수행한 “한국형 틸팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술개발” 연구단 과제에 의해 연구결과를 기반으로 작성된 것입니다.

References

[1] R. M. Goodall, S. Bruni, A. Facchinetti, “Active Control in Railway Vehicles”, International Journal of Railway Technology, Vol. 1, No.1, pp.57-85, 2012, doi:10.4203/ijrt.1.1.3.

[2] O. Fröidh, “Perspective for a future high-speed train in the Swedish domestic travel market”, Journal of Transport Geography, Vol. 16, No. 4, pp.268-277, 2008.

[3] Y. H. You, J. H. Um, K. Y. Eum, “Evaluation of Maximum Allowable Speed of Tilting Car in Korea Conventional Railway”, Proceedings of the Railway Engineering-2014: 7th International Conference on ‘Maintenance & Renewal of Permanent Way; Power & Signalling; Structures & Earthworks’, London, UK, 6-7 July, 2004.

[4] B. Kufver, J. Forstberg, Tracks for tilting trains, European Commission Competitive and Sustainable Growth Programme - Fast and Comfortable Trains (FACT), Deliverable D3, 2004.

[5] R. Persson, Tilting trains-Technology, benefits and motion sickness, Licentiate thesis in railway technology, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2008.

[6] A. Radtke, “EDV-Verfahren zur Modellierung des Eisenbahnbetriebs”, Habilitation am Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb, Uni. Hannover, Series No. 64, 2005.

[7] J. Pacht, Railway Operation and Control, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, USA, 2002.

[8] H. L. Rho, S. H. Han, G. H. Kim, “Evaluating New Track Construction Costs of Two Different Options: Conventional Trains vs. Tilting Trains”, International Journal of Railway, Vol.5, No.3, pp.103-113, 2012.

저 자 소 개



노 학 래 (盧 學 來)

1994년 2월 한양대학교 일반대학원 도시공학과 졸업 (석사)
 1996년 12월~현재 한국철도기술연구원 녹색교통물류시스템공학연구소 정책기술 융합연구실 책임연구원
 E-mail : hlrho@krri.re.kr



한 성 호 (韓 成 浩)

1996년 2월 숭실대학교 공과대학원 전기공학과(시스템 및 제어전공)졸업 (박사)
 1996년 7월~현재 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 고속열차연구팀 수석연구원
 E-mail : shhan@krri.re.kr