

사전틸팅제어의 곡선부 주행 승차감 평가 연구

Study for Prediction of Ride Comfort on the Curve Track by Predictive Curve Detection

고태환† 이덕상*
Tae-Hwan Ko Duk-Sang Lee

ABSTRACT

In the curving detection method by using an accelerometer, the ride comfort in the first car is worse than one in the others due to spend the time to calculate the tilting command and drive the tilting mechanism after entering in the curve. In order to enhance the ride comfort in the first car, the predictive curve detection method which predicts the distance from a train to the starting point of curve by using the GPS, Tachometer, Ground balise and position DB for track. In this study, we predicted and evaluated the ride comfort for predictive curve detection method in transient curves according to the shape and dimension of transient curve and the various driving speed. Also, we predicted the improvement of the ride comfort for predictive curve detection method by comparing with the result of the ride comfort for predictive curve detection method and for curve detection method using an accelerometer in the short transient curve.

1. 서론

회가속도 센서를 통한 곡선부 감지방식을 적용하는 틸팅열차는 차량이 곡선부에 진입한 후 곡선을 인지하고 필요한 틸팅제어각을 연산하고 지령하고 끝으로 구동장치를 구동하기까지는 빠르기는 0.4초 늦게는 0.8초까지 시간이 소요된다. 따라서 선두차량의 승차감이 다소 다른 차량에 비해 저하되는 문제가 있다. 이를 보완하기 위해 곡선 진입전에 곡선을 감지하고 필요한 명령을 사전에 하달함으로써 차량이 진입과 동시에 완화곡선부의 부설캔트량과 곡선반경을 고려하여 틸팅이 이루어지도록 하는 사전틸팅제어 방식을 사용한다.

곡선의 위치를 예측하는 방법으로는 GPS, Tachometer, RF방식의 지상자 등을 이용하여 차량의 위치 자료를 얻고 차량에 내장된 선로 DB를 통해 곡선 시작점과 차량의 거리를 추종하는 방법이 있다. 보통 GPS는 음영구간인 터널이 많은 곳이나 날씨가 흐린날에는 정확성이 떨어지므로 다른 위치추적 방식과 병행하여 사용하거나 비교 reference로 사용한다. 지상자의 방식은 정확성이 우수하지만 곡선부에 추가 설치해야 하는 경제적인 부담이 있으며, Tachometer는 장거리를 추적할 경우 누적 오차가 발생되므로 정확한 reference를 통해 보정을 수행하여야 한다. 따라서 위에서 언급한 방법을 병합하여 GPS 또는 지상자는 Tachometer의 누적거리를 보정하는 reference로 사용하며 곡선부 진출입과 본곡선 진출입에 대한 위치는 Tachometer의 거리를 통해 틸팅제어에 활용하는 방식을 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구는 회가속도 센서를 활용한 틸팅제어 시 완화곡선부에서의 캔트와 곡선반경의 변화 그리고 틸팅구동지연에 대하여 승차감을 다양한 완화곡선부 형상에 대하여 이론식을 활용해 예측하며 결과를 비교평가하고자 한다. 또한 사전틸팅제어방식에서 완화곡선부에서 수행하게 될 제어명령 패턴의 승차감 특성을 평가하기 위해 완화곡선부의 선형과 차량의 주행속도에 따른 완화곡선부 승차감을 예측하고 제

† 교신저자, 한국철도기술연구원, 고속철도인터페이스연구실

E-mail : thko@krii.re.kr

* 대한전기

어패턴을 제안하고자 한다. 또한 완화곡선이 짧은 곡선에서 사전틸팅제어를 통한 예측된 승차감 결과와 횡가속도 센서를 통한 제어방식의 승차감 결과를 비교함으로써 사전틸팅제어의 승차감 향상효과를 예측하고자 한다.

2. 본론

2.1 완화곡선부 승차감 계산식

완화곡선부에서 부설칸트(C_x)와 곡선반경(R_x)의 위치별 변화에 따라 변화되어지는 횡가속도 ($a_r = \frac{(V/3.6)^2}{R_x}$) 및 차체 롤각속도($\dot{\theta}_c$)을 차량의 틸팅각(α_t)을 고려하여 계산한다. 본 곡선의 부설칸트 량(C)와 곡선반경(R)을 기반으로 최대 틸팅에 대한 틸팅각과 본 곡선에서의 승차감을 평가하였으나, 완화곡선부에서의 틸팅구동 지연을 고려한 분석은 진행되지 않았다. 우선 승차감 평가를 위해 선행조건으로 규정할 factors를 언급한다.

우선 틸팅각을 연산할 때, 승객이 곡선을 통과할 때 틸팅에 의해 100% 원심력을 보상받을 경우 시각과 몸에 비정상 상태를 느끼게 됨으로 발생하는 멀미를 제거하기 위해 80%정도의 틸팅각 보상율(f_t)을 수행한다. 또한 틸팅 볼스터가 8도를 틸팅하더라도 차체의 원심력과 무게중심의 위치 그리고 에어스프링의 횡변위 강성에 의해 차체는 8도 미치지 못하게 된다. 본 계산에서는 이 차이(f_a)를 85%로 산정한다. 이럴 경우 실질적으로 승객이 느끼는 원심력의 보상은 약70% 이내로써 유럽의 틸팅차량에 멀미에 관련하여 규정하는 조건을 만족한다. 또한 틸팅제어를 위해 곡선의 시작으로 간주하기 시작하는 횡가속도를 0.2m/s^2 으로 하며 틸팅이 최초로 구현되기 시작한 시점은 0.2m/s^2 의 횡가속도가 대차에서 감지된 이후 0.5초 후로 선정한다. 이는 차량이 180km/h로 주행시 차량 1량의 틸팅지연이 발생하는 시간으로 2호차부터는 틸팅지연에 의한 승차감 저하가 발생되지 않게 된다.

보기센서로부터 받은 횡가속도(a_{Br}) 가지고 틸팅각을 연산하는 식은 다음과 같다.

$$\alpha_t(\text{deg}) = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1}\left(\frac{a_{Br} f_t}{9.81}\right) \quad (1)$$

여기서 $f_t = 80\%$ 이며, $a_{Br} = a_r \cos(\sin^{-1}(C_x/W)) - (9.81 \times C_x/W)$ 이다.

계산을 위한 궤간(W)는 1500mm로 하며 차량속도는 V로 표기한다. 보기센서의 횡가속도는 완화곡선부의 칸트에 의한 원심력에 대한 보상이 계산된 것으로 칸트부족량에 대한 횡가속도가 얻어지고 이것이 바로 틸팅각을 연산하기 위한 기본값으로 사용되어진다. 일정지점에서 승차감 계산을 위해 사용하는 틸팅각은 위에서 언급한 0.5초 전의 명령값을 사용하기로 한다. 구동 틸팅각은 혼돈을 피하기 위해 $\alpha_{t0.5}$ 로 표기하기로 한다. 여기서 얻어진 구동틸팅각을 가지고 차체의 틸팅각(θ_{cr}), 차체 롤각속도와 차체에 발생하는 횡가속도(a_{cr})을 아래와 같이 계산한다.

$$\theta_{cr} = \frac{180}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{C_x}{W}\right) + \frac{f_a}{100} \alpha_{t0.5} \quad (2)$$

$$\dot{\theta}_c(t) = [\theta_{cr}(t + \Delta t) - \theta_{cr}(t)] / \Delta t \quad (3)$$

$$a_{cr} = a_r \cos\left(\frac{\pi}{180} \theta_{cr}\right) - 9.81 \sin\left(\frac{\pi}{180} \theta_{cr}\right)$$

또한 차체의 틸팅횡방향 저크(\dot{a}_{cr})은 차체 횡가속도(a_{cr})의 시간 변화율로 계산한다. 여기에 더불어 EN규정에서 명시하는 완화곡선부 승차감지수(P_{ct})를 위에서 얻어진 값을 이용하여 완화곡선 과정에서 아래와 같이 계산하여 완화곡선부에서의 변화를 예측하고 평가한다.

$$P_{ct} = A a_{cr} + B \dot{a}_{cr} - C + D \dot{\theta}_c^E \quad \text{여기서 } A, B, C, D \text{ 그리고 } E \text{는 상수이다.}$$

2.2 완화곡선부 승차감 계산 Flow Chart

위에서 언급된 계산식을 활용하여 임의의 곡선반경, 부설켄트량, 완화곡선장 그리고 차량주행 속도에 대하여 승차감 평가를 위해 필요한 값을 해석하는 프로그램의 Flow chart를 간단히 정리하면 그림 1과 같다.

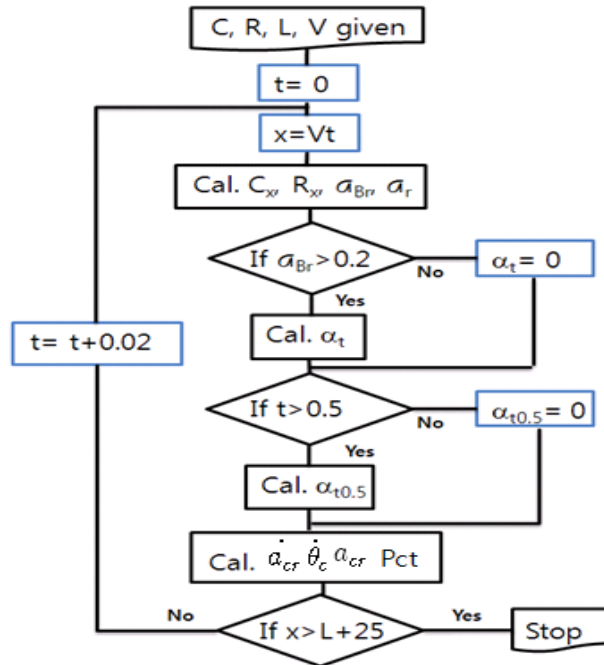


그림 1. 틸팅지연을 고려한 승차감 계산 순서도

본 계산과정은 곡선인식을 위한 0.2m/s^2 초과 횡가속도와 틸팅구현 지연시간 0.5초를 반영하였으며, 그 외에도 틸팅제어각을 연산할 때 틸팅 최대 각속도 4도/sec을 고려하여 계산을 수행하였다.

2.3 완화곡선부 승차감 비교 평가

2.3.1 틸팅지연을 고려한 승차감 비교

기존의 틸팅 승차감을 고려한 틸팅최대각 산출 또는 최대 틸팅각 8도에 대한 최대 주행속도를 예측하고 계산하는 식에는 틸팅지연에 대한 승차감 변화를 고려하지 않고 최대 틸팅각과 완화곡선 주행시간에 대한 최대 차체 롤 각속도와 차체 횡가속도 변화율(또는 저크) 그리고 Pct를 계산하여 승차감 기준에 만족함을 평가하였다.

그러나 보기센서를 통한 곡선부 감지와 이를 연산하여 구동하기 까지 소요되는 틸팅지연을 고려할 경우 틸팅의 지연에 의해서 전두부에 증가될 수 있는 승차감 저하는 예측되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 위에 언급된 프로그램을 통하여 틸팅지연에 대하여 승차감에 나타나는 영향을 평가하고자 한다. 틸팅열차가 사용하는 승차감 평가기준은 다음 표1와 같다.

표 1. 틸팅승차감 평가기준

평가항목	차체 횡가속도(a_{cr})	차체 롤각속도($\dot{\theta}_c$)	차체 횡저크 (\dot{a}_{cr})	Pct
평가기준	0.8m/s^2 이내	5도/sec 이내	0.5m/s^3 이내	5 이내

평가기준을 기반으로 틸팅각 최대8도와 최대 틸팅각속도 4도/sec을 가지는 틸팅열차 사양에 따라 승

차감을 만족하는 범위에서 최대 차량속도를 예시로 곡선반경(R) 400R, 주행속도(V) 110km/h, 부설캔트(C) 95mm 그리고 완화곡선장(L) 70m에 대하여 기존 평가방법과 본 평가방법을 통해 얻어진 결과를 비교하고자 한다. 표2는 주어진 예시의 조건에 대하여 기존방식을 통해 얻어진 결과이다.

표 2. 틸팅지연을 고려하지 않은 승차감 계산 결과

최대 틸팅각 (α_t)	최대 틸팅각속도 ($\dot{\alpha}_t$)	차체 횡가속도 (a_{cr})	차체 롤각속도 (θ_c)	차체 횡저크 (\dot{a}_{cr})	Pct	평가
7.95도	3.99도/s	0.54m/s ²	4.99도/s	0.27m/s ³	2.70	GOOD

표에 명시된 결과처럼 본 운행조건과 선로조건에 대하여 틸팅열차는 최대 사양조건을 만족하며 승차감 기준에 대해서도 차체 롤각속도만 기준에 근접하고 다른 평가기준은 50%의 수준으로 아주 양호하게 나타나고 있다. 따라서 이 조건에 대하여 위에서 언급한 틸팅지연을 고려한 완화곡선 진입부에서 승차감 평가 결과를 평가항목별로 그림 2에 명시한다. 본 계산에 활용되는 완화곡선부의 캔트와 곡선반경은 $C_x = C \frac{x}{L}$, $R_x = R \frac{L}{x}$ 로써 캔트변화는 선형적으로 그리고 곡선반경은 1/x 함수로 변화되는 국내 표준 완화곡선부 형상이다.

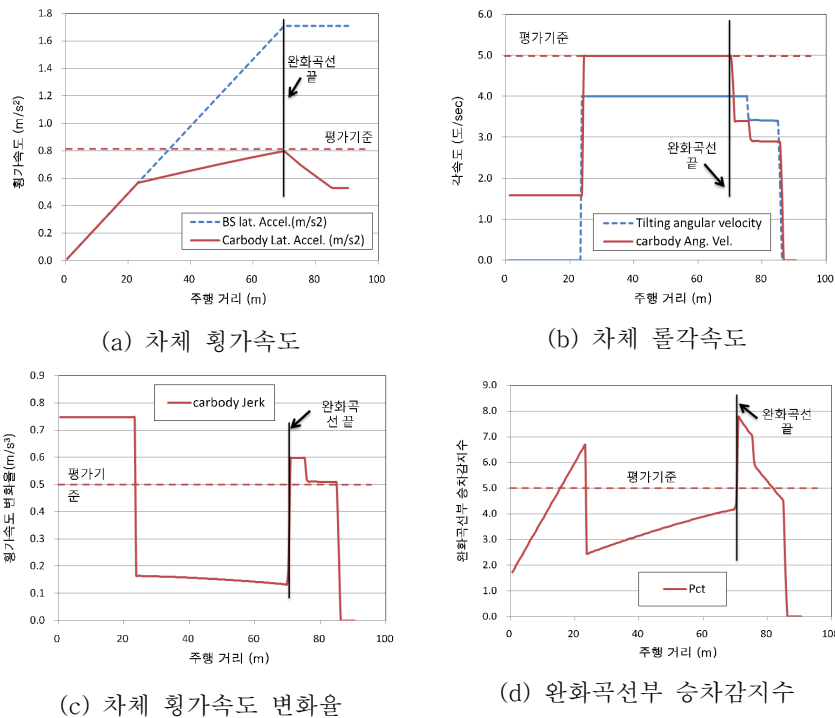


그림 2. 틸팅지연을 고려한 틸팅승차감 계산결과

틸팅지연을 고려한 완화곡선부에서의 차체 횡가속도는 본곡선을 진입하여 안정화되었을 때, 틸팅지연을 고려하지 않고 계산된 경우의 최대 횡가속도 값 0.54m/s²을 가지게 되며 완화곡선부에서는 0.6m/s² 이상의 값을 가지면서 완화곡선 출구에서는 최대값 0.798m/s²에 이르게 된다. 또한 차체 롤각속도는 평가기준을 넘지 않지만 표2처럼 평가기준에 가까운 값을 나타낸다. 초기의 값은 틸팅이 구현되지 않은 상태로 선로의 캔트의 변화율을 나타내며 틸팅이 구현되면서 틸팅에 의한 롤 각속도가 추가적으로 발생되어 0.5도/sec에 이른다.

차체 횡가속도 변화율, 즉 횡방향 저크는 승객이 차량내에서 좌/우로 텅기는 느낌을 느끼게 하는 값으

로 틸팅지연을 고려하지 않을 때는 0.27m/s^3 으로 아주 양호하였으나, 틸팅지연을 고려하면서 완화곡선 진입 시 기준을 넘어 틸팅구동 시작까지 유지된다. 그후 다시 완화곡선을 빠져나오면서 다시 상승한 후 감소된다. 이런 현상은 완화곡선이 짧은 곡선에서 현차시험을 통해 나타나는 현상과 동일하다. Pct 또한 저크와 같은 특성으로 완화곡선 진입부터 증가되어 평가기준을 넘어선 후 다시 감소되었다가 완화곡선을 빠져나오면서 최대값인 7.768에 도달한 후 다시 감소된다.

틸팅이 구현되는 구분과 완화곡선을 빠져나오는 부분에서 급격히 변화하는 특성은 틸팅제어각을 최대 틸팅각속도 4도/s에만 제한하고 있어서 나타나는 것으로 실질적인 제어에서는 완만하게 제어패턴을 형성하게 함으로써 급격한 변화를 줄일 수 있으며, 완화곡선부 내에서 발생하는 승차감 관련 결과의 최대값은 틸팅지연과 밀접한 관계를 가지며 지연시간을 최소화함으로써 감소시킬 수 있다.

2.3.2 완화곡선부 S-form Cant의 승차감 평가

독일의 경우는 틸팅열차의 승차감을 향상시키기 위해 완화곡선장의 길이를 연장하지 않고 완화곡선의 형상을 변경하는 방식으로 국내에서 사용하는 Linear cant 형상과 여기서 다루는 S-form Cant 형상의 중간에 해당하는 Bloss type을 사용하기도 한다. 본 연구에서는 우선적으로 S-form Cant 형상을 가지는 완화곡선에 대한 승차감을 평가하여 본다. 그림 3은 완화곡선에서의 Linear와 S-form의 다른 cant 변화를 보여주고 있다.

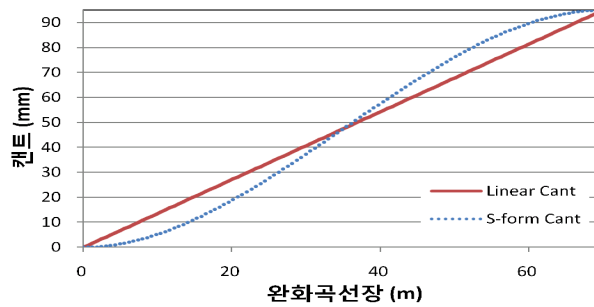


그림 3. Linear와 S-form의 캔트 변화 특성

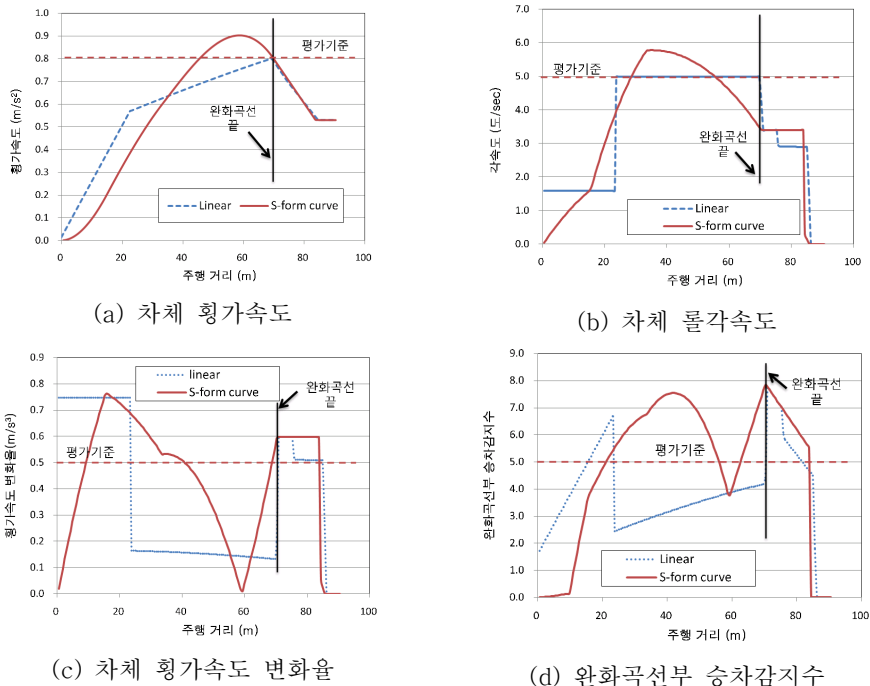


그림 4. S-form Cant 완화곡선의 틸팅승차감 특성 비교

S-form Cant에 따라 곡선반경 변화를 적용한 완화곡선에 대한 틸팅열차의 승차감을 계산하여 차이를 비교하여 그림 4에 나타내었다. S-form은 진출입에 완만한 변화를 가지고 있지만 완만한 부분이 길어질 경우 완화곡선의 중앙부분에 평가기준을 초과하는 현상을 유발함을 확인할 수 있다.

2.3.3 사전틸팅제어의 틸팅 승차감 평가

사전틸팅제어의 제어 패턴은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 위에서 언급한 틸팅지연을 0으로 줄이는 것으로 완화곡선의 진입과 동시에 그에 적합한 틸팅이 구현되게 틸팅제어를 수행하는 패턴이며, 두 번째는 급완화곡선에서 진입전에 이미 틸팅을 구현하여 완화곡선의 부족한 부분을 보완하며 승차감을 유지하는 제어패턴을 수행하는 것이다. 본 연구에서는 우선적으로 틸팅지연을 최소화한 사전틸팅제어의 승차감 향상 특성을 분석하고자 한다. 그림 5는 2.3.1에서 평가기준을 초과한 저크와 Pct에 대한 사전틸팅제어 승차감 비교특성을 보여 주고 있다.

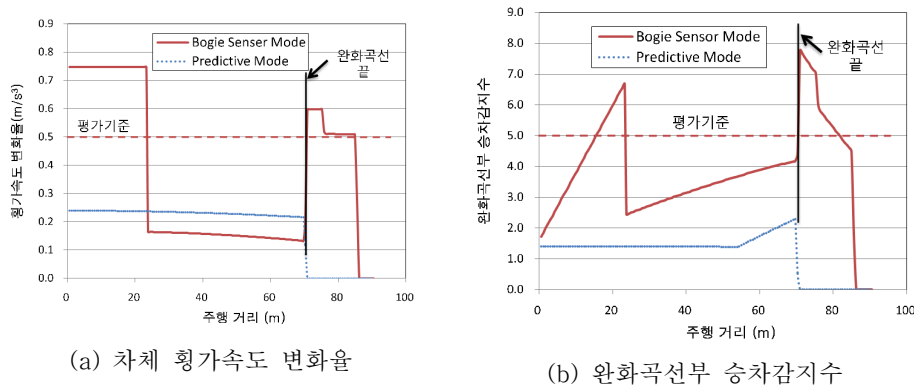


그림 5. 사전틸팅제어에 따른 틸팅승차감 비교

차체 황가속도는 진입부터 서서히 증가하여 본곡선 진입에서 최대값 0.53m/s^2 에 도달하며, 차체 물각 속도는 진입부터 최대값 4.553도/s 로 시작하여 서서히 감소되는 특성을 가지게 된다. 그림에 나타난 차체 황가속도 변화율은 0.239m/s^3 으로 시작하여 서서히 감소되다가 완화곡선을 빠져 나오면서 0으로 감소된다. Pct 또한 1.5이하의 양호한 값을 유지하다가 완화곡선을 나오면서 증가한 후 0으로 감소되는 현상을 보인다. 급격한 감소는 최종 틸팅각의 구현에 대한 틸팅각속도 제어를 추가하므로써 완만한 변화를 가져올 수 있을 것이다.

3. 결론

틸팅열차의 완화곡선부의 틸팅승차감 특성을 평가 하기위해서는 반드시 틸팅지연의 특성을 해석과정에 반영하여야 함을 확인할 수 있었다. 이로 인해 완화곡선부 내에서 틸팅승차감의 기준을 초과하는 현상이 발생됨을 확인할 수 있었으며 이는 틸팅지연의 영향으로써 사전제어방식을 활용한 제어를 수행하였을 경우 평가기준을 초과하는 현상을 제거할 수 있음을 확인하였다. 더 나아가 틸팅구동장치의 제한 틸팅각속도를 초과하는 급완화곡선에서도 승차감을 유지 시킬 수 있는 사전제어의 제어패턴을 제안할 수 있는 평가 연구를 지속적으로 추진하고자 한다. 또한 완화곡선장을 3단계로 나누어 중간은 Linear을 유지하고 초기와 후기에 완만한 S-form상태를 적절하게 형성함으로써 승차감 특성곡선을 최적으로 제공하는 완화곡선 선형에 대한 연구도 지속적으로 추진되어야 한다.

참고문헌

1. 최일윤의 3명, “완화곡선형상별 차량주행안전성 및 승차감 분석”, 한국철도학회논문집, 제13권 제5호 pp.509-515, 2010
2. Railway applications- Ride comfort for passengers-Measurement and evaluation, EN 12299, 2009.