

실측데이터에 의한 완화곡선 승차감 평가

최일윤*

¹한국철도기술연구원 첨단고속철도연구실

Analysis of Comfort on Transition Curve based on the Measured Data

Il-Yoon Choi^{1*}

¹Advanced HSR Research Division, Korea Railroad Research Institute

요 약 완화곡선구간은 직선과 곡선사이에 설치되는 구간이며, 곡선반경 및 캔트 등의 선형변화에 따라 차량의 횡방향 가속도, 횡방향 저크 및 물속도의 변화가 발생하여 차량주행안전성 및 승차감 측면에서 취약구간이 된다. 본 논문에서는 철도차량의 차체횡가속도와 물속도의 계측결과를 이용하여 완화곡선 구간의 승차감을 정량적으로 산정하였으며, 승차감 평가기법은 EN규격에서 제시하는 완화곡선 구간의 승차감 평가방법을 사용하였다. 평가결과로부터 통하여 국내 일반철도 노선의 완화곡선구간 승차감의 분포특성을 조사하였으며, 곡선반경 크기와 차량 속도가 완화곡선 구간의 승차감에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로, 캔트 시간변화율과 완화곡선 승차감의 관계를 분석하였다.

Abstract Transition curves are located between curve and straight section in railway. These transition curves are vulnerable to the ride comfort of passengers and safety of a vehicle because lateral acceleration, lateral jerk and roll velocity increase as curvature and cant change along the transition curves. In this paper, ride comfort on the transition curve was calculated on the basis of lateral acceleration and roll velocity measurements. The evaluation of ride comfort was conducted according to the methodology specified in European Standard. The distribution characteristics of the comfort index were investigated for the korean conventional line from the evaluation results. The influence of the curve radius and the vehicle speed on the ride comfort index was also investigated. Finally, the relationship between ride comfort and the rate of cant changes on transition curves was analyzed.

Key Words : Cant, Lateral acceleration, Radius, Ride comfort, Transition curve

1. 서론

철도노선에 있어서 직선과 원곡선 사이에는 설계기준에 따라 완화곡선이 설치되고, 이러한 완화곡선의 도입은 원곡선부에서 발생하는 차량의 횡가속도가 직선구간으로부터 완만하게 변화하도록 하여 차량의 주행안전성과 승차감을 확보하는 기능을 한다.

완화곡선의 길이 및 설정캔트량 등의 선형특성에 따라 차량 주행거동이 영향을 받으며, 완화곡선의 형상에 따라 곡률의 변화, 캔트변화율, 불평형 횡가속도, 횡저크

변화율, 상하방향저크변화율, 완화곡선길이 등이 달라지게 된다. 완화형상에 따라 완화곡선은 3차 포물선, 클로소이드, 사인반과장, Bloss 등으로 구분되며, 국내 일반철도에서는 3차포물선 완화곡선을 사용하고 있다[1].

완화곡선부에서는 곡률과 캔트 등이 변화하는 구간으로써 차량의 주행거동 변화하는 구간이므로 승차감 측면에서 불리하며, 완화곡선부의 특성을 고려하여 승차감을 평가하는 기법이 EN12299규격에 제시되어 있다[2]. 완화곡선부 평가기법(Pct)은 일반적인 철도차량의 승차감 평가기법과는 구분되며, 완화곡선구간에서의 차량의 횡

본 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 철도기술연구사업의 “철도인프라의 유지보수를 위한 고속종합검측 시스템 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Il-Yoon Choi (Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5347 email: icychoi@krii.re.kr

Received March 27, 2015

Revised (1st April 14, 2015, 2nd April 17, 2015)

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

가속도, 저크 및 롤속도를 이용하여 차량 횡방향 거동의 급격한 변화를 승객이 느끼는 승차감으로 정량적으로 평가하는 기법이다.

철도차량의 승차감에 관한 연구[3,4]에서는 고속차량에 대하여 승차감을 평가하였으나, 완화곡선의 승차감에 대한 검토를 수행하지 않았다. 완화곡선의 승차감에 대한 국내의 선행연구사례를 살펴보면, 완화곡선의 형상이 승차감에 미치는 영향을 수치해석에 의하여 검토하고 [5], 종곡선과 완화곡선의 결합에 따른 승차감 영향분석이 수행된 바 있다[6]. 그러나, 실제 노선에서 철도차량이 주행하면서 측정한 결과를 이용한 완화곡선 승차감 평가는 수행되지 않았다.

본 논문에서는 경부선 일반철도 구간에서 차체횡가속도 및 롤속도 등을 계측하고, EN12299 규정[2]에 제시된 완화곡선 승차감(Pct) 평가기법을 이용하여 승차감 평가를 수행하였다. 또한, 실제 철도노선에서 발생하는 완화곡선 승차감 분포특성을 조사하고, 원곡선의 반경 및 캔트 등의 선형 특성과 주행속도가 완화곡선 승차감에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 완화곡선구간 승차감 평가기법(Pct)

EN12299 규정[2]에 명시되어 있는 완화곡선부 승차감 평가방법은 각 완화곡선부에서 승객의 승차감을 평가하는 척도로써 사용된다. 이 방법은 곡선시점, 반향곡선 및 연속하는 곡선사이에서 저주파의 거동에 기인하는 순간적인 승차감을 평가하는 방법이다. 완화곡선부의 통과시간이 2초 이상인 경우에 이 평가기법을 적용할 수 있다. EN12299규정[2]에 제시된 완화곡선부 승차감평가 기법(P_{CT})은 좌석과 입석으로 구분되어 있으며, 승차감 평가기법은 다음과 같다.

$$P_{CT} = (\max[(A \cdot \ddot{y}_{1s}|_{\max} + B \cdot \dot{y}_{1s}|_{\max} - C); 0] + (D \cdot \dot{\phi}_{1s}|_{\max})^E) \times 100 \quad (1)$$

여기서,

P_{CT} : 승차감을 표현하는 승객들의 불만족도로 나타낸 백분율 (percentage)

$\ddot{y}_{1s}|_{\max}$: 차체 횡가속도의 최대절대 값(완화곡선 시점에서 종점 +1.6s까지의 시간 사이에

서의 횡가속도)

$\dot{y}_{1s}|_{\max}$: 차체 횡저크의 최대절대 값(완화곡선 시작점 1s에서 종점까지의 시간간격 사이에서의 횡저크)

$\dot{\phi}_{1s}|_{\max}$: 차체 롤속도의 최대절대 값(완화곡선 시점에서 종점까지의 시간 사이에서의 롤속도)

상기 식에서 완화곡선부 승차감 계산에 사용되는 계수는 Table 1과 같으며, 좌석과 입석에 따라 다른 값을 적용한다.

Table 1. Constants for Pct comfort index

Condition	A (s ² /m)	B (s ² /m)	C	D (s/rad)	E
In rest-standing	0.2854	0.2069	0.111	3.64	2.283
In rest-seated	0.0897	0.0968	0.059	0.916	1.626

측정한 횡가속도 및 롤속도의 데이터는 다음 식에 나타낸 전달함수에 따라 신호처리가 필요하며, 전달함수의 각 계수의 값은 Table 2와 같다. 신호처리에 사용된 주파수보정곡선을 Fig. 1에 정리하였다.

$$H(f) = H_h(f) \cdot H_l(f) \cdot H_t(f) \quad (2)$$

여기서,

$$H_h(f) = \frac{1}{1 - (\frac{f_1}{f})^2 - i \cdot \frac{f_1}{Q_1 f}}$$

$$H_l(f) = \frac{1}{1 - (\frac{f}{f_2})^2 + i \cdot \frac{f}{Q_1 f_2}}$$

$$H_t(f) = \frac{(1 + i \cdot \frac{f}{f_3})}{1 - (\frac{f}{f_4})^2 + i \cdot \frac{f}{Q_2 f_4}}$$

Table 2. Parameters and transfer functions of the frequency weightings

Band-limiting			a-v transition			Gain
f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	Q_2	K
[hz]	[hz]	[-]	[hz]	[hz]	[-]	[-]
-	100	$1/\sqrt{2}$	2	2	0.63	1

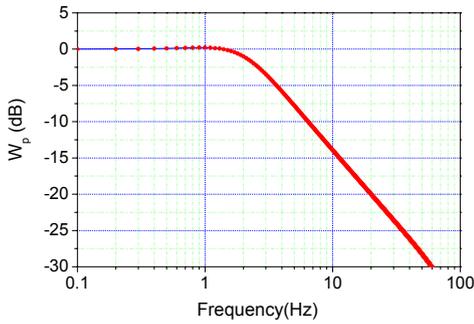


Fig. 1. Magnitude of frequency weighting

완화곡선 승차감평가를 위해서는 앞서 언급한 신호처리를 수행한 차체 횡가속도와 롤속도 데이터에 대하여 1 초 동안의 이동평균을 계산하여야 하며, 다음 식을 이용하여 산정한다.

$$\ddot{y}_{1s}(t) = \frac{1}{T} \cdot \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \ddot{y}_{Wp}(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$\dot{\phi}_{1s}(t) = \frac{1}{T} \cdot \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \dot{\phi}_{Wp}(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\bar{y}_{1s}(t) = \frac{1}{T} \cdot \left(\ddot{y}_{1s}(t + \frac{T}{2}) - \ddot{y}_{1s}(t - \frac{T}{2}) \right) \quad (5)$$

여기서, T=1sec

상기 식으로부터 계산된 값으로부터 완화곡선 구간에서 차체 횡가속도, 저크 및 롤속도의 최대값 ($|\ddot{y}_{1s}|_{\max}$, $|\bar{y}_{1s}|_{\max}$, $|\dot{\phi}_{1s}|_{\max}$)를 구하여 완화곡선 승차감(Pct) 계산식에 대입하여 계산한다.

3. 경부선 완화곡선구간 승차감 평가

3.1 개요

완화곡선의 승차감 평가 대상구간은 경부선의 부산~옥천 구간의 상선을 대상으로 하였으며, 해당 구간의 곡선현황은 Table 3과 같다.

차체 횡가속도와 롤속도에 대하여 신호처리를 수행하고 1sec 동안의 이동평균을 수행한 결과의 예를 Fig. 2에 정리하였다. 좌측 y축은 차체횡가속도(s^2/m), 저크(s^3/m) 및 롤속도(rad/m)를 의미한다.

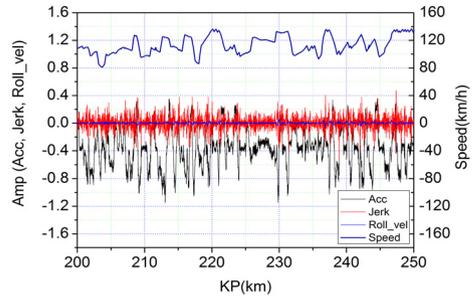


Fig. 2. Filtered data of lateral acceleration, Jerk and roll velocity of the car body

Table 3. Distribution of curve radius on the line

Radius (m)	Number	Ratio (%)
400	4	1.61
500	14	5.65
600	97	39.11
700	7	2.82
800	32	12.90
900	9	3.63
1000	25	10.08
1100	1	0.40
1200	9	3.63
1400	10	4.03
1500	1	0.40
1600	1	0.40
1700	1	0.40
1800	2	0.81
2000	23	9.27
2200	1	0.40
2300	1	0.40
2400	1	0.40
2500	1	0.40
3000	4	1.61
3200	1	0.40
3600	1	0.40
4000	2	0.81
	248	100

3.2 완화곡선 승차감 분포특성

해당 노선의 완화곡선 승차감(Pct) 평가결과로 부터 통계분포 현황을 좌석과 입석으로 구분하여 다음 Fig. 3에 정리하였다.

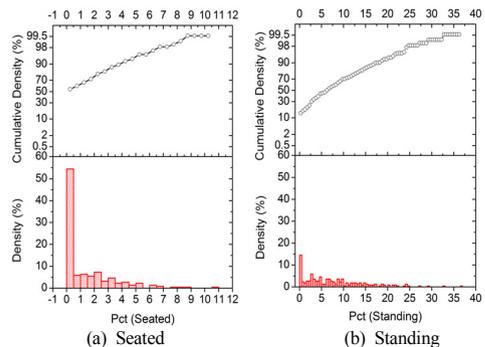
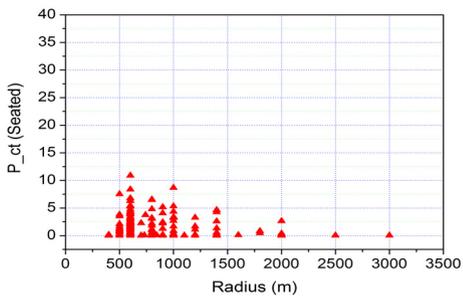


Fig. 3. P_ct evaluation according to Radius

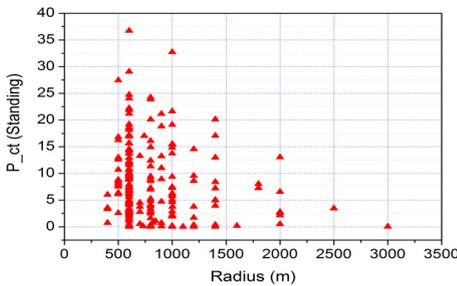
좌석의 승차감이 입석 보다 우수하며, 완화곡선의 승차감이 1보다 작게 평가된 구간은 좌석의 경우에는 평가 대상 구간의 약 60%, 입석의 경우에는 전체의 약 17%에 해당하였다. 또한, 완화곡선 승차감이 10이하를 갖는 경우를 살펴보면, 좌석은 99%에 해당하고 입석은 70%를 갖는 것으로 평가되었다.

3.3 곡선반경 및 차량속도가 완화곡선 승차감에 미치는 영향

곡선반경별에 따른 완화곡선 승차감(Pct)의 결과를 좌석과 입석으로 구분하여 곡선반경의 크기별로 Fig. 4에 정리하였다. 그래프의 X축은 완화곡선이 설치된 원곡선부의 곡선반경을 의미하며, Y축은 완화곡선부 승차감 값을 의미한다.



(a) Seated



(b) Standing

Fig. 4. P_{ct} evaluation according to Radius

좌석(Seated)의 완화곡선 승차감을 나타낸 Fig. 4(a)와 입석(Standing)의 완화곡선 승차감을 나타낸 Fig. 4(b)로부터 다소의 편차는 있지만 전반적으로 곡선반경이 증가함에 따라 승차감 값이 작게 분포되어 승차감이 향상되는 경향을 보였다. 좌석의 승차감이 입석의 승차감 보다 매우 작은 값을 보이며 상대적으로 승차감이 우수한 것으로 평가되었다.

그러나, 동일한 곡선반경에서도 완화곡선 승차감이 큰 편차를 보이는 있다. 이는 완화곡선구간의 궤도틀림, 완화곡선의 길이, 설정캔터량 및 차량의 주행속도 등이 차량의 횡방향 거동에 복합적으로 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

완화곡선의 승차감에 영향을 미치는 여러 인자 중에서 곡선반경에 의한 영향을 조사하기 위하여 각각의 곡선반경별로 승차감의 평균을 구하였다. 곡선반경을 제외한 나머지의 영향이 정규분포를 갖는다는 가정하면, 평균값을 활용하는 통계적 접근방법이 합리적이므로 각 곡선반경별 승차감의 평균을 계산하여 Fig. 5에 정리하였다. 평가구간에서 설치개소가 많지 않은 R400곡선은 R500곡선과 통합하여 평가하였으며, R2500 이상의 곡선은 R2500 곡선과 합산하여 정리하였다.

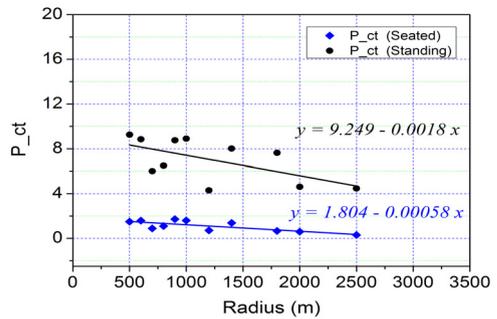


Fig. 5. Average P_{ct} according to Radius

모든 완화곡선부의 승차감 값을 나타낸 Fig. 4 그래프와는 달리 각 곡선반경별 평균을 계산하여 정리한 Fig. 5에서는 곡선반경이 커짐에 따라 완화곡선 승차감의 값이 감소하는 경향이 보다 명확하게 나타났다.

입석 승차감(standing) 평균값은 R500m 이하의 곡선에서 9.25로써 전체 곡선반경의 값 중에서 가장 큰 값을 보였으며, 곡선반경이 증가할수록 점점 감소하였다. 좌석 승차감(seated)은 R600곡선에서 가장 큰 값인 1.58로 평가되었고, 곡선반경이 커질수록 우수한 승차감을 보이고 있었다. 좌석 승차감은 입석 승차감에 비하여 전체적으로 약 15% 수준으로 평가되었으며, 이는 입석의 승차감에서 불만족을 느끼는 승객 중 85%가 좌석에 착석할 경우 승차감에 대하여 만족을 느낌을 의미한다.

한편, 차량의 속도가 승차감에 미치는 영향을 조사하기 위하여 차량의 속도와 곡선반경에 따른 완화곡선 승차감을 정리하였다. 곡선반경은 R400~600, R700~1000,

R1100~R2000 및 R2200 이상으로 그룹화하여 Fig. 6에 표현하였다.

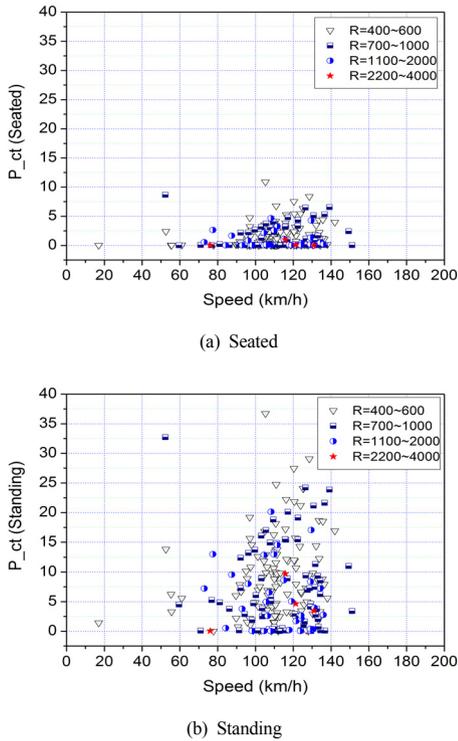


Fig. 6. P_{ct} as a function of curve radius and speed

Fig. 6으로부터 속도가 증가함에 따라 승차감 값은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 곡선부의 통과속도가 동일할 경우에는 곡선반경이 작을수록 완화곡선 승차감 값이 증가하여 승객이 느끼는 승차감이 나빠지는 경향을 보이고 있다. 다만, 앞서 설명한 바와 같이 궤도틀림, 하부강성, 완화곡선 길이, 설정켄트 등의 영향으로 인하여 차량의 횡가속도, 저크 및 롤속도의 변화가 발생하므로 완화곡선 승차감 평가 값이 다소의 편차를 보이고 있다.

3.4 켄트시간변화율이 완화곡선 승차감에 미치는 영향

한편, EN13803 규정[1]에서는 켄트의 변화에 따라 승차감이 영향을 받게 되므로 선형설계시 고려하도록 되어 있다. 완화곡선부에서의 켄트변화에 대한 검토는 다음 식에 나타난 켄트의 시간 변화율에 따라 계산된다. 켄트가 선형적으로 체감되는 경우에는 켄트의 시간변화율이 50mm/s 이하의 값을 갖도록 권고하고 있으며, 최대

허용치의 값은 60mm/s 이내가 되도록 규정하고 있다.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Delta D \cdot V_{\max}}{3.6 L} \quad (\text{mm/s}) \quad (6)$$

여기서, $\frac{dD}{dt}$: 켄트시간변화율

L : 완화곡선의 길이

ΔD : 설정켄트

V_{\max} : 차량속도

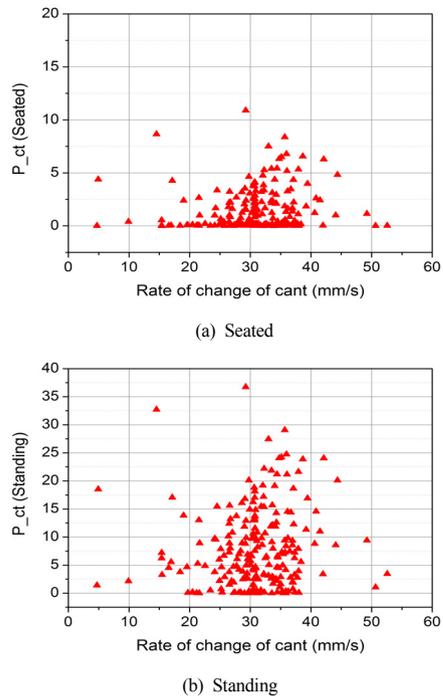


Fig. 7. P_{ct} as a function of curve radius and speed

완화곡선부의 승차감과 켄트의 시간변화율의 관계를 나타낸 Fig. 7에서 켄트의 시간변화율은 대부분 권고기준인 50mm/s 이내를 만족하고 있음을 알 수 있었으며, 평균 약 31mm/s와 표준편차 6.5mm/s의 정규분포의 특성을 갖는 것으로 평가되었다.

켄트 시간변화율과 완화곡선 승차감의 관계는 켄트 시간변화율이 40mm/s 이하에서는 다소의 상관성을 보이고 있으나, 켄트시간 변화율이 40mm/s 이상에서는 오히려 완화곡선 승차감의 값이 감소하는 경향을 보였다. 즉, 켄트의 시간변화율은 완화곡선 승차감에 영향이 곡선반경과 차량속도에 주행속도에 비하여 상대적으로 작은 것으로 평가되었다.

4. 결론

완화곡선부는 직선과 곡선의 선로선형을 연결하는 곡률, 캔트 등의 선형변화구간으로써 차량횡가속도, 저크 및 롤속도의 변화가 발생하는 구간이며, 차량주행안전성 및 승차감 측면에서 취약구간이 된다. 본 논문에서는 차량의 횡가속도 및 롤속도 계측결과를 바탕으로 실제 운행노선에서의 완화곡선 승차감 평가를 수행하였다. 승차감 평가는 완화곡선 승차감 평가하는 기법을 적용하여 정량적 승차감 평가를 수행하였으며, 고찰 결과를 정리하면 다음과 같다.

국내 일반철도노선에서의 완화곡선 승차감 지수가 1보다 작게 평가된 구간은 좌석의 경우에는 평가대상 구간의 약 60%, 입석의 경우에는 전체의 약 17%에 해당하였다. 또한, 완화곡선 승차감이 10이하를 갖는 경우를 살펴보면, 좌석은 99%에 해당하고 입석은 70%를 갖는 것으로 평가되었다.

곡선반경이 감소할수록 완화곡선 승차감 지수는 증가하는 경향을 보였으며, 좌석의 승차감 지수는 입석 대비 약 15% 수준으로 평가되었다. 즉, 좌석의 승차감은 입석 대비 약 6.7배 우수한 것으로 평가되었다.

또한, 차량의 속도가 증가할수록 완화곡선 승차감 지수가 증가하는 경향을 정량적으로 확인하였다.

캔트의 시간변화율은 대부분 권고기준인 50mm/s를 만족하고 있었다. 또한, 캔트의 시간변화율이 40mm/s 이하의 구간에서는 캔트시간변화율 증가에 따라 완화곡선 승차감 지수가 증가하는 경향을 보였으나, 40mm/s 이상에서는 오히려 완화곡선 승차감의 값이 감소하는 경향을 보였다.

마지막으로, 완화곡선 구간에서 차량의 횡방향 거동은 궤도틀림, 차량속도, 설정캔트량, 부족캔트량, 캔트의 시간변화율, 완화곡선의 길이, 곡선반경 등의 여러 요인에 의하여 영향을 받게 되므로 완화곡선 승차감 평가결과가 다소의 편차를 갖고 있음을 확인하였으며, 향후 보다 많은 계측결과를 바탕으로 각각의 영향인자의 영향을 종합적으로 분석하여 선형설계기준 개정의 기초로 활용하는 방향으로 후속 보완연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] EN13803, British Standards, Railway applications – Track – Track alignment design parameters – Track gauges 1435 mm and wider, 2010
- [2] EN12299, British Standards, Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation, 2009
- [3] Y.G. Kim, C.K. Park, S.W. Kim, K.H. Kim, J.S. Paik Analysis of the Frequency Weighting Curve for the Evaluation of Ride Comfort, Journal of the Korean Society for Railway, 13(6), pp. 552-558, 2010
- [4] Y.G. Kim, S.W. Kim, C.K. Park, S.S. Kim, K.H. Kim, Evaluation of Ride Comfort in Time Domain by Using z-Transform, Journal of the Korean Society for Railway, 14(6), pp. 495-500, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2011.14.6.495>
- [5] I.Y. Choi, J.H. Um, M.C. Kim, C.K. Park, Analysis of Running Safety and Ride Comfort According to the Shape of Transition Curve, Journal of the Korean Society for Railway, 13(5), pp. 509-515, 2010
- [6] J.H. Um, M.C. Kim, I.W. Lee, B.C. Goo, An Analytical Study on Running Safety and Ride Comfort in Case of Superimposition of Vertical and Transition Curves, Journal of the Korean Society for Railway, 15(2), pp. 172-178, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.2.172>

최 일 윤(IL-Yoon Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 졸업(공학박사)
- 2005년 12월 ~ 2006년 12월 : 미국 Georgia Tech. Univ. PostDoc
- 1996년 8월 ~ 1997년 12월 : 한국 고속철도건설공단 연구원
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 연구단장

<관심분야>

궤도 설계 및 유지보수, 검측시스템