<응용논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.11.1479** ISSN 1226-4873

철도차량 차체/대차간 상대변위를 이용한 곡선구간 곡률반경 추정 방법§

허현무*† · 박준혁* · 유원희*
* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

Curvature Estimation Method of Curve Section Using Relative Displacement Between Body and Bogie of Rolling-stock

Hyun Moo Hur*†, Joon Hyuk Park* and Won Hee You*
* High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Center

(Received April 27, 2012 ; Revised July 30, 2012 ; Accepted July 30, 2012)

Key Words: Curvature(곡률반경), Estimation(추정), Curve(곡선), Rolling-stock(철도차량)

초록: 철도차량 곡선구간 주행 시 곡선주행성능을 향상시키기 위한 능동형 철도차량 개발 분야에서 곡선구간을 실시간으로 인식하기 위한 기술 확보는 매우 중요하다. 그러나 고가의 전용 검측차량을 이용하거나 여러 가지 센서를 복합적으로 이용하는 기존의 곡률반경 추정방법은 실차에 적용하기에는 실용성이 미흡하다. 따라서 본 논문에서는 실차에 적용이 용이하고 경제적인 곡률반경 추정방법을 제안하였다. 새로운 방법은 철도차량 곡선구간 주행 시 발행하는 차체와 대차간의 상대변위를 측정하여 곡률반경을 실시간으로 추정할 수 있는 방법이다. 본 제안 방법의 타당성을 검토하기 위하여 모사해석 및 실차시험을 수행하였으며 그 결과, 제안한 곡률반경 추정방법의 타당성을 확인하였다.

Abstract: The development of a technique for the real-time sensing of a curve section is very important for active rolling-stocks in order to improve the curving performance. However, conventional methods using expensive track inspection equipment or various complex sensors are not practicable to be applied to commercial vehicles. Therefore, we have proposed a new method to estimate the curve radius of a curve section. This method uses the relative displacements occurring between the body and the bogie when the rolling-stock is running on a curve. To verify the validity of this method, we conducted a vehicle dynamics simulation and test using a real vehicle on a test line. The results confirmed the validity of the proposed method. We expect that this method will be effectively applied in studies of active rolling-stocks to increase the curving performance using active control technology.

- 기호설명 -

v : 차체 중심과 곡선간의 횡간격(mm)
Δ_1 : 차체와 전부 대차간 종방향 상대변위(mm)
Δ_2 : 차체와 후부 대차간 종방향 상대변위(mm)
θ_1, θ_2 : 차체와 전 후부 대차간 상대각(rad)
x : Δ_1, Δ_2 측정을 위한 대차 취부 센서와 대차중심과의 거리(mm)
L : 대차 중심간 거리의 반(m)
R : 곡률반경(m)
ψ : 차체/대차간 선회각(rad)

1. 서 론

철도는 타 교통수단과 달리 차륜이 레일 위를 주행하는 것을 특징으로 하는 교통수단이다. 궤도의 선형은 직선구간과 곡선구간의 조합으로 구성된다. 차량 주행성능 관점에서 직선구간은 차량의 고속주행 성능이 발휘될 수 있는 구간으로 차량의 한계성능과 관련된 최고속도 주행 시의 주행안정성이 요구된다. 반면, 일정 곡률반경으로

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주KAL호텔) 발표논문임
† Corresponding Author, hmhur@krri.re.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

구성된 곡선구간에서의 차량 주행은 원심력으로 인하여 차량의 주행속도를 저하시키게 된다.

또한 원심력으로 인하여 차륜플랜지가 레일과 접촉하게 되어 차륜 횡압이 증가하고 그로 인한 차륜과 레일의 마모 유발, 스킬 소음 발생 등의 문제를 초래하기도 한다.[1,2] 차량 설계관점에서 차량 성능과 관련된 인자를 들면 직선구간은 설계최고속도 대역에서의 사행동(hunting) 안정성을 들 수 있으며 곡선구간에서는 곡선주행속도 향상, 탈선 예방, 그리고 차륜, 레일 유지보수와 관련된 기술을 들 수 있다.

이와 관련하여 곡선구간에서의 주행성능 향상을 위한 틸팅열차나 조향대차와 같은 능동형 철도차량에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[3] 특히 능동제어기술을 적용하여 차량의 곡선주행성능을 향상시키기 위해서는 곡선구간의 곡률반경을 실시간으로 인식하는 것이 매우 중요하다. 기존의 곡률반경 인식은 궤도검측 전용차량을 이용하여 곡선정보를 측정, 분석하는 방법, GPS, RF방식의 지상자, 자이로센서, 가속도센서, 타코메터 등을 이용하여 곡선을 인식하는 방법 등이 활용되어 왔다.

그러나 궤도검측 전용차량은 고가의 전용계측장비와 분석장비가 장착되어 일반 철도차량에 적용하기에는 실용적이지 못하다는 단점이 있다. GPS를 이용하는 경우에는 터널과 같은 음영구간에서의 작동 불능, 기후의 영향으로 인하여 효용성이 저하하는 단점이 있다. 또한 RF방식 지상자 이용은 시설비용 부담이 크다는 단점이 있다. 그리고 자이로센서, 가속도센서, 타코메터 등을 혼용하는 방식은 실차와 실선로를 대상으로 하는 많은 시험과 보정작업이 필요하다는 점이 단점으로 작용하고 있다.[4] 따라서 차량 주행 중 실시간으로 현 주행 중 위치의 곡률반경을 추출할 수 있는 기술 확보의 필요성이 제기되고 있다.

따라서 본 논문에서는 차량 주행 중 곡선구간 곡률반경을 실시간으로 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 타당성 검토를 위하여 모사해석과 실선로 주행시험을 통한 타당성 검증 연구를 수행하였다.

2. 곡률반경 추정방법

2.1 기존의 방법

기존에 곡선구간 곡률반경을 가장 정확히 추출하는 방법으로 Fig. 1과 같이 versine v를 측정하여 기하학적인 관계로부터 곡률반경(R)을 추출하는 방법이 있다.[5,6] 주로 궤도 유지보수를 위하여 궤도 상태를 검측하는 궤도검측차에 적용하고 있는 방법이다. 곡률반경은 측정차량의 대차중심간 거리의 반(L)과 versine 값과의 관계에서 추출될 수 있다.

궤도검측차량의 중앙에서 레일과의 간격인 versine을 측정하기 위하여 레이저센서와 비전센서를 혼용하여 사용한다. 측정시스템이 고가라 궤도검측차와 같은 특수 목적 차량에만 적용되고 있다.

$$v = R - \sqrt{(R^2 - L^2)}$$

$$R = \frac{v^2 + L^2}{2v}$$

$$\fallingdotseq \frac{L^2}{2v}$$

2.2 곡률반경 추정방법 제안

제안한 곡률반경 추정방법은 곡선구간 통과 시 차량의 차체와 대차 간에 발생하는 상대변위를 이용한다.

Fig. 2(a)와 같이 직선구간을 주행할 경우에는 차체와 대차간에 상대각(θ_1, θ_2)이나 길이방향 상대변위(Δ_1, Δ_2)가 발생하지 않는다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이 곡선구간을 주행할 경우에는 차체에 대하여 대차는 곡선 궤도에 부합하고자 선회하게 되고 상대각과 상대변위가 발생하게 된다.

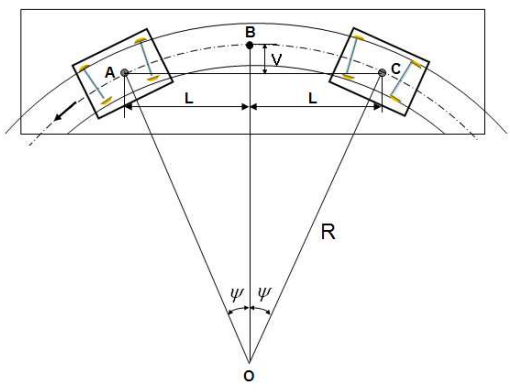
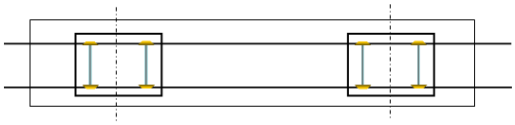
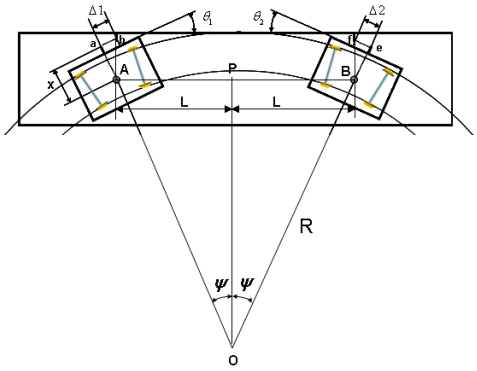


Fig. 1 Curvature measuring method by measuring versine parameter



(a) Tangent track



(b) Curve section

Fig. 2 Relative displacement and angle between body and bogie

철도차량의 동적 특성에 따라 전부, 후부대차에 발생하는 상대각이나 상대변위가 동일하게 발생하지는 않는다. 그러나 대차가 곡선중심으로 수직으로 위치하면 이론적으로는 전부, 후부의 상대각과 상대변위는 동일하게 된다. 곡선구간 통과 시 대차의 위치가 이러한 조건에 있다고 가정하면 아래와 같은 근사적인 기하학적 관계가 성립된다.

삼각형 OPA와 삼각형Aab는 합동이며 삼각형OPB와 삼각형Bef도 합동이므로 다음 식이 성립된다.

$$\theta_1 = \frac{\Delta_1}{x},\ \theta_2 = \frac{\Delta_2}{x},\ \Delta = \Delta_1 + \Delta_2,\ \psi = \frac{L}{R}$$

$$2\psi = \theta_1 + \theta_2$$

$$= \frac{\Delta_1}{x} + \frac{\Delta_2}{x} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{x}$$

$$= \frac{\Delta}{x} = \frac{2L}{R}$$

따라서 곡률반경 R은 다음과 같다.

$$R = \frac{2Lx}{\Delta}$$

즉 곡률반경은 고정값인 측정차량의 대차중심간 거리의 반(L), 상대변위 측정을 위한 대차 취부 센서와 대차중심과의 거리(x)와 차량 주행 중 측정값인 차체와 전, 후부대차간 종방향 상대변위의 합(Δ)과의 관계로부터 추정할 수 있다. 따라서 차량 주행 중에 차체와 전, 후부대차간 종방향 상대변위의 합(Δ)을 측정하면 실시간으로 곡선구간의 곡률반경 추정이 가능하다.

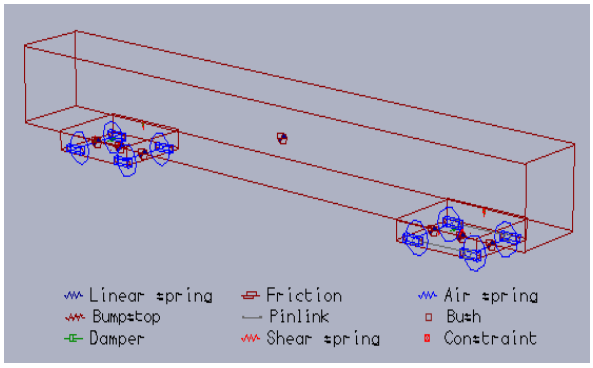


Fig. 3 Rolling-stock model

3. 곡률반경 추정 해석

제안한 곡률반경 추정방법의 이론적 타당성 검토를 위하여 철도차량 곡선구간 주행 시를 모사한 동역학 해석을 수행하였다.

차량 동역학 해석을 위하여 철도차량 전용 다물체 동역학 해석 프로그램인 영국 DELTA Rail (사)의 VAMPIRE(Vehicle dynAmics Modelling Package In a Railway Environment)를 사용하였다. 프로그램의 해석범위는 차량의 고유진동수 및 안정성해석, 주파수응답해석, 시간영역 해석, 원곡선에서의 주행특성 해석 등이 가능하며, 입력데이터로 궤도 선형, 차륜/레일 형상, 차량모델링 데이터, 외력 등이 적용된다.

차량모델은 전동차 부수객차 1량을 모델로 하였다. 차량모델의 대차중심간 거리의 반(L)은 6.9m 이며 상대변위 측정을 위한 대차 취부 센서와 대차중심과의 거리(x)는 1,000mm로 하였다. 곡선구간 곡률반경 추정을 위한 곡선구간 궤도모델은 궤도틀림이 없는 이상적인 곡선으로 모델링하였다. 곡률반경 200m에서 곡률반경 1,000m까지 100m 씩 증가시켜 가면서 곡선구간 주행 시의 모사해석을 수행하였다. Fig. 3은 VAMPIRE 차량 동역학 모델을 나타낸다.

Fig. 4는 각 각의 곡률반경에 따른 전부, 후부대차와 차체간에 발생하는 상대변위인 Δ_1과 Δ_2에 대한 해석결과를 나타낸다. 전부, 후부대차에서 발생하는 상대변위는 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 이는 이상적인 차량 운동조건에서 비롯된 결과로 볼 수 있다.

Table 1 Curvature estimation results from curving analysis

curve radius (m)	curvature(1/km)		error (%)
	target	estimated	
200	5.00	4.94	1.20
300	3.33	3.28	1.51
400	2.50	2.46	1.80
500	2.00	1.96	2.10
600	1.67	1.63	2.38
700	1.43	1.39	2.63
800	1.25	1.21	2.96
900	1.11	1.07	3.16
1000	1.00	0.96	3.53

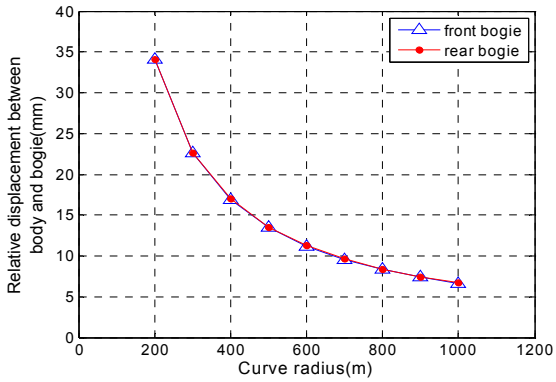


Fig. 4 Relative displacement from curving analysis

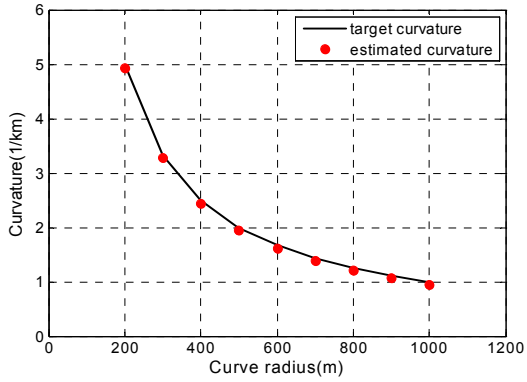


Fig. 5 Estimated curvature from curving analysis

Fig. 5와 Table 1은 해석한 상대변위 값을 제안한 곡률반경 추정식에 적용하여 구한 곡률반경 추정값을 곡률반경 역수의 형태인 curvature(1/km)로 표현한 결과이다. 곡률반경 200m의 곡선의 경우 목표 curvature는 5임에 비하여 추정된 curvature는 4.94로 해석되었고 오차는 1.2%로 목표치에 매우 근사한 결과를 보이고 있다. 한편 곡률반경이 커짐에 따라 오차가 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 그 크기가 3.53%에 불과하여 철도분야에서 궤도의 곡률반경을 추정함에는 매우 작은 오차로 볼 수 있다.

따라서 곡선구간 모사 해석을 통한 제안한 곡률반경 추정방법은 충분한 타당성을 내포하고 있으며, 실차에서도 차체와 대차간의 상대변위만 측정하면

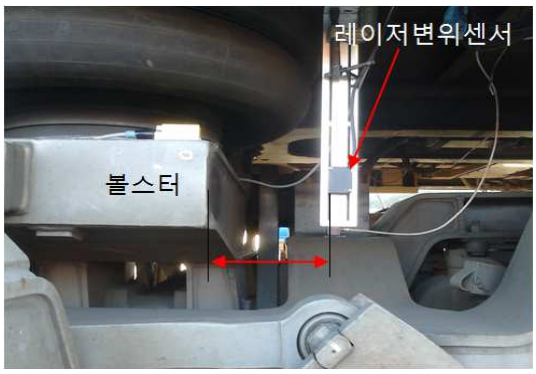


Fig. 6 Displacement sensor

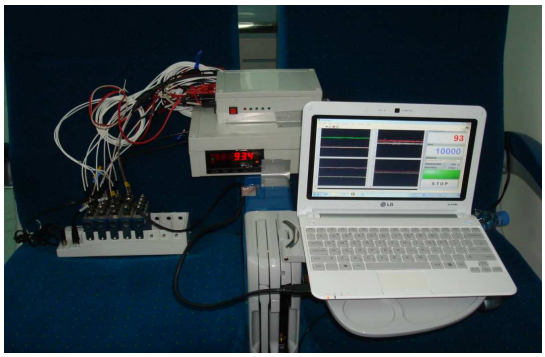


Fig. 7 Data acquisition system

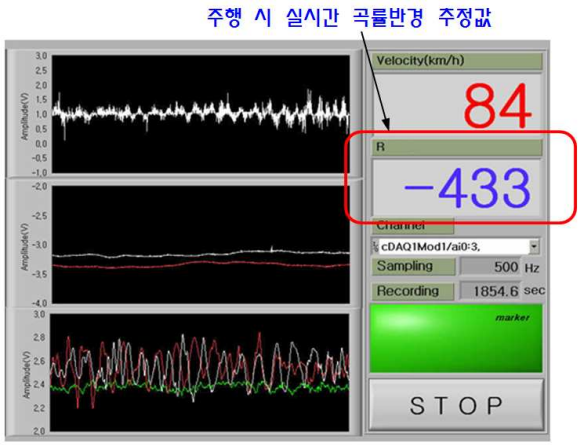


Fig. 8 Real time estimated curvature value

간단한 방법으로 곡률반경을 효율적으로 추정할 수 있다고 판단된다.

4. 실차 검증시험

제안한 곡률반경 추정방법의 타당성을 검증하기 위하여 실차량을 대상으로 실선로 주행시험을 수행하였다. 시험차량은 한국형틸팅열차 시제차량을 대상으로 하였고 시험선로는 기존선로 구간 중 곡선빈도가 높은 경부선 이원~김천 구간(192km ~ 252km)으로 하였다.

곡률반경 추정을 위한 입력값인 차체/대차간 상대변위 계측을 위하여 Fig. 6과 같이 차체와 대차 사이의 종방향 간격을 레이저변위센서를 이용하여 측정하였다. 레이저변위센서의 측정범위는 300±200mm이며 분해능은 300μm로서 전부, 후부대차에 설치하여 차체와 대차 간에 발생하는 상대변위를 계측하였다. 한편 곡률반경은 저주파 성분임으로 곡률반경 실시간 추정을 위하여 측정한 변위신호에 포함되어 있는 노이즈 성분과 고주파 성분은 차단주파수 2Hz인 Low pass filter를 사용하여 필터링하였다.

또한 추정식의 입력인자인 시험차량의 대차간 거리의 반(L)은 7.95m이며, 상대변위 측정을 위한 대차 취부 센서와 대차중심과의 거리(x)는 950mm이다. Fig. 7과 Fig. 8은 계측 신호를 모니터링하고 저장하는 Data acquisition system과 실시간 곡률반경 추정결과를 현시하는 분석프로그램 화면을 나타낸다.

Fig. 9는 시험구간에서 측정한 차체와 전부, 후부대차간 종방향 상대변위를 측정한 데이터를 나타낸다. 곡선의 방향, 즉 좌향곡선 혹은 우향곡선에 따라 상대변위의 방향이 바뀌어서 나타나고 있다, 또한 전부, 후부대차의 상대변위의 크기가 이론 해석과는 달리 동일하게 나타나지는 않고 있다. 이는 실차의 차체와 대차간의 현가장치의 공차, 허용 유격 등이 반영된 점과 궤도틀림, 궤도의 유지보수상태 등과 같은 궤도의 오차가 반영된 점에 기인한 결과로 사료된다. Fig. 10은 220km ~ 225km 구간의 상대변위 데이터이다. 곡률반경이 작아짐에 따라 이론해석과 같이 상대변위가 크게 발생하고 있다.

측정한 상대변위 데이터를 제안한 곡률반경 추정식에 적용하여 곡률반경 추정값을 산출하였다. 전부, 후부대차에서 측정한 상대변위데이터와 곡률반경 추정결과와의 오차 분석을 위하여 Table 2와 같이 3가지 경우로 구분하였다. Case 1은 차체와 전부대차간의 상대변위 데이터를 적용하여 곡률반경 추정값을 산출한다. Case 2는 차체와 후부대차간 상대변위 데이터를 적용하여 곡률반경 추정값을 산출한다. 그리고 Case 3은 차체와 전부, 후부대차간 상대변위 데이터를 모두 적용하여 곡률반경을 추정하는 경우이다.

그리고 곡률반경 추정 시험결과의 타당성을 검토하기 위하여 궤도 유지보수를 위하여 궤도의 상태를 전문적으로 검측하는 궤도검측 전용차량(EM-120)에서 측정한 곡률반경 추출 데이터와 비교하였다.[5,6] 궤도검측차의 곡률반경 측정방법은 전절에서 설명한 바와 같이 versine 측정방법을 이용하여 곡률반경을 추출하는 방법이 적용되고 있다.

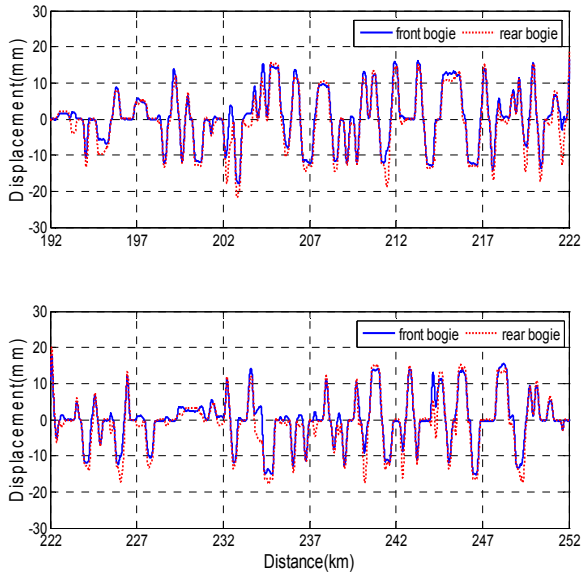


Fig. 9 Measured relative displacement data

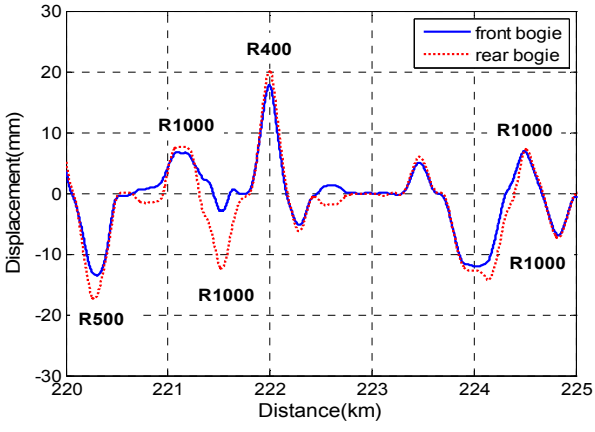


Fig. 10 Relative displacement(220km ~ 225km)

Table 2 Cases for curvature estimation

Case	condition	approximation formula
1	apply displacement (Δ_1) of front bogie	$R \fallingdotseq \frac{Lx}{\Delta_1}$
2	apply displacement (Δ_2) of rear bogie	$R \fallingdotseq \frac{Lx}{\Delta_2}$
3	apply mean displacement ($\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$) of front and rear bogie	$R \fallingdotseq \frac{2Lx}{\Delta}$

Fig. 11 ~ Fig. 13은 각 각의 경우에 대하여 산출한 곡률반경 추정결과를 궤도검측차에서 측정한 곡률반경 데이터와 비교한 결과이다. 분석결과 전 시험구간에 걸쳐 궤도검측데이터 곡률반경과 근사하게 부합하는 결과를 보이고 있다.

Fig. 14와 Table 3은 시험구간에 분포하고 있는 각 각의 곡률반경 그룹별로 곡률반경 추정 결과와 궤도검측데이터 곡률반경 데이터 간의 오차 평균을 분석한 결과이다. Case 1의 경우 시험구간 전체 곡선구간에 대한 오차 평균은 12.2%였으며 Case 2의 경우에는 11.6%였다. 그리고 Case 3의 경우에는 8.4%로 Case 1, Case 2에 비하여 오차가 작게 발생하였다. 즉 곡률반경 추정을 위하여 제안한 근사식을 적용할 때, 전, 후부대차에서 발생하는 편측 상대변위를 적용한 Case 1, Case 2의 경우에 비하여 전부, 후부대차에 발생하는 상대변위를 평균적 개념으로 모두 적용한 Case 3의 경우가 궤도검측차에서 측정한 곡률반경에 부합한 결과를 보이고 있음을 나타낸다.

그리고 모든 경우에서 곡률반경 600이하의 급곡선인 400m 곡선, 500m 곡선, 600m 곡선에서의 오차가 곡률반경 700m 이상의 곡선에서의 오차에 비하여 현저하게 저감된 경향을 보이고 있다. 즉 Case 3의 경우 400m 곡선에서 6%, 500m 곡선에서 4.9%, 600m 곡선에서 7.1%의 오차를 보이고 있다. 이에 비하여 곡률반경이 큰 700m, 800m, 900m 곡선에서의 오차는 상대적으로 큰 오차를 보이고 있다. 이는 곡률반경이 크면 차체/대차간 상대변위가 상대적으로 작게 발생 하게 되고 따라서 내재된 차량과 궤도의 오차의 영향이 상대적으로 커지게 됨에 기인한 결과로 추정된다. 이러한 차량과 궤도의 오차는 곡률반경이 작은 급곡선에서는 차체와 대차간 상대변위가 커져 그 영향이 상대적으로 작아지는 것으로 분석

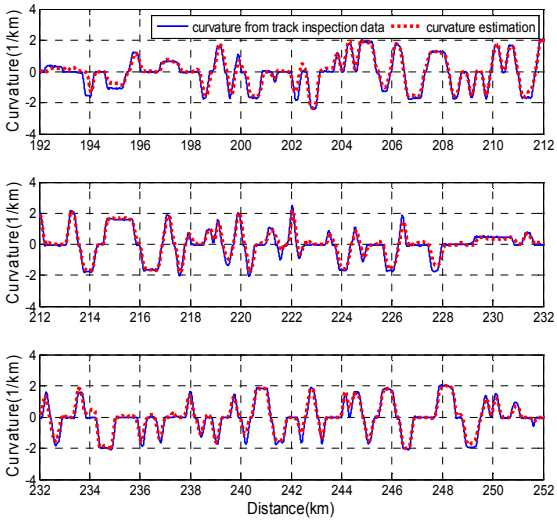


Fig. 11 Result of the estimated curvature(CASE 1)

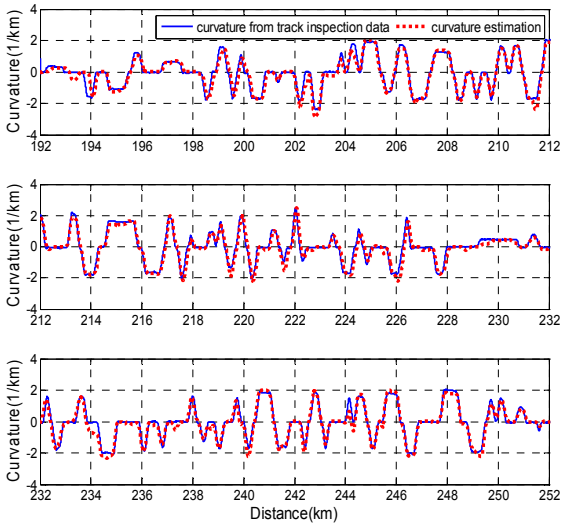


Fig. 12 Result of the estimated curvature(CASE 2)

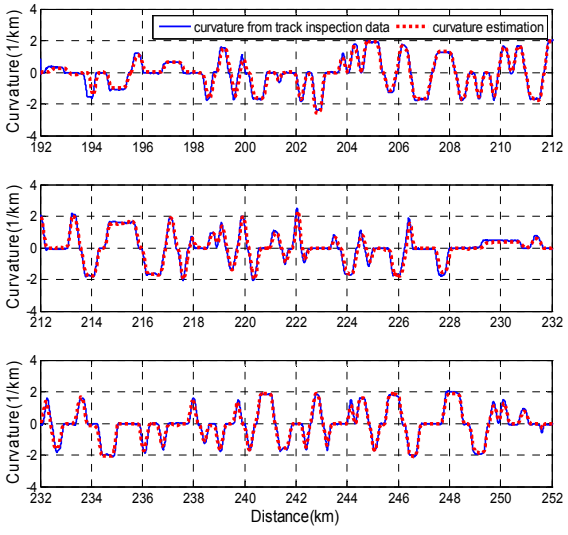


Fig. 13 Result of the estimated curvature(CASE 3)

Table 3 Error of the curvature estimation(%)

curve radius(m)	number of curve	case1	case2	case3
400	2	6.4	9.7	6.0
500	18	8.3	7.7	4.9
600	31	12.3	10.4	7.1
700	5	16.6	26.2	14.2
800	5	10.8	14.0	11.9
900	5	24.9	17.3	20.0
average		12.2	11.6	8.4

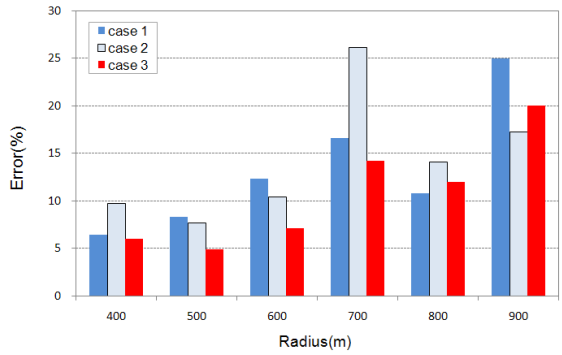


Fig. 14 Error of the curvature estimation

된다.

따라서 본 논문에서 제안한 차량 주행 중 차체와 대차간 종방향 상대변위 측정을 통하여 곡선구간 곡률반경을 실시간으로 추정할 수 있는 방법은 충분한 타당성을 확보하고 있다고 평가된다. 특히 곡선구간 주행성능 향상을 목적으로 개발되는 능동형 차량에 적용할 경우, 제어의 주 대상이 되는 곡률반경 600m 이하의 급곡선 구간에서는 매우 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

철도차량 주행 중 곡선구간 곡률반경을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 모사해석과 실선로 실차시험을 수행하여 타당성을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 주행 중 차체와 대차간에 발생하는 상대변위를 이용한 곡률반경 추정 결과는 궤도검측차에서 측정한 곡률반경 데이터와 부합하는 결과를 보였다.
- 궤도검측차 곡률반경 데이터와 비교한 오차분석 결과, 전 후부 대차에서 발생하는 상대변위를 모두 적용한 Case 3의 경우 오차가 가장 작게 발생하여 곡률반경 추정에 효율적이다.
- 곡률반경이 작아짐에 따라 추정결과의 오차가 작아지는 결과를 보여 곡선구간 곡률반경이 작은 곡률반경 600m 이하의 급곡선부에 대한 곡률반경 추정 시 매우 효용성이 클 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서 제안한 곡률반경 추정방법은 향후 곡선구간 주행성능 향상을 위한 능동형 철도차량 개발 분야에서 실시간 곡선 정보 인식을 위한 요소기술로 효율적으로 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) Hur, H. M., Lee, C. W., Kwon, S. T. and Yun, C. H., 2003, “Analysis on the Wear Patterns of Wheel Profiles for Conventional Line,” *Proc. of Korean Society for Railway Spring Conference*, pp. 651~655.

(2) You, W. H., Hur, H. M., Ko, H. I., Park, H. H. and Choi, Y. W., 2009, "A Study on Relationship Between Curving Noise and Wheel Wear in Seoul Subway System," *Trans. of Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 85~93.

(3) Hur, H. M., Park, J. H. and You, W. H., 2011, "Trend of the Active Technology for Railway Rolling-Stock," *Proc. of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference*, pp. 1559~1560.

(4) Ko, T. W., Lee, D. S., 2011, "Study for Prediction of Ride Comfort on the Curve Track by Predictive Curve Detection," *Proc. of Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp. 69~74.

(5) Suh, S. B., 2001, Track Construction, Ulgoaal, pp. 329~330.

(6) Suh, S. B., 2000, Mechanized Track Maintenance, Ulgoaal, pp. 181~188.