

고속열차의 저해상도 타코미터를 이용한 정확한 속도 추정에 관한 연구

An Accurate Velocity Estimation using Low Resolution Tachometer of High-Speed Trains

이 재 호* · 김 성 진* · 박 성 수*
(Jae-Ho Lee · Seong Jin Kim · Sungsoo Park)

Abstract - Reliable velocity estimation technology for trains is one of technologies used to operate trains safely and effectively. Various sensors such as tachometers, doppler radars, and global positioning systems are used to estimate velocity of a train. Tachometer is widely used to estimate velocity of a trains due to its simplicity, small volume, cost-effectiveness, continuously measurement at high speed, and robustness against noise. Accuracy in the velocity calculation using a tachometer depends on quantization error, measurement error of wheel radius or diameter, and tachometer's imperfection from manufacturing or installation process. In this paper, we present an accurate velocity estimation method using a low-resolution tachometer, which is commonly installed on a high-speed train. Baseline estimation method is proposed to accurately calculate the velocity of the high-speed train from tachometer's pulses. HEMU-430x test train is used for the experiment and verification of the proposed method. Experimental results with several routes show that the proposed method is more accurate than a conventional method.

Key Words : Tachometer, Velocity estimation, High-speed train, Baseline estimation

1. 서 론

열차의 위치 및 속도를 신뢰성 있게 검지하는 기술은 안전하면서도 효과적인 열차 운영을 위한 기본 요건이며, 열차의 속도를 검지 또는 추정하기 위해서는 타코미터, 도플러 레이더, GPS(global positioning system) 등과 같은 여러 센서들이 사용되고 있으나 그 중에서도 가장 널리 사용되는 것은 타코미터이다 [1, 2]. 일반적인 산업분야에서 타코미터는 모터를 비롯하여 다른 기계장치의 축 또는 디스크의 회전 속도를 측정할 수 있는 센서로서 철도분야에서는 열차 바퀴의 회전속도를 측정하여 열차의 속도를 계산하는데 적용하고 있다. 타코미터의 장점은 간단하고 부피가 작으며 다른 속도 검지 센서에 비해 비용대비 효율적일 뿐 아니라 또한 고속으로 연속적인 측정이 가능하고 노이즈에 강인하다는 것이다 [2]. 반면에 열차 바퀴의 회전에 의존하여 속도를 계산하기 때문에 바퀴와 레일사이의 작은 마찰력에 의해 주변 환경에 따라 열차의 가속 또는 감속시 미끄러지는 경우가 발생할 수 있다. 이로 인해 타코미터에 의해 계산된 속도는 실제 열차 속도에 비교할 경우 오차가 발생할 수 있다. 이와 같은 단점에도 불구하고 열차의 미끄러짐을 검지하거나 방지하기 위한 기술들을 활용하여 열차 운행 중에 속도에 대해 정확하고 신뢰할만한 속도

정보 제공이 가능하다 [3]. 이로 인해 타코미터는 철도차량의 추진과 제동에 사용되거나 열차방호장치를 위한 속도센서로 폭넓게 사용되고 있다 [1, 3, 4].

철도차량에서 사용되는 타코미터는 주로 증분형 엔코더 (incremental encoder) 형태로 홀센서(hall effect sensor) 또는 광학식 엔코더(optical encoder)가 사용된다. 두 방법 모두 열차가 움직이면서 열차 한 바퀴 회전당 일정한 펄스 수와 일정한 전압 출력을 갖는 구형파를 발생시키며, 발생된 구형파의 주파수는 바퀴의 회전속도에 비례한다. 그리고 타코미터를 이용하여 계산한 속도의 정확도는 양자화(quantization) 오차, 열차 바퀴의 지름 측정오차 그리고 타코미터의 제작 및 설치과정에서 발생할 수 있는 불완전성(imperfection) 등에 의해 결정되게 된다.

타코미터의 출력을 이용하여 얻게 되는 속도의 정확도를 개선하기 위해 다양한 알고리즘이 사용될 수 있는데 모델링에 기반을 둔 상태변수 추정 방법과 신호처리 방법 두 가지로 나눌 수 있다 [2]. 모델링에 기반한 접근방법은 확장 칼만(Kalman) 필터와 같은 관측기를 이용하여 상태변수를 추정이 가능하나 [2], 사용된 매개변수에 대한 불확실성으로 인해 모델링이 완벽하지 않으면 추정된 상태변수는 발산할 수 있다는 단점이 있다. 이와 같은 경우에는 모델링에 기반을 두지 않는 신호처리 방법이 대안이 될 수 있다.

신호처리 방법은 타코미터가 장착된 대상 시스템의 정보 또는 모델링 없이 측정된 데이터를 이용하는 방법이다. 일반적으로 고속일 경우 유한 차분법(finite differential method)에 의해 고정된 샘플링 시간(sampling time) 동안 발생한 펄스의 수에 비례하여 속도를 계산하거나, 저속일 경우 주어진 펄스 사이의 시간 간

† Corresponding Author : Train control & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea.
E-mail: prolee@krrri.re.kr

* Train control & Communication Research Team, Korea Railroad Research Institute, Korea.

Received: October 13, 2017; Accepted: December 12, 2017

격을 측정하여 속도를 계산한다. 또한 간단하게 최근 측정된 펄스 카운터 측정값의 이동평균 방법을 사용하거나[2, 4], polynomial 또는 cubic spline과 같은 정칙함수(regular function)에 의한 보간법(interpolation)도 사용된다[6]. 이와 같은 경우에는 이동평균을 위한 적절한 샘플의 개수와 적절한 정칙함수를 찾아야 하는 문제가 발생한다.

본 논문에서는 고속열차에 일반적으로 장착되는 저해상도 증분형 타코미터의 출력신호를 이용한 정확한 열차속도 추정방법에 대해 제안하였으며, 그 검증방법으로 타코미터 펄스 카운터 측정값의 추세를 구하기 위해 사용된 추세선 추정 알고리즘에 대해 소개하고, 제안한 알고리즘의 실험 및 검증을 위해 사용된 시험 열차(HEMU-430X)에서 속도 추정 시험을 수행하여 결과분석으로 수행하였다.

2. 열차 속도 계산 알고리즘

2.1 타코미터를 이용한 열차 속도 계산

철도 선로변 시설물들의 상태를 검측하는 궤도검측차의 경우에는 위치와 속도 정보를 정확하게 얻기 위해 고해상도의 타코미터가 장착되어 있다. EM-30 검측차의 경우 바퀴 1회전당 1,000 펄스[7], EM-140k 검측차의 경우 10,000 펄스가[8] 장착되어 있는 반면, 일반 고속열차의 경우 상대적으로 낮은 해상도(KTX-산천의 경우 동력차 51펄스, 객차 66펄스)의 타코미터가 장착되어 있다. 이와 같이 저해상도의 타코미터가 장착된 고속열차의 경우 일반적인 속도검지 방법에 의한 속도의 정확도는 한계가 있기 마련이다.

일반적으로 타코미터의 구형파를 이용하여 주어진 샘플링 주기 동안 발생한 펄스의 수 또는 주파수를 통해 식 (1)과 같이 열차의 속도(v_{tacho})를 계산할 수 있다.

$$v_{tacho} = \frac{2\pi N_s}{N_{pr} T_s} r_w \quad (1)$$

여기서, N_{pr} 는 바퀴 1회전당 발생하는 펄스의 개수, T_s 는 샘플링 주기, N_s 는 샘플링 시간동안 발생한 펄스의 수, r_w 는 타코미터가 장착된 바퀴의 반지름이다. 양자화 오차 ΔQ_s 는 주어진 시간동안 발생한 펄스 대비 계산된 속도의 비율로 식 (2)와 같이 정의될 수 있다.

$$\Delta Q_s = \frac{v_{tacho}}{N_s} = \frac{2\pi r_w}{N_{pr} T_s} \quad (2)$$

식 (2)에서 보는 바와 같이 양자화 오차는 1회전당 발생하는 펄스의 개수가 적은 저해상도 타코미터를 장착할 경우에 커지고, 샘플링 주기가 작을수록 커지게 된다.

열차의 속도를 구하기 위한 샘플링 주기를 $T_s=5ms, 20ms, 50ms$ 초로 하여 속도를 계산한 결과는 그림 1과 같다. 5ms의 샘플링 주기를 기준으로 펄스 카운터를 구현하였고 그 외 샘플링

시간은 최소 샘플링 시간을 기준으로 누적하여 속도를 계산하였다. 저해상도 타코미터가 장착된 열차의 속도를 계산하기 위해 샘플링 시간이 작은 경우에는 양자화 오차가 그림 1과 같이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 줄이기 위해 샘플링 주기가 길어지면 양자화 오차는 줄일 수 있으나 갑작스런 열차의 속도변화에 대해서는 오차가 커질 수 있다.

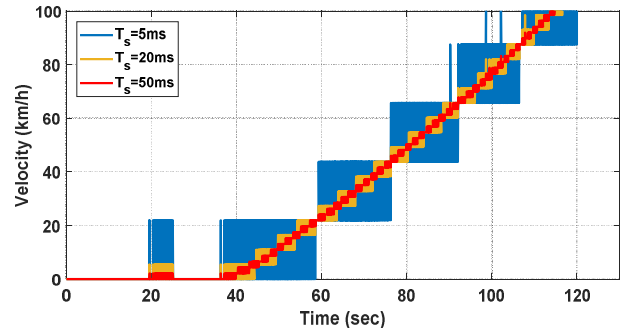


그림 1 샘플링 주기에 따라 계산한 타코미터 속도

Fig. 1 The tachometer velocity calculated based on the sampling period ($T_s=5ms, 20ms, 50ms$)

2.2 BEADS 알고리즘 기반의 속도 계산

BEADS(baseline estimation and denoising using sparsity) 알고리즘은 측정된 신호의 추세선(baseline) 보정과 잡음 저감을 위한 신호처리 알고리즘이다[9]. 이 알고리즘은 측정된 신호를 추세선과 잡음 그리고 첨두치(peak)로 구분한다. 추세선은 저주파대역 신호로, 잡음은 고주파대역 신호로 모델링하고 첨두치는 희소(sparse) 미분치를 갖는 희소 신호, 즉 해당 신호 대부분이 영의 값(zero)을 갖게 되는 신호로 모델링한다. 제안한 알고리즘은 첨두치의 영향을 줄이기 위한 비대칭 벌칙함수(penalty function)를 포함하며, 3가지 모델을 기반으로 하는 컨벡스(convex) 문제로 수식화한 이후에 반복적으로 계산하여 수렴된 최적 해를 구한다. 이 알고리즘의 장점은 추세선의 추출이 용이하고 초기값에 상관없이 빠르게 수렴하고 메모리를 적게 사용하며, 또한 알고리즘을 통해 얻어지는 추세선은 정칙함수에 의해 표현되지 않으므로 복잡도와 상관없이 임의의 추세선을 갖는 신호에 대해서도 적용할 수 있다는 것이다.

BEADS 알고리즘은 N 개의 측정치를 갖는 신호 y 를 추세선 b , 잡음 e 그리고 첨두치 c 로 식 (3)과 같이 BEADS 매개변수에 의해 분리될 수 있다.

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_N] = b + e + c \quad (3)$$

BEADS 매개변수는 추세선과 그 외의 신호를 구분하는 차단주파수(cutoff frequency), 음수의 값에 벌칙을 부여하는 비대칭 비율(asymmetry ratio), 조정 매개변수(regularization parameters)로 구성된다. 이를 통해 계산된 추세선과 첨두치, 그리고 각 반복에 따른 비용함수 값을 얻을 수 있다. 추세선은 저주파대역 신호

이므로 측정된 신호 y 에서 계산된 침두치 \hat{c} 와 고역통과필터 (high pass filter) H 를 이용하여 식 (4)에 의해 얻을 수 있다.

$$\hat{b} = y - \hat{c} - \hat{e} = y - \hat{c} - H(y - \hat{c}) \quad (4)$$

상세 내용은 [9]에서 그리고 알고리즘의 MATLAB 구현은 [10]에서 찾아볼 수 있으며, 정확한 추세선을 구하기 위해 적절한 매개변수를 정하는 방법은 [11]에서 또는 반복적인 수행에 의해 찾을 수 있다.

본 논문에서는 샘플링 주기가 $T_s=5ms$ 인 타코미터 펄스 카운터 값을 측정된 신호 y 로 하여 BEADS 알고리즘을 적용하였다. 그 결과 추세선 \hat{b} 는 열차의 속도가 되고, 침두치 \hat{c} 는 펄스 카운터 측정값의 침두치 그리고 \hat{e} 는 양자화 오차를 포함한 잡음이 된다. 따라서 BEADS 알고리즘을 통해 낮은 해상도를 갖은 고속열차의 속도를 정확하게 계산할 수 있다.

3. 속도 계산 시험결과

3.1 시험차량

본 논문에서 제안한 알고리즘의 실험 및 검증은 한국철도기술 연구원에서 개발한 차세대 고속열차인 HEMU-430X를 이용하여 수행하였다. HEMU-430X는 동력분산식 고속열차로 6량(제어객차 1량, 제어동력차 1량, 동력객차 4량) 1편성으로 구성되어 있으며 양방향 운행이 가능하고, 시험주행 최고속도는 421.4 km/h이다.

시험에 사용된 타코미터는 동력객차 M2에 있는 6번 대차 후 위 우측 차축의 타코미터로서 바퀴 1회전당 88펄스를 발생시키며 해당 바퀴의 반지름은 $r_w=0.426$ m로 측정되었다. 주어진 샘플링 주기 동안 발생한 타코미터의 펄스 수를 세는 펄스 카운터 값을 이용하여 기존 알고리즘인 식 (1)에 의해 $T_s=5$ ms와 100 ms일 때 속도를 계산하였고, 또한 BEADS 알고리즘을 이용하여 속도를 계산하였다. 각각의 계산된 속도 값의 정확도를 평가하기 위해 GPS 속도 정보를 이용하였다. GPS 속도 정보는 GPS 신호가 음영지역 이거나 불안정할 때를 제외하면 열차가 고속으로 개활지에서 이동시 안정적이면서도 연속적으로 제공 받을 수 있다. 타코미터가 설치된 동력객차 M2의 상부에 설치된 GPS 안테나와 객차 내부에 설치된 GPS 수신기를 이용하여 GPS 속도 정보를 100ms의 주기로 획득하였다. 타코미터를 이용한 속도 계산과

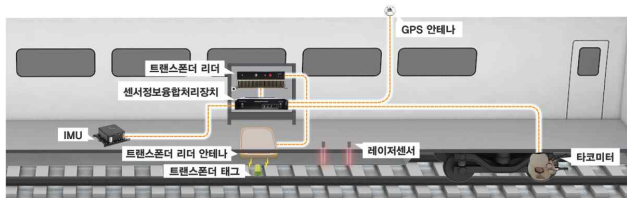


그림 2 시험열차 M2에 설치된 센서 및 센서정보 융합 처리장치
Fig. 2 Sensors and sensor information fusion processor installed in M2 car

GPS 속도 정보를 획득하기 위해 센서정보 융합처리장치를 그림 2와 같이 구현하였고, 두 정보를 GPS 절대시각에 동기화하기 위해 GPS 수신기의 PPS(pulse per second) 신호를 이용하여 타코미터 펄스 카운터를 구현하였다.

3.2 시험결과

본 논문에서는 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 호남 고속선 정읍역부터 익산역까지 약 42.3 km 거리를 시험 열차로 표 1과 같이 운행을 하였다. 실험 중인 구간은 400 km/h급 고속철도 인프라 테스트-베드 구간으로 고속운행을 위한 인프라가 설치된 구간이며 실험 운행중 최고속도 345.6 km/h를 기록하였다. 대부분의 구간이 개활지이며 GPS 신호가 음영지역인 터널은 3개소가 있으며 길이는 합하여 1.1 km로 전체구간의 2%를 차지하고 상부 구조물이 있는 교량 2개소와 고가다리가 7개소가 있으나 구간 거리에 비해 매우 짧은 구간을 차지하고 있다.

표 1 실험운행 경로 요약

Table 1 Summary of experimental travel routes

	운행경로 1	운행경로 2	운행경로 3
운행경로	정읍⇒익산	익산⇒정읍	정읍⇒익산
운행시간	720초	800초	790초
운행최고속도	323.4km/h	298.5km/h	345.6km/h

표 1과 같이 각각의 실험운행 경로에 따라 $T_s=5ms$ 와 100ms 일 때 기존 알고리즘으로 계산한 열차속도와 BEADS 알고리즘에 의해 계산한 열차의 속도, GPS 속도 정보는 아래 그림에서 나타내었다. 운행경로 1은 정읍역 통과시점을 기준($t=0$)으로 열차의 속도를 시간에 따라 운행이 종료되는 익산역 도착할 때까지 그림 3과 같이 표시하였고 정읍역 통과 시에는 285.7km/h, 120초 근처에서 최고속도는 323.4 km/h를 기록하였다. 600초 이후부터는 익산시내로 진입하게 되어 주변 건물에 의해 GPS 속도 정보를 지속적으로 기존 정보로 활용하지 못하였으나 그 외 구간에서는 기존 속도로 충분히 활용하였다.

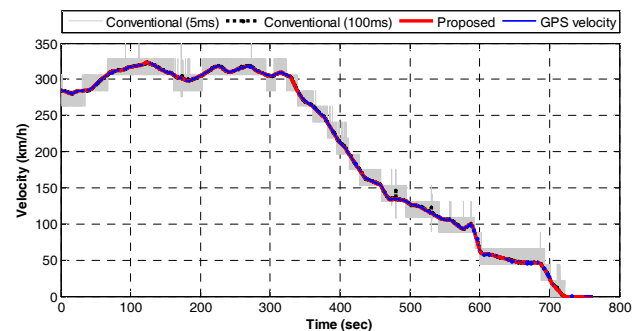


그림 3 운행경로 1의 열차속도 비교
Fig. 3 Comparison of train speed in travel route 1

그림 4는 그림 3의 $t=440$ 초와 $t=540$ 초 사이를 확대한 것으로 기존 알고리즘인 식 (2)를 이용하여 계산한 열차속도는 GPS 속도와 비교할 경우 480초와 530초 근처에서 첨두치를 볼 수 있다. 그러나 BEADS를 이용한 알고리즘은 GPS 속도 정보와 거의 동일한 결과를 보이며, $T_s=100$ ms일 때의 기존 알고리즘 보다 정확한 결과를 나타낸 다는 것을 확인할 수 있다.

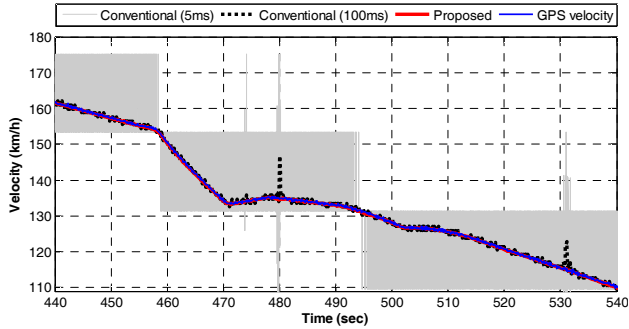


그림 4 운행경로 1의 열차속도 비교(440초와 540초 사이)
Fig. 4 Comparison of train speed in travel route 1 (between 440 and 540seconds)

운행경로 2는 운행경로 1의 운행종료 지점에서 주행방향을 반대로 변경하였다. 익산역 출발시점을 $t=0$ 으로 하여 정읍역을 지날 때까지 시간에 따라 타코미터를 이용하여 제안한 알고리즘과 기존 알고리즘으로 계산한 속도와 GPS 속도 정보를 그림 5와 같이 표시하였다.

100초 근처에서 열차에 동력을 공급하는 가선에 전원이 공급되지 않는 절연구간을 통과하면서 속도가 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 그 후 열차에 동력이 공급되면서 가속하여 690초 근처에서 최고속도는 298.5km/h를 기록하였고 정읍역 통과 시에는 253.1km/h를 기록하였다. 240초와 590초 근처에서 GPS 속도와 비교시 기존 알고리즘의 첨두치를 발견할 수 있다.

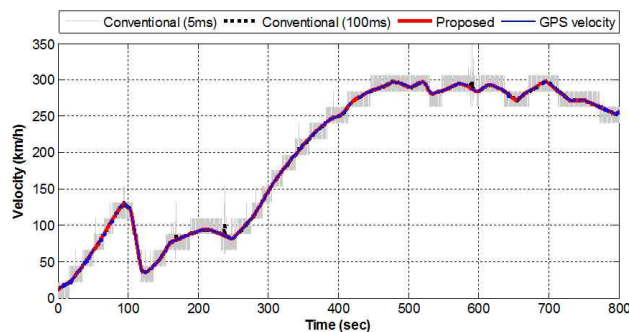


그림 5 운행경로 2의 열차속도 비교
Fig. 5 Comparison of train speed in travel route 2

운행경로 3은 정읍역에서 24km 떨어진 모암 연동기계실 근처를 출발하여 운행경로 1과 동일하게 정읍역 통과시점을 $t=0$ 으로 하여 익산역을 통과할 때까지 시간에 따라 타코미터를 이용하여 계산한 두 알고리즘의 열차 속도와 GPS 속도 정보를 그림 6과 같이 표시하였다.

운행중 최고속도는 300초 근처에서 345.6 km/h를 기록하였고 정읍역 통과시 288.2km/h, 익산역 통과시 118.9km/h를 기록하였다. 기존 알고리즘으로 속도를 계산할 경우 165초, 460초, 510초 그리고 755초 근처에서 GPS 속도와 비교시 첨두치를 발견할 수 있다.

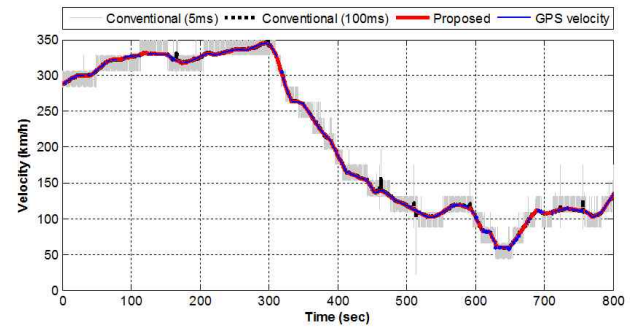


그림 6 운행경로 3의 열차속도 비교
Fig. 6 Comparison of train speed in travel route 3

표 2 실험운행 경로 요약

Table 2 RMSE value and maximum speed error for existing algorithm($T_s=0.1$) & BEADS algorithms

	BEADS 알고리즘		기존 알고리즘	
	RMSE (km/h)	Max. error (km/h)	RMSE (km/h)	Max. error (km/h)
운행경로	0.248	2.03	0.611	12.22
운행시간	0.242	2.12	0.614	14.21
운행최고속도	0.267	4.71	0.688	16.71

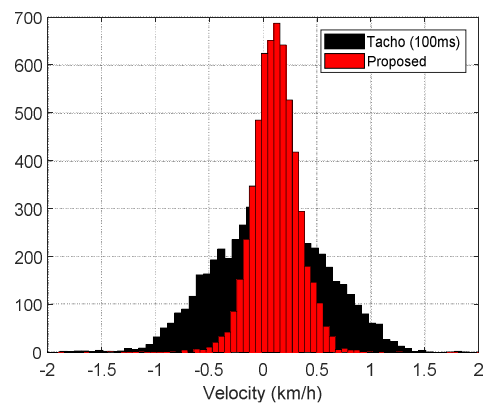


그림 7 운행경로 1의 오차 히스토그램
Fig. 7 Error histogram of travel route 1

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 상세히 비교하기 위해 표 1의 경로에 대하여 기존 속도인 GPS 속도 정보대비 $T_s=$

100ms일 경우 기존 알고리즘에 의한 열차 속도와 BEADS 알고리즘을 이용한 열차 속도의 RMSE(root mean squared error)와 최대 에러 값은 표 2와 같다. 또한 각 경로에 대하여 기준 속도(GPS 속도) 대비 기존 알고리즘($T_s=100ms$)과 BEADS 알고리즘을 이용한 속도 오차에 대하여 히스토그램을 그림 7~9와 같이 나타내었다. 여기에서 속도 정보의 정확성을 위해 사용된 위성의 개수가 6개 이상 이며 동시에 GPS 수평 위치오차가 3.5m이하 일 때 GPS 속도 정보를 성능평가의 기준으로 사용하였다. 표 2와 그림 7~9에서 보는 바와 같이 BEADS를 이용한 속도 추정 알고리즘이 기존 알고리즘 보다 정확하다는 것을 알 수 있다.

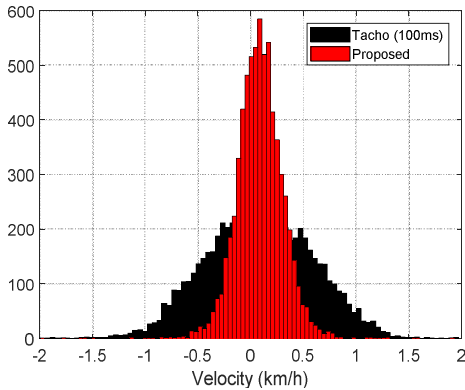


그림 8 운행경로 2의 오차 히스토그램
Fig. 8 Error histogram of travel route 2

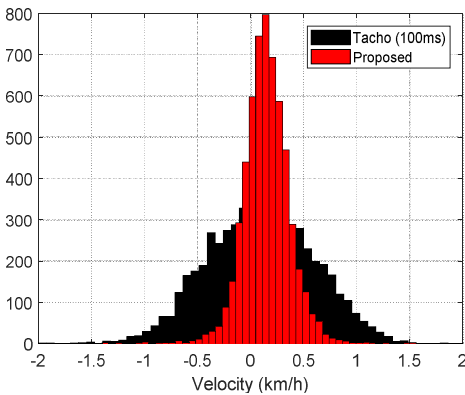


그림 9 운행경로 3의 오차 히스토그램
Fig. 9 Error histogram of travel route 3

또한 열차가 절연구간 통과시 주차단기를 차단 취급하거나, 통과 후 투입 취급하게 될 때 고전력 전자기 간섭이 전장장치에 발생할 수 있다. 타코미터의 불완전성으로 인해 위와 같은 전자기 간섭은 타코미터의 전원 또는 출력 신호 라인에 영향을 줄 수 있다. 이로 인해 기존의 방법으로 열차의 속도를 계산할 경우 그림 10과 같은 매우 높은 첨두치가 발생할 수 있고, 이와 같은 열차속도의 비정상적인 첨두치는 열차운행에 장애가 될 수 있다. 그림 10은 운행경로 3에서 익산역을 통과하여 오송역으로 운행

을 계속 진행하는 일부 시간에 대하여 타코미터를 이용하여 계산한 두 알고리즘의 열차 속도와 GPS 속도 정보를 표시한 것이다. 1,380초, 1,580초, 1,830초 그리고 2,100초 근처에서 절연구간을 통과한 것을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 알고리즘은 타코미터의 불완전성에도 불구하고 GPS 속도정보와 유사한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다.

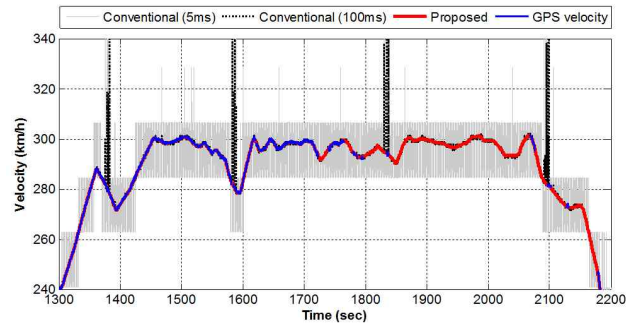


그림 10 전자기 간섭에 의한 기존 및 제안 알고리즘 열차 속도
Fig. 10 Train speed for existing and proposed algorithm due to electromagnetic interference

3. 결 론

본 논문에서는 고속열차에 일반적으로 설치되는 저해상도 타코미터의 구형과 신호를 이용한 정확한 속도 추정 알고리즘에 대해 검토하였다. 이를 위해 타코미터의 구형과 신호로부터 주어진 샘플링 시간동안 발생한 펄스의 수를 세는 펄스 카운터를 구현하였고, 펄스 카운터 측정값의 정확한 추세를 구하기 위해서 본 논문에서는 BEADS 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 실험을 위해 시험열차로 HEMU-430X을 이용하였으며, 계산된 열차속도의 정확성을 평가하기 위한 기준속도는 개활지에서 가용성 및 정확성이 높은 GPS 속도 정보가 사용되었다. 시험에 사용된 타코미터와 GPS 안테나는 차량 M2에 장착되어 시험을 수행하였다. 호남고속선 정읍역부터 익산역까지 약 42.3km를 최고속도 345km/h로 운행하며, 운행경로 3개에 대하여 제안한 알고리즘과 기존 알고리즘의 정확도를 비교하였다. 속도 추정치의 RMSE 값과 최대 에러 값을 비교해 볼 때 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘 보다 정확하다는 것을 알 수 있다. 향후 이와 같은 결과를 활용하여 300km/h 이상의 고속으로 주행하면서 선로 주변 시설물들의 상태를 검측하는 고속종합검측차의 위치와 속도를 정확하게 추정하기 위해 다중 센서 융합 알고리즘과 센서 오차저감 알고리즘, 맵 매칭 등의 추가 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업 “열차자율주행제어 핵심기술개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] K. Shin and J. Lee, "Position Detection Technology of Railway Transportation," Railway Journal, vol. 15, no. 1, pp. 16-21, 2012.
- [2] M. Malvezzi et al., "Train Position and Speed Estimation by Integration of Odometers and IMUs", Proceedings of World Congress Railway Research, pp. 1-22, 2011.
- [3] K. Kim, S. Kong and S. Jeon, "Slip and Slide Detection and Adaptive Information Sharing Algorithms for High-Speed Train Navigation Systems", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 16, no. 6, pp. 3193-3203, 2015.
- [4] C. Cho, Z. Quan, D. Choi, S. Lee and J. Lee, "Implementation of Train Location based on Defensive Programming by using SCADE", Proceedings of Fall Conference of the Institute of Electronics Engineers of Korea, pp. 1003-1006, 2013.
- [5] J. Kim and B. Kim, "Development of Precise Encoder Edge-Based State Estimation for Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 6, pp. 3648-3655, 2016.
- [6] R. Merry, M. Molengraft and M. Steinbuch, "Optimal Higher-Order Encoder Time-Stamping", Mechatronics, vol. 23, no. 5, pp. 481-490, 2013.
- [7] K. Yeo, D. Kim, C. Bae and M. Kim, "A Study on the Minimization of Distance Error for the Track Recording Car(EM-30)", Proceedings of Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp. 374-384, 2015.
- [8] M. Choi, Y. Kim and I. Choi, "User Requirements Analysis for Localization Development of Inspection-Equipment," Proceedings of Autumn Conference of Korean Society for Railway, pp. 1222-1227, 2016.
- [9] X. Ning, I. Selesnick and L. Duval, "Chromatogram Baseline Estimation and Denoising using Sparsity (BEADS)", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, vol. 139, pp. 156-167, 2014.
- [10] BEADS toolbox, <http://eeweb.poly.edu/iselesni/pubs/index.html>
- [11] J.A. Navarro-Huerta, J.R. Torres-Lapasió, S. López-Ureña, and M.C. García-Alvarez-Coque, "Assisted Baseline Estimation Subtraction in Complex Chromatograms using the BEADS Algorithm," Journal of Chromatography A, vol. 1507, pp. 1-10, 2017.

저 자 소 개



이 재 호 (Jae-Ho Lee)

1989년 광운대학교, 대학원 전자공학과졸업(석사)
 2005년 고려대학교 대학원 메카트로닉스학과 졸업(박사)
 1995년~현재 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 책임연구원



김 성 진 (Seong Jin Kim)

2003년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사)
 2011년 한국과학기술원 전기및전자공학과 종립(박사)
 2011~2013년 포항산업과학연구원 시스템솔루션연구그룹 선임연구원
 2013년~현재 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 선임연구원



박 성 수 (Sungsoo Park)

2008년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(석사)
 2010년 8월~2011년 2월 Purdue Univ. 방문연구원
 2012년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(박사)
 2012~13년 연세대학교 박사후연구원
 2013년~현재 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 선임연구원