

열차위치검지 시스템을 위한 관성센서 데이터 분석 연구

Data Analysis of Inertial Sensors for Train Positioning Detection System

김성진*[†], 박성수*, 이재호*, 강동훈**

Seong Jin Kim*[†], Sungsoo Park*, Jae-Ho Lee* and Donghoon Kang**

초 록 철도 시설물의 상태를 종합적으로 동시에 검측하고 건전성 평가가 가능한 고속 종합검측시스템을 위해 열차의 위치검지 정보는 필수불가결하다. 본 논문에서는 위치검지를 위한 위치 기술중 관성센서의 측정과 분석에 대해 다룬다. 관성센서의 가속도 정보와 각속도 정보에 대해 진폭과 주파수 관점에서 분석하였고, 진동 및 열차 동역학에 대한 검토도 이루어졌다. 이러한 검토 결과와 GPS 정보를 이용하여 호남선 나주역부터 일로역까지 한국형 틸팅열차의 위치검지를 수행하였다. 이와 같은 센서 측정치와 열차의 거동에 대한 동기화된 분석은 열차위치검지 시스템의 설계와 성능 향상에 도움을 줄 수 있다.

주요용어: 열차위치검지 시스템, 관성센서, 스펙트로그램, 종합검측

Abstract Train positioning detection information is fundamental for high-speed railroad inspection, making it possible to simultaneously determine the status and evaluate the integrity of railroad equipment. This paper presents the results of measurements and an analysis of an inertial measurement unit (IMU) used as a positioning detection sensors. Acceleration and angular rate measurements from the IMU were analyzed in the amplitude and frequency domains, with a discussion on vibration and train motions. Using these results and GPS information, the positioning detection of a Korean tilting train express was performed from Naju station to Illo station on the Honam-line. The results of a synchronized analysis of sensor measurements and train motion can help in the design of a train location detection system and improve the positioning detection performance.

Keywords: Train Positioning Detection System, Inertial Measurement Unit, Spectrogram, Railroad Inspection

1. 서 론

일반 열차는 물론 검측열차 및 철도시설물들의 정확한 위치 검지는 열차의 운행, 철도 유지보수, 안전설비, 열차제어, 관제 및 감시분야 등 철도시스템의 안전성, 효율성, 편의성을 상당히 향상시킬 수 있는 핵심 기술이다. 이러한 이유로 위치검지 기술은 오랫동안 주목할 만한 관심을 받아왔다.

특히 열차의 정확한 위치검지 정보에 대한 요구가 급격히 증대되고 있는 분야는 철도시설물의 유지보수 분야이다. 현재 고속철도의 건설 및 기술 수요가 국내·외적으로 증대되고 있고, 열차 운행의 정시성 확보를 위한 철도시설물의 유지보

수 효율성 개선이 필요하다[1,2]. 일반적으로 검측차는 고속열차의 운행속도와 차량 특성이 달라 검측된 결과와 차량의 주행 및 위치기록을 동기화하여 유지보수에 필요한 연관성 분석 및 도출에 어려움이 있다. 이를 위해서는 고속 종합검측 시스템 도입이 필요하며, 이를 통해 고속철도의 운행속도(최고 300km/h)와 같은 고속이동환경에서 궤도, 전차선, 열차제어, 통신설비 등 철도시설물의 상태를 종합적으로 동시에 검측함으로써 건전성 평가가 가능하다[3,4].

고속운행 환경에서 정확하고 안정적인 열차의 위치 검지를 위해서는 고속운행 환경에 적합한 위치검지 기술이 필요하며, 일반적으로 절대위치

[Received: September 23, 2014, Revised: October 20, 2014, Accepted: October 29, 2014] *한국철도기술연구원 광역 도시교통연구본부, **한국철도기술연구원 신교통연구본부, [†]Corresponding Author: Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea (E-mail: sjkim@krri.re.kr)

기술과 상대위치 기술로 구분된다. 기존 철도시스템에서 적용되고 있는 궤도회로의 경우 열차의 점유여부를 검지하여 특정궤도 내 열차 위치를 확인하는 절대위치 기술인데 반해, 타코미터와 같은 차륜센서의 경우 열차의 속도 및 이동거리를 통해 열차의 위치를 확인하는 상대위치 기술이다. 하지만, 궤도회로의 경우 열차가 점유한 특정궤도만 검지 가능하므로 수 m 이내의 정확도를 갖기 어렵고, 차륜센서 또한 차륜의 마모, 활주 및 공전으로 인해 이동거리가 길어짐에 따라 누적오차가 무한히 증가하는 단점이 있다[5].

최근 유럽 및 북미국가에서는 궤도회로의 대안으로 절대위치 기술로 위성항법시스템(global positioning system, GPS) 기술 또는 전파식별(radio frequency identification, RFID) 기술을 적용하고 있고, 차륜센서 이외에 상대위치 기술로 도플러 센서와 관성센서를 적용하고 있다. 이러한 절대위치 기술과 상대위치 기술을 적절히 융합된 차상기반의 열차위치검지 시스템은 다양한 철도 분야에 적용되고 있다[5,6].

한편, 열차의 위치검지를 위한 상대위치 기술 중에서 관성센서(inertial measurement unit, IMU)는 이동중인 열차에 대해 3축의 가속도와 3축의 각속도, 즉 총 6가지 정보를 측정한다. 고속으로 연속적인 데이터 획득이 가능하여 짧은 이동거리에서는 뛰어난 정확성을 갖지만, 드리프트(drift)라고 일컫는 시간에 따라 변하는 바이어스(bias), 척도인자(scale factor), 잡음(noise)으로 인해 측정값(raw data)을 위치검지 시스템에 곧바로 적용하기에는 무리가 있다. 일반적인 방법으로 열차의 위치 및 자세, 속도를 구하기 위해 측정치를 한번 또는 두 번의 적분을 하게 되면, 매 적분마다 오차가 계속 누적되어 이동거리가 증가할수록 위치검지 결과에 큰 오차를 야기한다.

관성센서의 바이어스와 척도인자 같은 경우 보정(calibration) 과정을 수행함으로써 극복이 가능하나[7], 열차 운행시 발생하는 진동에 의한 잡음의 경우 센서 자체보다 외부 환경적인 요소에 의해 발생하는 잡음의 세기가 더 크기 때문에 실제 측정값을 분석하는 것이 필요하다. 실제 열차의 진동은 다양한 진동원과 차량 자체의 상호작용에 의해 반복적으로 발생하는 흔들림으로, 다중의 주파수 및 진폭, 방향을 갖고 있다. 일반적으로 차량 설계시 진동 저감에 중점을 두는 점을 고려



Fig. 1 Korean tilting train express(TTX)

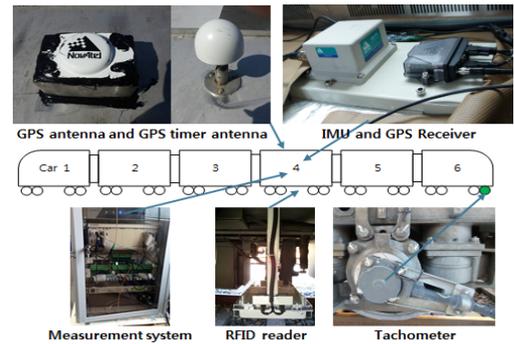


Fig. 2 Sensors and the measurement system of train positioning detection system installed in the Korean TTX

할 때, 이와 같은 열차 이동과 무관한 진동은 관성센서의 측정값에 잡음으로 분류되어 위치검지 시스템의 성능 하락으로 이어지므로, 억제하거나 제거해야 한다.

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 한국형 틸팅열차 내부에 설치된 위치검지 센서중 관성센서의 측정 데이터에 대해 진폭과 주파수에 대한 분석을 수행하였다. 분석결과를 바탕으로 열차의 진동과 동역학에 대한 토의가 이루어졌으며, 필터링 방법을 이용하여 열차의 이동에 연관된 정보만을 추출하였다. 또한, 관성센서의 필터링된 정보와 GPS 정보를 이용하여 호남선 나주역부터 일로역까지 열차위치검지를 수행함으로써 효과를 검증하였다.

2. 현장실험 환경

2.1. 한국형 틸팅열차

한국형 틸팅열차는 국내 최초의 틸팅열차로서 총길이 143 m, 만차시 344톤이며 Fig. 2와 같이 6량 1편성으로 구성되며 양방향 운행이 가능한

열차이다. 동력분산식의 전기차량으로 최고 운행 속도는 180 km/h, 최대 틸팅 각도는 8도, 총좌석은 278좌석으로 설계되어 있다[8].

2.2. 위치검지 시스템

이동중인 열차의 위치 및 속도 검지를 위한 차량 중심의 위치검지 시스템 개발을 위해 절대위치와 상대위치 측정에 필요한 센서와 계측시스템을 한국형 틸팅열차에 설치하였다. GPS 안테나와 GPS 리시버, 관성센서, RFID 리더를 Fig. 2와 같이 각각 차량 상부와 차량 내부 바닥 및 차량 하부에 설치하였고 각 센서의 시간별 동기를 위한 GPS 타이머 안테나도 설치하였다. 계측시스템은 데이터 수집 장비와 각 센서들을 위한 전원 공급기로 구성되며 위치검지 센서의 선정과 분석을 위해 사용한다. 위치검지 센서들과 계측시스템은 위치검지 오차, 시간지연 및 케이블 전송 손실 최소화를 위하여 모두 열차 4호차에 설치하였고, 타코미터의 경우 6호차 차량의 여분 채널을 이용하였다.

2.3. 관성센서

본 논문에서 사용된 관성센서(CG-5100, KVH Industries, Inc.)는 미세전자기계시스템(micro electro mechanical system, MEMS) 기반의 가속도계와 광섬유 자이로스코프(fiber optic gyroscope)로 구성되어 있다. 출력정보는 Fig. 3과 같이 3축(수평 방향 X, 진행 방향 Y, 수직 방향 Z)의 가속도와 3축(roll, pitch, yaw)의 각속도로 6종이며 100 Hz의 주파수로 샘플링된다[9]. 관성센서의 측정값은 자체적으로 온도 보상이 되며 시간은 설치된 GPS 센서와 연동되어 기록된다.

3. 실험결과

틸팅열차는 호남선 구간인 나주역부터 일로역까지 약 38.4 km 구간을 왕복하였다. 실험중인 구간에는 4개역을 비롯하여 터널, 교량이 포함되어 있고 최고속도 140 km/h의 구간도 포함되어 있다. Fig. 4는 정차구간 없이 일로역에서 출발하여 나주역에 도착할 때까지의 시간에 따른 열차의 속도이다. 출발부터 도착까지 총 운행시간은

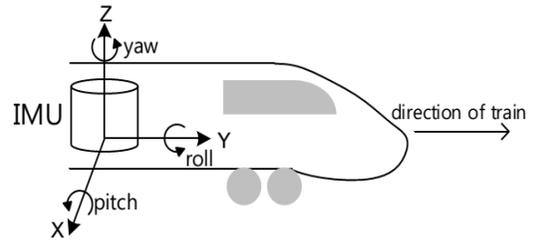


Fig. 3 Output information from IMU

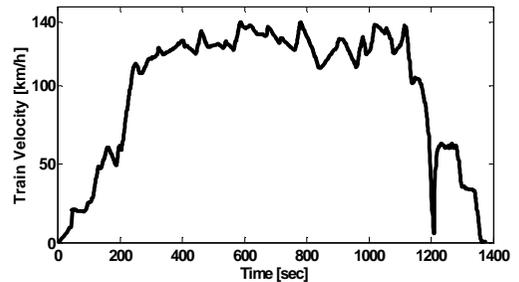


Fig. 4 Train velocity profile (from Illo station to Naju station)

약 23분으로 135 km/h이상의 속도를 낸 구간도 5 구간 포함한다.

Fig. 5는 100 Hz의 샘플링 주파수로 기록된 열차의 진행 방향, 수평 방향, 수직 방향의 가속도이다. Fig. 6은 열차의 3축의 각속도를 측정된 것이다. 가속도계와 자이로스코프로부터 측정된 데이터는 공장 출하전 교정받은 상태이나 척도인자에서의 작은 오차나 바이어스는 여전히 존재한다. Fig. 5에서 1300초 근처에서 수평 방향 가속도와 Fig. 6의 1300초 근처에서 roll 및 yaw 각속도 측정치에 특이점이 관찰되는데 이는 열차가 선로 분기점을 지나는 과정에서 발생한 것이다.

측정 데이터에 대한 시간-주파수 특성을 알아보기 위해 스펙트로그램(spectrogram)[10-12] 분석을 실시하였다. 스펙트로그램은 주어진 신호에 대한 시간-주파수 분석을 도식화한 것으로, 시간에 따라 주파수의 변화를 보여준다. 또한, 일정 주파수 대역에서 진폭 또는 파워의 시간에 따른 변화 추이에 대한 분석을 가능하게 한다. 이를 위해 256 샘플수의 윈도우 크기를 갖는 고속 푸리에 변환(fast fourier spectrum, FFT)를 수행하였고, FFT 결과는 각 센서 신호의 최대 파워로 정규화(normalization)하였다.

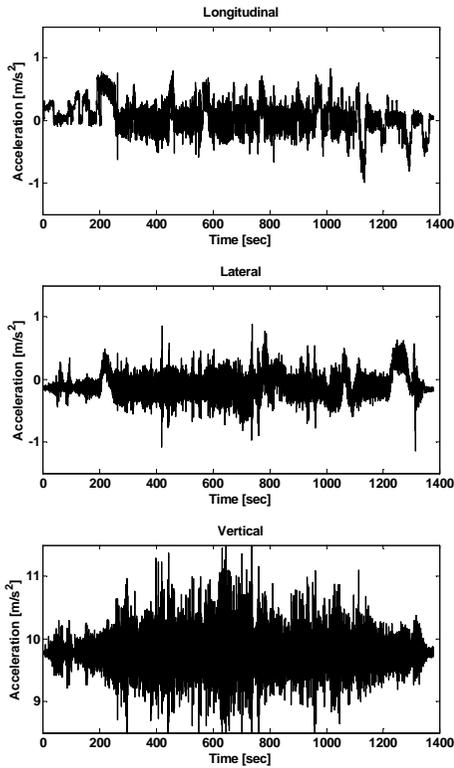


Fig. 5 Measurements from accelerometers in IMU

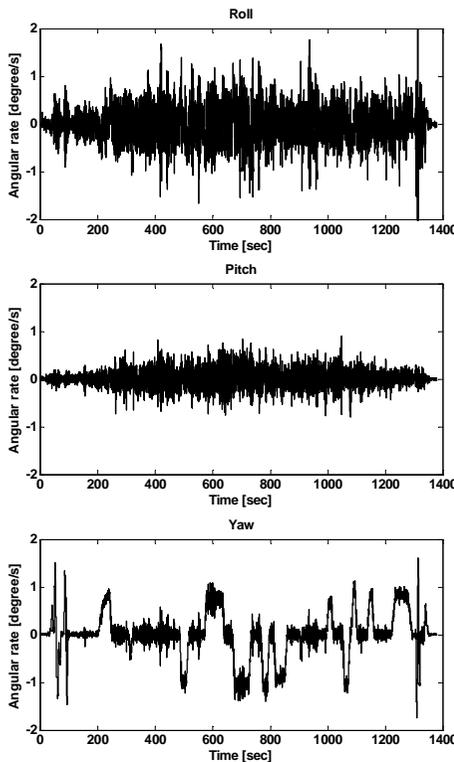


Fig. 6 Measurements from gyroscopes in IMU

3.1. 가속도 신호 분석

Fig. 7은 시간에 따른 진행 방향, 수평 방향 및 수직 방향 가속도 측정데이터들의 스펙트로그램 분석후 정규화한 결과이다. Fig. 4의 열차의 움직임과 결과를 비교해보면 스펙트로그램 상으로도 열차의 정지 또는 운행 여부 판단이 가능하다. 스펙트로그램 분석을 통해 열차 이동시 발생하는 각 축의 가속도의 지배적(dominant) 주파수 성분을 확인할 수 있고, 수직 방향을 제외한 다른 축의 잡음성분은 가우시안(Gaussian) 분포가 아님을 알 수 있다.

진행 방향의 경우 1Hz 근처에서 지배적 주파수가 존재하며, 다음으로 7 Hz 근처에서 존재한다. 수평 방향의 경우 역시 1 Hz 근처에서 지배적 주파수가 존재하며, 다음으로 3 Hz와 13 Hz 근처임을 알 수 있다. 한편, 수직 방향의 경우에는 1 Hz 근처에서만 지배적 주파수 확인이 가능하다. 이를 통해 열차의 견인으로 인한 가속 또는 감속은 물론 열차의 수평 가속에 대한 정보는 1 Hz 근처의 저주파 대역임을 알 수 있다.

열차가 정지한 경우 충분한 시간동안 가속도를 측정함으로써 열차 이동과 밀접한 지배적 주파수 대역과 이동과 무관한 주파수 대역을 구분할 수 있다. 이후 필터링을 통해 열차의 동적 움직임과 관련된 가속도 정보만을 추출한 후 실제 위치검지 시스템에 활용하면 위치검지 결과의 정확도 향상을 기대할 수 있다.

3.2. 각속도 신호 분석

Fig. 8은 시간에 따른 roll, pitch 및 yaw의 각속도 측정데이터들의 스펙트로그램 분석 후 정규화한 결과이다.

Roll 각속도의 경우 1 Hz 근처에서 지배적 주파가 존재한다. Pitch 각속도의 경우 1Hz 근처에서 지배적 주파수가 존재하며, 다음으로 15 Hz와 7 Hz의 순서로 나타난다. 한편, yaw 각속도의 경우 1 Hz 미만에서만 지배적 주파수가 존재함을 알 수 있다. 스펙트로그램은 최대 파워에 대해 정규화된 결과를 나타내므로 배경색으로부터 신호대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 알 수 있다. Fig. 8의 결과에서, roll과 pitch와 달리 yaw의 각속도 데이터는 SNR이 큰 것을 알 수 있다.

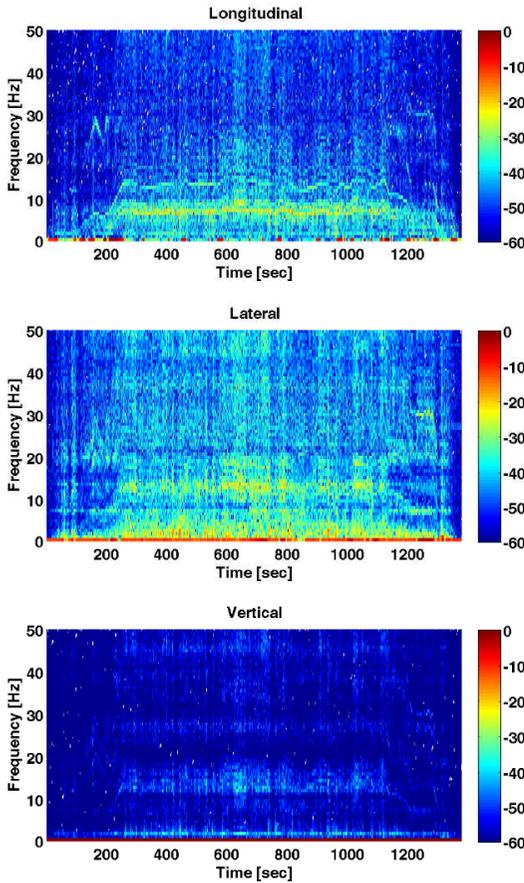


Fig. 7 Spectrogram of acceleration data. Unit of colormap is dB

또한, roll 각속도를 통해 열차의 흔들림뿐만 아니라 캔트(cant)가 있는 궤도에서의 열차 움직임 파악이 가능하며, pitch 각속도는 궤도의 구배의 변화 파악에 활용될 수 있다. 그리고, yaw 각속도를 통해 열차의 진행 방향 변화를 알 수 있고 열차가 저주파 대역의 동특성을 가짐을 알 수 있다.

3.3. 필터링 결과

관성센서에서 가속도와 자이로스코프의 측정데이터는 열차의 움직임, 엔진과 같은 진동원을 비롯하여 센서 자체 잡음을 포함한다. 열차의 가속과 회전의 동역학에 대한 정보는 진동과 잡음에 비하면 Fig. 7과 Fig. 8의 스펙트로그램 분석에서 보는 것과 같이 저주파 대역이다. 이를 위해 본 논문에서는 2 Hz의 차단주파수와 필터차수가 100

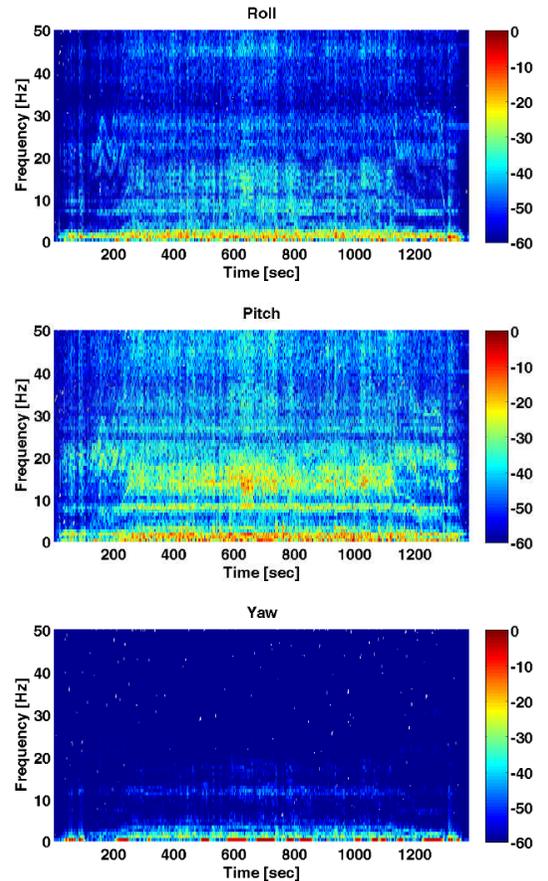


Fig. 8 Spectrogram of gyroscope data. Unit of colormap is dB

인 저역 통과와 유한 임펄스 응답(finite impulse response, FIR) 필터를 이용하였다.

관성센서로부터 가속도와 자이로스코프의 측정데이터에 대해 저역 통과 필터를 통과시켰다. 진행 방향 가속도와 yaw 각속도에 대한 저역 필터 통과후의 결과는 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 5의 진행 방향 가속도와 Fig. 6의 yaw 각속도 측정데이터와 비교할 때 잡음이 상당히 저감된 것을 확인할 수 있다.

관성센서의 측정데이터에 대한 저역 필터 통과 결과로부터 3축의 가속도와 3축의 각속도에 대한 대략적인 크기 범위 정보를 얻을 수 있다. 실험시 틸팅열차의 가속은 최대 0.6 m/s^2 , 감속은 최대 0.7 m/s^2 , 수평 가속은 최대 0.47 m/s^2 , 수직 가속은 중력가속도를 제외하면 최대 0.2 m/s^2 이다. Roll 최대 각속도는 $0.97^\circ/\text{s}$ 이고, pitch 최대 각속도는 $0.48^\circ/\text{s}$, yaw의 최대 각속도는 $1.67^\circ/\text{s}$ 이다.

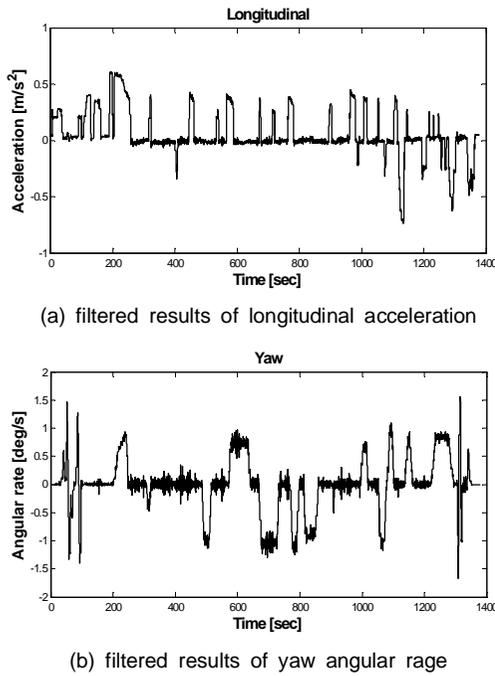


Fig. 9 Filtered results of measurements from IMU

3.4. GPS와 관성센서 이용한 위치검지 결과

철도환경에서 GPS의 경우 전파를 이용하는 특성상 터널 또는 역사와 같은 지리적 환경에 의해 신호를 받을 수 없거나 관측 가능한 위성수가 적을 경우 낮은 위치 정확도를 제공하므로 사용이 제한적이며 불연속적이다. 반면, 관성센서의 경우 서론에서 언급했듯이 고속으로 연속적인 데이터 획득이 가능하나, 이동거리가 길어짐에 따라 누적오차가 무한히 증가하게 된다.

이러한 한계를 극복하기 위해 관성센서의 필터링된 가속도 및 각속도 정보와 GPS 정보를 이용하여 열차위치검지 시스템에 적용하였다. 열차의 위치검지 결과는 Fig. 10과 같다. GPS와 관성센서는 강결합 통합 항법 방법을 이용하였다. 강결합 통합 항법 방법은 상태변수 및 시스템 모델에 관성센서의 오차 모델, GPS 수신기의 시계 바이어스 오차와 시계 바이어스 변화율 오차를 함께 모델링 한다. 그리고 GPS 수신기에서 계산된 각 위성의 의사거리 및 의사거리 변화율을 칼만필터(Kalman filter)의 측정치로 이용한다[13]. 위치검지 결과는 구글 맵(Google map)을 이용하여 도시하였다.

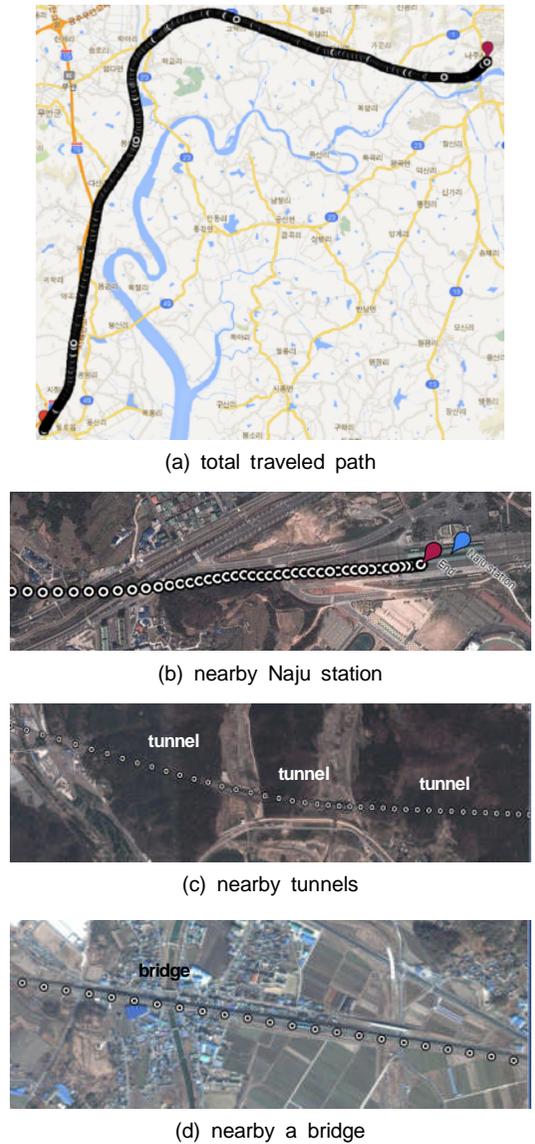


Fig. 10 Result of positioning detection of Koran TTX using GPS data and filtered IMU data

GPS 신호 음영지역에서는 관성센서를 통해 위치검지 결과의 연속적인 도출이 가능하며, GPS를 통해서만 관성센서의 시간에 따른 누적오차의 증가를 제한 할 수 있다.

4. 결론

본문에서는 한국형 틸팅열차에 설치된 위치검지 시스템 내 관성센서에 의해 측정된 열차의 가속도와 각속도의 데이터에 대해 진폭과 주파수

관점에서 분석을 수행하였다. 분석된 결과로부터 열차의 이동에만 연관된 가속도와 각속도를 필터링하여 위치검지 시스템에 적용하였다.

본 논문에서 검토한바와 같이 센서 신호와 열차의 거동 기록을 동기화한 분석을 통해 열차위치검지 시스템의 설계와 성능 향상에 사용가능한 파라미터들의 도출이 가능함을 확인하였다.

마지막으로, 이와 같은 GPS와 관성센서의 융합은 위치검지 결과에 연속성과 정확성을 제공할 수 있고 결과적으로 위치검지 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업인 「고정밀 철도 위치검지 기술개발」 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J. Kim, "Integrity evaluation of railway bogie using infrared thermography technique," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 144-149 (2011)
- [2] S. Han and S. Cho, "Review of non-destructive evaluation technologies for rail inspection," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol 31, No. 4, pp. 398-413 (2011)
- [3] I. Choi, "Current and future of high-speed railroad inspection system technology," *Railway Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 31-35 (2014)
- [4] K. Oh, H. Yang, I. Choi, S. Lee and B. Bae, "Study on integrated operation system for high speed track inspection," *Proc. of Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Changwon, Korea, pp. 1000-1005 (2014)
- [5] K. Shin and J. Lee, "Location detection technology of railroad", *Railway Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 16-21 (2012)
- [6] C. Legrand, J. Beugin, B. Conrard, J. Marais, M. Berbineau and E.- M. El-Koursi, "Casual analysis methodology of multisensor systems based on GNSS," *Proc. of the 2nd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, Corsica, France, Paper 280 (2014)
- [7] M. Park and Y. Gao, "Error analysis of low cost MEMS-based accelerometers for land vehicle navigation," *Proc. of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland, USA, pp. 1162-1170 (2002)
- [8] S. Seo, "Development and outcome of Korean tilting train TTX for speed-up on conventional line", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 2, pp. 65-72 (2008)
- [9] S. Kennedy and J. Rossi, "Performance of a deeply coupled commercial grade GPS/INS system from KVH and Novatel Inc.," *Proc. of IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, USA, pp. 17-24 (2008)
- [10] A. Oppenheim and R. Schafer, "Discrete-Time Signal Processing (3rd Ed.)," Prentice Hall, (2009)
- [11] J. Lee, S. Lee, H. Koh and W. You, "Vibration and noise characteristics of high speed train depending on its speed," *Proc. of Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, pp. 5-12 (2007)
- [12] I. Spulber, P. Georgiou, A. Eftekhari, C. Toumazou, L. Duffell, J. Bergmann, A. McGregor, T. Mehta, M. Hernandez and A. Burdett, "Frequency analysis of wireless accelerometer and EMG sensors data: Towards discrimination of normal and asymmetric walking pattern," *Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Seoul, Korea, pp. 2645-2648 (2012)
- [13] K. Kim, C. Park, M. Yu and Y. Park, "A performance comparison of extended and unscented Kalman filters for INS/GPS tightly coupled approach," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 12, No. 8, pp. 780-788 (2006)