

도로 경사도의 실시간 측정 방법에 관한 연구

김영관^a, 박진일^{a*}, 이종화^a

Research on In-vehicle, Real-time Measurement of Road Grades

Younggwan Kim^a, Jinil Park^{a*}, Jonghwa Lee^a

^a Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	10	October	2013
Revised	23	October	2013
Accepted	24	October	2013

Keywords:

Road grade
IMU
Pitch
Accelerometer

ABSTRACT

By using information about specific road grades, one can predict the power required by a vehicle. The prediction of the required power enables the driver to choose the driving route with the best fuel economy, which results in cost and energy savings. A clinometer is one of the more simple tools used to measure road grades, but requires significant time and effort. In this paper, a new method for measuring road grades from within a vehicle is proposed and experimentally verified.

1. 서론

도로의 경사도 정보를 파악하는 것은 운전 구간에 따른 차량의 요구 동력을 예측 가능하게 한다. 이러한 요구 동력의 예측을 통하여 실제 차량에서 최대의 연비 효과를 기대할 수 있는 운전 구간의 선정이 가능하게 되고, 이를 통하여 도로의 경사도에 따른 적절한 변속비 제어와 엔진/모터 토크제어를 통한 회생제동 전략의 수립, 또는 네비게이션 등과 연계한 에코드라이빙의 실현 등을 통하여 실제 운전 연비의 향상과 배기가스의 저감 등 많은 장점을 기대할 수 있다. 이러한 이유로 도로의 경사도 정보는 향후 차량 제어에 중요한 영향인자로 작용할 것으로 판단된다^[1-3].

경사도 측정을 위한 가장 일반적인 방법은 정밀 경사계를 이용하는 방법이 있지만, 이는 주행 중 실시간 측정이 거의 불가능하다. 경사계 대신 IMU (Inertia Measurement Unit)를 이용하는 방법^[4]이나 LIDAR DATA를 이용하는 방법^[5] 또는 GPS 센서를 이용하

는 방법^[6]등의 선행 연구가 이루어져 있지만, 이 연구들의 경우에는 측정오차에 대한 검증 없이 단순한 방법 제시에 한정되어 있다. 또한 고성능 IMU, GPS 등이 고가인 것을 고려하면 실제 개별 차량에 적용하기 어렵다고 판단된다. 3축-가속도계를 이용하여 기울기를 측정하는 방법^[7]도 제안되어 있으나, 이 방법 역시 정적인 상태에서만 측정의 정확도를 기대할 수 있다.

이에 본 연구에서는 개별 차량 적용을 위해 비교적 저가의 3축-가속도계센서와 차속센서를 이용하여 주행 중 경사도 측정의 정확도를 높이는 방법을 제안하였다. 정확도 검증을 위해 실제 도로의 경사도를 직접 측정하였고, 발생 오차의 원인을 나름대로 분석하고 정확도를 보완할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 측정 구간의 선정 및 도로 경사도 측정

본 연구에서 제시할 도로 경사도 측정 방법의 검증을 위하여 기

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2337

Fax: +82-31-219-2351

E-mail address: jpark@ajou.ac.kr (Jinil Park).

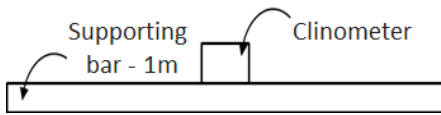


Fig. 1 Grade measurement system

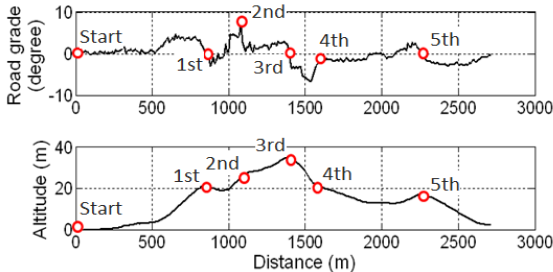


Fig. 2 Grade measuring result on road

준으로 사용할 실제 도로의 경사도를 측정하였다.

2.1 측정 구간과 측정 방법

측정 구간으로 선정된 도로는 약 2,720 m의 길이로, 도로의 경사도가 다양하게 나타나며 차량의 가속, 감속에 문제를 줄 수 있는 과속방지턱과 같은 구조물이 없다.

실제 도로의 기울기를 측정하기 위해 가속도계의 원리를 이용하여 경사도를 측정하는 Techvalley사의 경사계를 이용하여 Fig. 1와 같은 장치를 만들었다. 도로의 실제 경사도는 거리측정 장치를 이용하여 매 10 m마다 경사계를 이용하여 정지 상태에서 도로의 경사도를 측정하였고, 검증용 위해 IMU 측정도 병행하였다.

2.2 도로 경사도 측정 결과

Fig. 2의 첫 번째 그림은 거리에 따른 도로의 경사도를 나타낸 그래프이다. 도로 경사도의 최대 지점은 2번 지점으로 8.4도이며, 경사도의 최소지점에서의 경사도는 -5도이다.

두 번째 그림은 측정된 경사도를 바탕으로 거리에 따른 도로의 고도를 계산한 결과이다. 최고점의 높이는 시작점을 기준으로 약 38 m 정도이다.

측정이 정확하다면 구간 시작점과 끝점의 고도가 같아야 하는데, 결과에서는 약 1.5 m 가량 차이가 발생하였다. 하지만 이 오차가 전체 2,720 m에 대한 오차임을 감안할 때, 이 측정 경사도를 기준으로 사용하는 것에는 문제가 없다고 판단된다.

3. 차량에서의 도로 경사도의 측정

기존 센서들의 주행 중 경사도 측정에 대한 성능을 파악하고, 가속도 센서와 비교하기 위해 IMU와 GPS를 포함하여 경사도 측정

을 수행하였다.

GPS의 경우 X-sens사의 제품을 사용하였는데, 센서 위치에서 고도를 측정할 수 있다. IMU도 역시 X-sens사의 제품을 사용하였는데, 가속도계 및 자이로센서가 내장되어 있어 부착위치의 기울기를 알 수 있다. 3축 가속도계는 New-TC사의 제품을 사용하였으며, 부착 위치의 3축 가속도를 측정할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Acc_x}{\sqrt{Acc_{y,measured}^2 + Acc_{z,measured}^2}} \right) \quad (1)$$

$$\rightarrow Acc_x = Acc_{x,measured} - Acc_{x,vehicle}$$

중력은 항상 수직방향이므로 정지 상태에서 측정된 가속도는 간단한 기하 계산으로 쉽게 기울기를 계산할 수 있지만, 주행 시 측정된 가속도에는 중력 가속도와 운동가속도가 벡터합으로 나타난다. 따라서 주행 중 경사도는 측정된 가속도에서 차량의 가속도를 제외해야 하므로 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 여기서 차량의 가속도는 바퀴 회전속도를 측정하여 계산하였다.

실험에 사용한 차량은 1.6 L급 차량으로, 위의 3가지 센서들은 차량 지붕의 정중앙에 부착하였으며 측정 장비를 이용하여 100 Hz의 Sampling rate로 데이터를 측정하였다.

3.1 GPS 측정 결과

Fig. 3의 첫 번째 그림은 한 개의 GPS 센서로 동일 구간에 대하여 3번의 반복 측정을 수행한 결과이고, 두 번째 그림은 두 개의 GPS센서를 동시에 측정된 결과다.

동일구간에 대하여 주행한 결과이지만 측정 결과에서 확인할 수 있듯이 각각의 주행 때마다 편차가 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 두 개의 GPS센서 측정값 사이의 편차도 최대 20 m이상 차이가

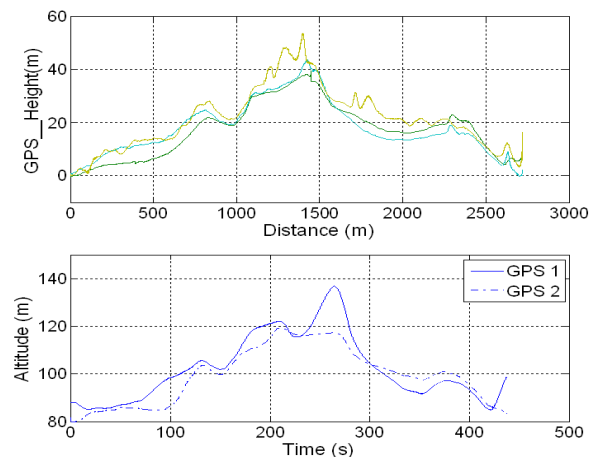


Fig. 3 Road grade measuring result using GPS

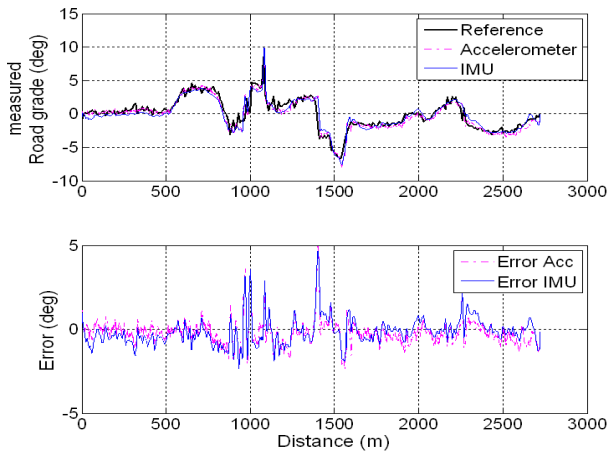


Fig. 4 Road grade measuring result in normal driving

나타나는 것을 확인할 수 있다.

GPS센서를 이용하여 경사도를 측정하는 방법은 GPS센서 자체의 재현성 부족과 GPS센서 간의 편차로 인하여 실현 가능성이 낮다고 판단된다.

3.2 IMU, 3축-가속도계 이용 측정 결과

비교를 위해 IMU와 가속도계 측정은 동시에 이루어졌는데, IMU의 경우 자체적으로 기울기가 계산되어 나오므로 별도의 후처리가 필요치 않는다.

Fig. 4는 급 가/감속이 별로 없는 주행 상태에서 경사도를 측정한 결과이다. 첫 번째 그림은 기준값과 측정결과를 비교한 그림이다. 전체 구간에 대하여 IMU와 3축 가속도계 모두 기준값과 큰 오차 없이 정확하게 기울기를 측정하고 있는 것을 확인할 수 있다.

두 번째 그림은 IMU와 3축 가속도계 측정결과의 오차를 정리한 그림이다. 최대 5도가량 오차가 발생하는 부분이 있기도 하지만 전체 구간에 대하여 약 1도 안쪽의 오차를 갖고 있는 것을 확인할 수 있다. 실제로 계산된 오차의 RMS값은 IMU의 경우와 가속도계의 경우 모두 0.9도로 1도 이하의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

4. 차량의 급 가/감속 시 경사도 측정

도로 주행 중에는 차량을 급 가/감속 운전해야 하는 경우도 때때로 발생한다. 따라서 이러한 경우를 대비하여 경사도 측정을 다시 수행하였으며, 오차로 작용하는 원인이 무엇인지를 분석해 보았다.

4.1 급 가/감속 시의 도로 경사도 측정 결과

Fig. 5은 의도적으로 급 가/감속 운전을 통해 얻어진 결과이다.

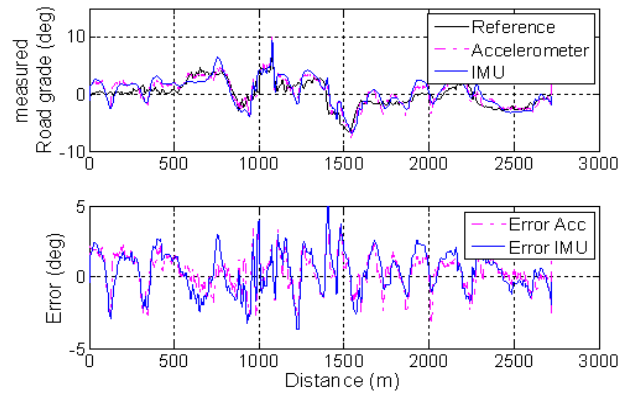


Fig. 5 Road grade measuring result in rapid acceleration and deceleration

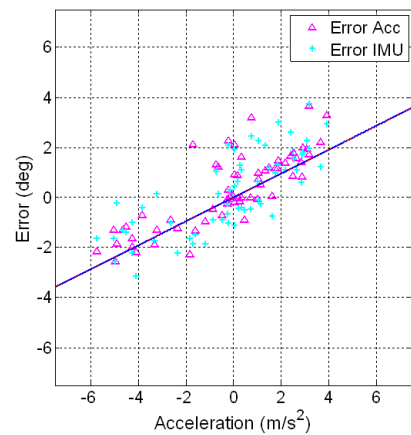


Fig. 6 Measuring error as a function of acceleration

Fig. 5의 결과와 비교해 볼 때 상대적으로 오차가 다소 크게 나타난다. 오차의 RMS를 계산해 본 결과, IMU는 약 1.4도, 3축 가속도계는 약 1.2도로서 완만한 주행 시의 오차보다 훨씬 증가한 것을 확인할 수 있었다.

오차의 원인 분석을 위해 차량의 가/감속과 관계를 그려보면 Fig. 6과 같이 가속도와 선형적인 경향을 확인할 수 있었다.

차량 가속도와 오차의 관계가 IMU의 경우 기울기 약 0.477, 3축 가속도계의 경우 약 0.479의 관계를 이루는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 오차의 원인 분석 및 보정 방법의 제시

오차가 가속도에 비례한다는 점에 착안하여 원인을 파악하기 위해 센서의 부착위치에 대하여 고찰해 보았다.

센서의 부착위치는 지금까지 차량의 지붕 한 가운데에 설치하였다. 그런데 차량은 강체가 아니므로 현재까지 측정 계산된 기울기 값들은 모두 차량 지붕에서 차량의 진동이 포함된 값이다. 이를 식

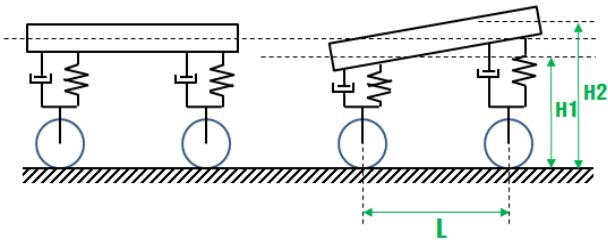


Fig. 7 Vehicle modeling for prediction of pitch

으로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Road\ grade_{measured} = Road\ grade + Pitch_{vehicle} \quad (2)$$

따라서 도로 경사도를 구하기 위해서는 차량 자체의 피치(Pitch) 운동에 대한 고려가 필요하다.

Fig. 7는 차량을 간단히 2자유도계로 모델링한 것을 나타낸 것인데, 차량의 서스펜션 운동을 간단히 모델링한 것이다.

$$Pitch_{vehicle} = \tan^{-1}\left(\frac{H_2 - H_1}{L}\right) \quad (3)$$

차량의 피치운동을 계산하기 위해서는 그림에서 나타낸 H1, H2, L의 실제 측정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 OMRON사의 레이저 변위센서를 차량 최전방과 최후방에 설치하여 실시간 H1, H2의 값을 측정하였고, 이 값을 식 (3)에 적용하여 차량 자체의 피치운동을 계산하였다.

4.3 IMU 측정 결과에 피치운동 보정

앞서 정리한 식 (3)을 이용하여 차량 자체의 피치를 계산 후 보정해 주었고, 그 결과 오차의 RMS값이 기존에 1.368에서 1.167로 줄어들었다. 따라서 피치의 보정이 오차를 줄여주는 데 기여했다는 것을 알 수 있다.

5. 다양한 차종에의 적용

앞의 연구 내용을 1.6 L급 소형차 이외에 2.5 L급 대형 SUV차종과 3.3 L급 대형 세단에도 수행해 보았다.

3.3 L급에서 IMU의 오차 RMS값은 1.398로 나타났으며, 3축 가속도계의 오차 RMS값은 1.063로 나타났다. 2.5 L급 SUV에서 IMU의 오차 RMS값은 1.441으로 나타났고, 3축 가속도계의 오차 RMS값은 1.149로 나타났다.

결론적으로 1.6 L급 소형차량과 비슷한 수준의 결과를 보여주었

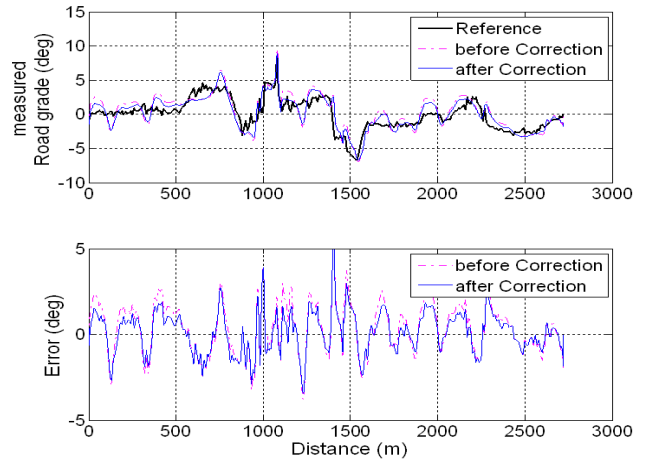


Fig. 8 Measuring result using IMU + Pitch correction in rapid acceleration and deceleration

으며, 3축-가속도계의 결과가 IMU이용 결과에 비하여 좀 더 정확한 것을 확인할 수 있었다.

6. 차량 가속도와 오차의 모델링

Fig. 6을 보면 IMU와 3축-가속도계의 오차가 차량의 가속도와 1차식의 관계를 갖는다는 것을 확인 할 수 있었다. 이 때 그 기울기는 경사도 측정의 오차율을 의미한다. 급가감속 시 오차가 커지는 이유는 바퀴와 노면과의 슬립이나 동반경 변화에 기인하는 것으로 판단된다.

이에 가속도를 간단히 보정하여 경사도를 다시 계산해 보면, Fig. 8에서 오차의 RMS가 1.368였던 것이 1.055로 감소하는 결과를 보인다. 이는 앞서 제시한 피치 보정 방법의 1.167보다도 낮은 값이다.

결국 가속도 크기를 1차식으로 간단히 보정만 한다면 피치 동작을 보정하지 않더라도 오차를 줄이는 것이 가능할 것이라 판단할 수 있다.

또한, 모든 차량에 적용하는 문제를 생각해 보더라도 동일한 차종에서는 동일한 서스펜션을 사용할 것이므로 가속도에 따른 오차 역시 같을 것이다. 따라서 하나의 차량 시험만 수행하면 동일한 차종의 다른 차량에 모두 적용이 가능할 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 주행 중 도로의 경사도 측정을 위해 차량에 GPS, IMU, 3축-가속도계 및 차속계를 설치하여 시험을 수행하였다.

GPS의 경우, 측정 결과의 재현성의 부족으로 사용이 어렵다는

Table 1 RMS calculation result using IMU

	Before correction	After correction
Normal driving	0.895	0.838
High acceleration	1.368	1.167

Table 2 RMS calculation result using triple axis accelerometer

	Before correction	After correction
Normal driving	0.881	0.791
High acceleration	1.195	0.966

결론을 얻었다. IMU와 3축-가속도계의 경우, 완만한 주행 조건의 경우에는 오차의 RMS값이 1도 이내였으나, 급 가/감속 감속 주행 조건에서는 오차의 RMS값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

급 가/감속 시 차량 자체의 피치운동이 측정 오차의 원인으로 판단되었고, 차량의 피치운동에 대한 보정을 통하여 Table 1과 Table 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

IMU와 3축-가속도계의 오차 RMS값을 비교한 결과 3축-가속도계의 결과가 더 작은 값을 보여주며, 이는 3축-가속도계와 차속계 이용 방법이 IMU 이용 방법에 비하여 좀 더 높은 정확성을 보인다는 것을 알 수 있다.

기존의 1.6 L급 소형차량 이외에도 2.5 L급 SUV차량, 3.3 L급 대형 세단에도 본 연구의 방법을 적용하여 도로 경사도 측정 가능성을 확인하였다.

차량의 가속도 보정 방안을 단순히 1차식으로 수행하여 경사도를 보정하는 방법도 적용해 보았는데, 피치 운동 측정이 없어도 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

References

- [1] Park, J. Y., Lee, S. J., Yoon, H. J., 2004, A Study on Road Grade Estimation for Hybrid Electric Vehicle Control, KSAE04-L0013.
- [2] Park J. H., Kong J.H., Lee C.W., Jo H.S., Park Y.I., Lee J.M., 1999, An Algorithm to Measure Road Grade and a Driving Mode Including Road Grade, KSAE Annual Conference Proceedings, 99380115.
- [3] Hong S., Bae, J., Christian Gerdes, 2000, Parameter Estimation and Command Modification for Longitudinal Control of Heavy Vehicles, AVEC 2000, Ann Arbor, Michigan, August.
- [4] Baek W., Song B., 2007, ROLL AND PITCH ESTIMATION VIA AN ACCELEROMETER ARRAY AND SENSOR NETWORKS, KSAE 8: 753-760.
- [5] Zhang K., Frey C., 2005. Road Grade Estimation For On-Road Vehicle Emissions Modeling Using Lidar Data, 05-A-1137-AWMA.
- [6] Hong S. B., Ryu J., Gerdes J.C., 2001, Road Grade and Vehicle Parameter Estimation for Longitudinal Control Using GPS, IEEE, ITS 2001, Oakland, CA, August 25-29.
- [7] AN-1057, Using an Accelerometer for Inclination Sensing, viewed 13 August 2013, <<http://Analog.com>>
- [8] AN-3447, Implementing Auto Zero calibration Technique for Accelerometers, viewed 13 August 2013, <<http://Analog.com>>
- [9] Gillespie T. D., 2002, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE.
- [10] Wurtenberger M., Germann S., Isermann R., 1992, Modeling and Parameter Estimation of Nonlinear Vehicle Dynamics, ASME Transportation systems.
- [11] Lee D.K., Park J.I., Lee J.H., 2006, The Real Time Measurement of Dynamic Radius and Slip Ratio at the Vehicle, KSAE , 14: 88-94.
- [12] Robert B. GmbH, 1993, Automotive Handbook, 3rd edition, Germany.