

가속도 바이어스와 타이어반경 오차를 고려한 차량절대속도 추정

Absolute Vehicle Speed Estimation considering Acceleration Bias and Tire Radius Error

황진권*, 송철기**
Jin Kwon Hwang, Chul Ki Song

ABSTRACT

This paper treats the problem of estimating the longitudinal velocity of a braking vehicle using measurements from an accelerometer and wheel speed data from standard anti-lock braking wheel speed sensors. We develop and experimentally test three velocity estimation algorithms of increasing complexity. The algorithm that works the best gives peak errors of less than 3 percent even when the accelerometer signal is significantly biased.

주요기술용어 : Absolute vehicle speed (차량절대속도), Slip ratio (미끄럼율), Velocity estimator (속도추정기), Kalman filter (칼만 필터), Fuzzy logic (퍼지 로직), ABS (Anti-lock Braking System)

1. 서론

차량절대속도에 관심을 갖는 첫번째 이유는 바퀴 각속도(angular speed of the wheels)와 타이어 반경의 곱을 이용하여 각 바퀴에서 미끄럼율(longitudinal slip ratio, s_i)을 계산하는데 사용될 수 있기 때문이다.

$$s_i = \frac{r\omega_i - v}{v} \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

여기서 r 은 바퀴의 반경(m), ω_i 은 각 바퀴의 각속도(rad/s), v 은 차량의 속도(m/s)이다. 미끄럼율은 Bakker 등의 "Magic Formula Tire Model"에서 볼 수 있듯이^{1,2)} 차량을 가속하거나 감속하게

하는 타이어 종력과 관련되기 때문에 중요하다. Fig. 1은 "Magic Formula"로 얻은, 여러 노면조건에 따른 구동상태(in traction)에서의 미끄럼율과 표준 타이어 종력을 보여주는 그림이다. 이 곡선은 미끄럼율 15% 정도까지 미끄럼의 증가에 따라 정규화 타이어 종력(타이어 종력/수직하중)이 계속적으로 증가하고 있음을 보여준다. 이 최대치를 지난 후, 미끄럼이 증가함에 따라 타이어 종력은 감소하여 바퀴는 록업(lock-up)이 된다. 여러 자동차에서 이 미끄럼 곡선의 개념이 사용되고 있다. 그 중 제일 많이 이용되고 있는 분야가 ABS이며, 이는 록업이 발생하는 미끄럼율을 찾고, 이를 발생되지 않도록 제동압력을 낮추는 장치이다.

만약, 미끄럼율을 정밀하게 측정할 수 있다면, 이 미끄럼 곡선으로부터 더 많은 정보를 얻는 장

* 회원, 원콤주식회사

** 회원, 경상대학교 기계항공공학부, ReCAPT

치의 개발이 가능할 것이다. 여러 연구결과에 의하면, 미끄럼 정보를 사용하여 노면마찰계수(friction coefficient)를 추정할 수 있다. Gustafsson³⁾과 Muller 등⁴⁾은 최대 노면마찰계수의 추정기(slip-based estimator)를 보여주었다. 그러나 이 추정기는 정상 주행조건에서 미끄럼이 적고, 타이어 종력이 적을 때 적용하였다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 정확한 속도추정과 미끄럼율의 계산이 요구될 것이다. 비록 표준센서를 사용하여 구동상태에서의 속도추정이 가능하다고 할지라도, 지면을 기준으로 한 별도의 속도센서 없이 차량 제동 상태에 적용하기는 어려움이 많다.

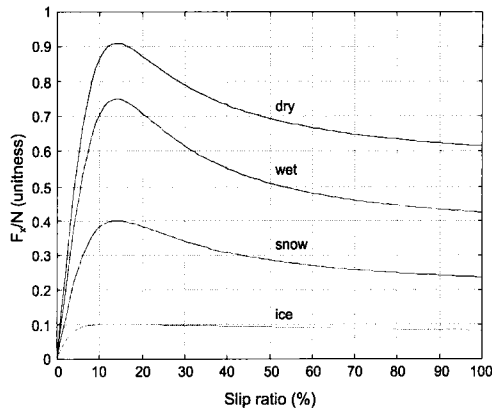


Fig. 1 Simulated slip curves on several surfaces

차량속도를 측정하는 방법은 광학 센서, 레이더 센서, 제 5바퀴센서, 지구좌표시스템 등을 이용하는 방법들이 있으나, 크게 노면 기준법(ground reference techniques)과 비노면 기준법(non-ground reference techniques) 두 가지로 구분된다. 노면기준법이 일반적으로 더 정확하지만, 비노면기준법보다 훨씬 비싸다. 주로 사용되고 있는 비노면기준법에는 가속도신호와 바퀴 각속도를 조합한 칼만필터 이용법,⁵⁾ 가속도신호와 바퀴 각속도를 조합한 퍼지로지 이용법,^{6,7)} 또는 신경망회로를 이용한 추정법⁸⁾ 등이 있다.

이 논문의 목표는 표준 ABS 센서와 가속도계를 사용하여 차량의 절대속도를 정확하게 얻는데 있다. 본 연구에서는 차량속도추정알고리즘

을 개발하기 위하여, 다음의 세 가지의 이유 때문에 왼편 전륜의 바퀴 각속도만을 사용하였다. 첫째, 여러 바퀴와 모두 비교하기는 어려운 상황에서 한 바퀴의 거동과 추정속도의 관계를 그래프로 직접적으로 비교하기 쉽다. 둘째, 속도추정에 대한 최악의 경우(worst-case)를 시험할 수 있다. 여기서 최악의 경우라 함은 예를 들어 다른 세 바퀴가 록업이 되지 않은 상태에서 한 바퀴만 록업이 되어 있다면, 록업된 한 바퀴의 속도신호로 인하여 차량속도를 추정하기 어려운 경우를 의미한다. 이 경우에 특히 가속도계가 유용하게 사용될 것이다. 셋째, 한 바퀴만을 사용함으로써 속도 추정법의 본질을 더 정확하게 파악할 수 있다. 따라서 보다 다양한 알고리즘을 시도해볼 수 있으며 더 쉽게 분석할 수 있다. 이러한 속도추정법을 직관적으로 표현하면, “타이어의 미끄럼이 적을 때는 바퀴 각속도 신호에 의존하여 차량속도를 추정하고, 타이어의 미끄럼이 커지면 가속도를 적분한 신호에 의존하여 차량속도를 추정한다.”이다. 본 연구에서 제시되는 세 알고리즘은 이 개념을 바탕으로 하고 있다. 첫번째 방법은 매우 간단하지만, 가속도신호가 바이어스되어 있거나, 바퀴 각속도 신호에 잡음이 있거나, 유효 타이어 반경에 오차가 있을 경우에는 많은 어려움을 갖게 된다. 두번째 방법은 가속도 신호와 바퀴 각속도 신호를 결합하는데 있어 칼만필터와 퍼지로직을 사용한다. 칼만필터 방법은 잡음제거에 용이하지만, 가속도신호가 바이어스되어 있거나 유효 타이어 반경에 오차가 있을 경우에 어려움이 갖게 된다. 마지막 방법은 회귀법(regression)을 이용하여 유효 타이어 반경과 가속도 바이어스를 동시에 찾아내는 방법으로, 차량절대속도를 가장 잘 추정할 수 있다. 이 연구의 모든 결과는 후륜구동차량을 직선도로에서 주행실험 데이터를 이용하여 계산한 것이며, 속도추정을 위하여 가속도계와 전륜 각속도 센서를 주요 센서로 사용하였다. 또한 기준 차량속도를 얻기 위하여 차량 후면에 자전거바퀴 모양의 제 5바퀴를 장착하였다.

2. 알고리즘 1 : SIMPLE ESTIMATOR

먼저 단순하고도 직관적인 속도추정방법을 제시하고 이것이 갖고 있는 어려움을 분석하고자 한다. 후륜구동차량의 일반 주행에서 전륜의 미끄럼은 무시될 수 있으므로, 차량이 제동하지 않을 때라면 타이어 유효반경과 전륜의 각속도를 곱한 값을 차량속도로 간주할 수 있다. 즉 시간 k 에서 차량추정속도 $v_{simple}(k) = r_{est} \omega(k)$ 이 된다. 여기서 r_{est} 는 유효 타이어 반경의 추정치, $\omega(k)$ 는 바퀴의 각속도이다. 제동이 진행될 때에는 식 (2)와 같이 가속도 신호를 수치적으로 적분하여 속도 추정치를 얻는다.

$$v_{simple}(k) = v_{simple}(k_{no_brake}) + \sum_{i=k_{no_brake}}^k a_{meas}(i) \cdot dt \quad (2)$$

여기서 k_{no_brake} 는 제동이 없었던 마지막 상태를 의미하며, $a_{meas}()$ 는 가속도 신호, dt 는 샘플링 시간간격(sampling time interval)을 말한다. Fig. 2는 이 방법으로 구한 속도 추정치를 보여 주고 있다. 제동이 시작되는 5초까지 선형적으로 가속도가 가해졌으며, 이때까지는 속도 추정치와 전륜속도가 제 5바퀴 속도에 거의 일치하고 있다. 8초가 지난 시점부터 바퀴는 록업이 되어 바퀴속도가 0m/s 까지 급격히 떨어지나, 차량의 속도는 서서히 감속되고 있음을 알 수 있다. 점선은 가속도 신호에 바이어스가 없을 때의 속도 추정치이며, 실선은 $0.6m/s^2$ 의 가속도 바이어스가 포함되어 있다고 가정하였을 때의 속도 추정치이다. 가속도 측정치가 실제 차량의 가속도를 정확히 반영하고 있을 때는 이 단순한 알고리즘에 의한 속도 추정치는 매우 정확하다. 약 6초 시점부터 속도 추정은 가속도 신호에 의존하여 실제 차량속도에 근접하게 된다.

Fig. 3의 점선이 보여 주듯이, 2% 이하의 오차로 속도 추정을 하고 있으며, 바퀴가 록업되었을 때에도 4% 이내로 추정한다. 실선과 같이 가속도 신호에 바이어스가 많이 포함된다면 추정기의 강인성이 부족하게 되어 어려운 점이 발생하

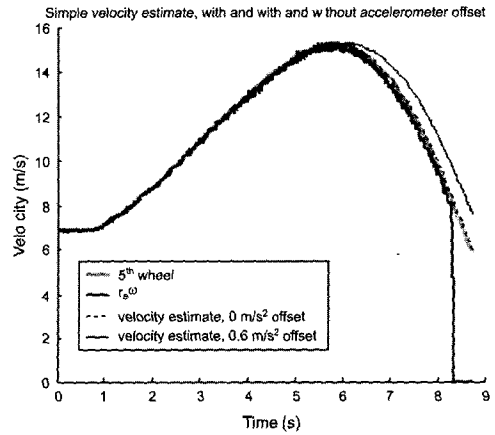


Fig. 2 Performance of simple velocity estimation algorithm (algorithm 1). dotted line: no accelerometer bias, solid black line: $0.6m/s^2$ accelerometer bias

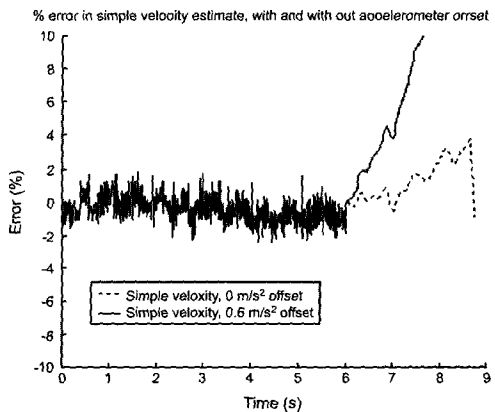


Fig. 3 Percent errors in simple velocity estimation

게 된다. 차량이 경사면을 주행한다든지, 차량의 급작스런 가감속 때문에 피치각이 순간적으로 변하든지, 차량의 하중에 의해 피치각이 변해 있던지 하면 가속도 바이어스가 발생될 것이다.

이중에서도 경사면이 가장 중요할 것이다. $0.6m/s^2$ 의 가속도 바이어스는 약 6% 정도의 속도 추정오차를 유발한다. 이와 마찬가지로 타이어 반경이 주행중 바뀌게 된다면 이 간단한 속도추정 알고리즘은 강인하지 않게 된다. 비제동 주행 상태에서의 타이어 반경의 퍼센트 오차량은 다음과 같다.

$$100 \times \left(\frac{r_{est} - r}{r} \right) \% \quad (3)$$

여기서 r 은 유효 타이어 반경의 실제값이다. 식 (2)으로부터 유효 타이어 반경이 2%의 오차를 포함하고 있다면 속도 추정치도 약 2%의 오차를 유발하게 됨을 알 수 있다. 그러나 다행스럽게도 유효 타이어 반경의 변화는 무시할 수 있을 정도로 적다. 이 알고리즘에서의 마지막으로 고려해야 할 점은 바퀴속도에 포함된 잡음에 대한 것이다. 이는 Fig. 2와 Fig. 3에 잘 나타나 있는 바, 6초 시점 이전에서 고주파 잡음이 포함되어 있으나, 이 바퀴속도 잡음은 상대적으로 적기 때문에 그리 심각한 문제가 되지는 못한다.

3. 알고리즘 II: WEIGHTED AVERAGE / KALMAN FILTER VELOCITY ESTIMATOR

타이어 반경과 오프셋에 의한 강인성 문제에 앞서 바퀴 각속도 잡음을 줄이기 위한 칼만 필터를 개발하고자 한다. 다음의 두 가지 이유 때문에 비제동 상태에서도 센서 잡음을 줄여야 한다. 첫째, 바퀴에 미끄럼이 없을 때, 단순한 속도추정법(알고리즘 I)은 바퀴 각속도 신호를 사용하기 때문이다. 둘째, 가속도 신호를 적분할 때, 어느 한 초기속도를 사용해야 하기 때문이다. 칼만 필터를 이용하면 잡음을 많이 줄일 수 있으며,^{9,10)} Daiss와 Kiencke,⁶⁾ Kobayashi 등⁵⁾은 본 연구와 비슷한 조건에서 칼만 필터를 사용하였다. 실제 차량속도 $v(k)$ 를 식 (4)와 같이 차분방정식(difference equation)으로 모델링하였다.

$$v(k) = [1] \cdot v(k-1) + [dt] \cdot a_{meas}(k) + w(k) \quad (4)$$

여기서 $a_{meas}(k)$ 는 측정된 가속도 신호이며, $w(k)$ 는 잡음이다. 한편, 미끄럼이 없다고 가정할 때, 잡음을 포함한 바퀴 각속도 $\omega(k)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\omega(k) = [1/r_{est}] \cdot v(k) + n(k) \quad (5)$$

잡음 $\omega(k)$ 과 $n(k)$ 이 백색잡음이라면, 차량속도의 최소제곱 추정치를 측정 바퀴 각속도와 측정 가속도로 나타내면 다음과 같이 정리된다.

$$\hat{v}(k) = [1] \cdot \hat{v}(k-1) + [dt] \cdot a_{meas}(k) + K_1 \left(\omega(k) - \frac{1}{r_{est}} ([1] \cdot \hat{v}(k-1) + [dt] \cdot a_{meas}(k)) \right) \quad (6)$$

여기서 $\hat{v}(k)$ 는 최적 추정치이며, K_1 은 칼만 이득이다. K_1/r_{est} 를 K_2 로 정의한다면 식 (7)로 고쳐진다.

$$\hat{v}(k) = K_2 r_{est} \omega(k) + (1 - K_2) ([1] \cdot \hat{v}(k-1) + [dt] \cdot a_{meas}(k)) \quad (7)$$

즉, 칼만 필터류의 이 속도추정기는 바퀴 각속도와 가속도 신호를 적분한 속도를 가중평균하여 차량속도를 추정한다. 이 속도추정기는 앞 절의 단순 속도추정기보다 일반적인 형태이다. 단순 추정기에서는 가중치 K_2 를 0 (제동시) 또는 1 (비제동시)만을 사용하는 반면, 가중평균/칼만 필터 추정기는 0과 1 사이의 가중치를 가질 수 있다. 예를 들어, 미끄럼이 거의 없을 때에는 강한 제동이 있을 때보다 1에 가까운 값을 가질 수 있다. 시험주행에서 가중치 K_2 가 0.09 (미끄럼이 적을 때)와 0.00 (미끄럼이 클 때)사이의 값을 가짐을 확인하였다. 식 (8)으로 미끄럼율을 구한 후, Fig. 2를 이용하여 가중치 K_2 을 계산해낸다.

$$s(k) = \frac{r_{est} \omega(k) - \hat{v}(k-1)}{\hat{v}(k-1)} \quad (8)$$

미끄럼율과 K_2 의 관계 그래프인 Fig. 4에서 알 수 있듯이, 미끄럼이 없을 때에만 값을 갖도록 구성하였다. Fig. 5는 가중평균/칼만 필터 속도추정기에 의한 차량속도추정 결과를 보여준다. 가속도 신호에 오프셋이 없다면, 가중평균/칼만 필터 속도추정 알고리즘은 좋은 결과를 가진다.(Fig. 5의 점선) 즉, 전 구간에서 2% 이내의 오차를 가진다.(Fig. 6의 점선) 그러나, $0.6m/s^2$ 정도의 가속도 오프셋을 가지면, 이 알고리즘은 가속도 신호에 많이 의존하기 때문에 큰 오차를 유발한다.(Fig.

5와 Fig. 6에서의 실선) 바퀴 각속도 신호에 더 많은 가중을 준다 할지라도, 결과는 마찬가지로 좋지 않다.

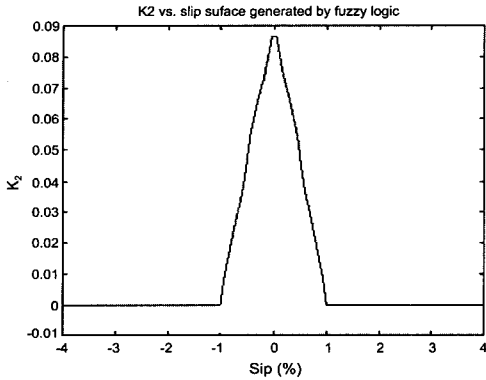


Fig. 4 K_2 vs. slip surface by fuzzy logic

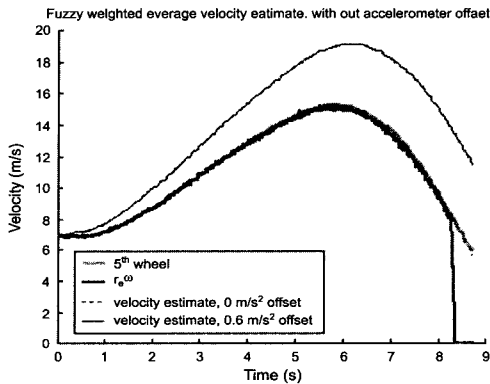


Fig. 5 Performance of the weighted average/ Kalman filter velocity estimation algorithm (algorithm II)

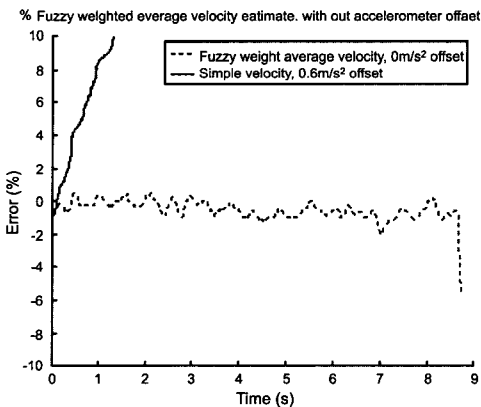


Fig. 6 Percent error for the velocity estimates of the weighted average/Kalman filter from Fig. 5

4. 알고리즘 III : WEIGHTED AVERAGE WITH OFFSET AND RADIUS CORRECTION

가중평균/칼만필터 알고리즘은 잡음을 줄일 수 있지만 가속도 오프셋에는 민감한 단점을 가지고 있음을 알았다. 또한 가중평균/칼만필터 알고리즘은 유효 타이어 반경의 정확한 추정을 요구한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 절에서 가중평균/칼만필터 알고리즘에 변수 추정기를 추가하고자 한다. 추정하고자 하는 변수는 식 (9)로 정의되는 가속도 오프셋 ε 과 유효 타이어 반경 r 이다.

$$\varepsilon(k) = a_{meas}(k) - a(k) \quad (9)$$

이 때, 이들 변수추정이 가능하도록 도와주는 측정인자는 바퀴 각속도와 가속도이다. 바퀴에 미끄럼이 없을 때, 바퀴 각속도는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\dot{\omega}(k) = \begin{bmatrix} a_{meas}(k) & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/r \\ \varepsilon/r \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 $\dot{\omega}(k)$ 는 각속도를 수치적으로 미분한 값 $(\omega(k) - \omega(k-1))/dt$ 이다. 표준최소제곱, 반복최소제곱, 또는 칼만필터를 사용하여 변수 $1/r$ 과 ε/r 를 계산할 수 있다. 처음 두 방법은 최소제곱 최적해를 갖지만, 칼만필터를 이용하는 방법은 시변변수(time varying parameters)를 추적하도록 하는 잇점이 있다. 타이어 반경은 매우 조금씩 또 매우 천천히 변하는 반면, 가속도 오프셋은 짧은 시간 동안 매우 크게 변할 수 있다. 회귀문제를 풀기 위해, 다음과 같은 차분방정식을 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1/r(k) \\ \varepsilon/r(k) \end{bmatrix} = I_{2 \times 2} \begin{bmatrix} 1/r(k-1) \\ \varepsilon/r(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 w_1 과 w_2 는 백색잡음이며, $I_{2 \times 2}$ 는 항등행렬이다. 측정 잡음 $n(k)$ 를 포함하는 각속도는 식 (13)과 같이 표현된다.

앞 절에서와 마찬가지로 칼만추정기는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{v} \\ \hat{r} \\ \hat{\varepsilon} \\ \hat{r} \end{bmatrix} (k) = I_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \hat{v} \\ \hat{r} \\ \hat{\varepsilon} \\ \hat{r} \end{bmatrix} (k-1) + K_{2 \times 1} \left(\hat{\omega}(k) - C(k) \begin{bmatrix} \hat{v} \\ \hat{r} \\ \hat{\varepsilon} \\ \hat{r} \end{bmatrix} (k-1) \right) \quad (12)$$

여기서 $K_{2 \times 1}$ 는 표준 칼만필터¹⁰⁾로 얻은 시변 이득 행렬이다. 미분된 각속도가 잡음을 많이 갖고 있고, 가속도 신호가 타이어 반경보다 더 가변적임을 반영하기 위하여, 프로세스 잡음 $n(k)$ 의 공분산을 변수 $1/r$ 과 ε/r 의 공분산보다 훨씬 크게 잡았다. 바퀴의 미끄럼이 없을 때의 데이터만을 사용하기 위하여, 미끄럼율이 +/- 2%를 벗어나면 그로부터 2초전 동안의 평균값을 택하도록 하였다. 가중평균속도는 앞 절에서와 같이 계산되며, $a_{meas}(k)$ 는 $a_{meas}(k) - \hat{\varepsilon}(k)$, r_{est} 는 $\hat{r}(k)$ 로 대체된다.

$$\hat{\omega}(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{meas}(k) & -1 \end{bmatrix}}_{c^T(k)} \begin{bmatrix} 1/r \\ \varepsilon/r \end{bmatrix} + n(k) \quad (13)$$

Fig. 7과 Fig. 8은 변수추정/가중평균 추정기로부터 얻은 속도추정결과를 보여준다. 점선은 가속도 오프셋이 없는 경우이다. 대부분의 시험에서 2% 이내의 오차를 보여주고 있으며, 추정치의 고주파 잡음도 소거되었다. 앞 절에 있는 두 방법의 오프셋이 없는 경우와 거의 같은 결과를 얻었다. 반면에 실선은 가속도 오프셋이 0.6 m/s^2 인 경우의 결과이다. 앞 절에 있는 두 방법의 오프셋이 있는 결과와 달리, 추정 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 가속도 오프셋이 있을지라도 속도 추정값이 제 5바퀴 속도에 매우 근접함을 보여주고 있으며, 그 오차가 전 시험구간 내에서 3% 이내를 유지하고 있다.

Fig. 9는 앞 절의 두 그림에 해당하는 유효 타이어 반경과 가속도 오프셋에 대한 추정치를 보여준다. 크기가 0.3 가까이 있는 두 선(점선과 실선)은 타이어 반경 추정결과를 보여주고 있다.

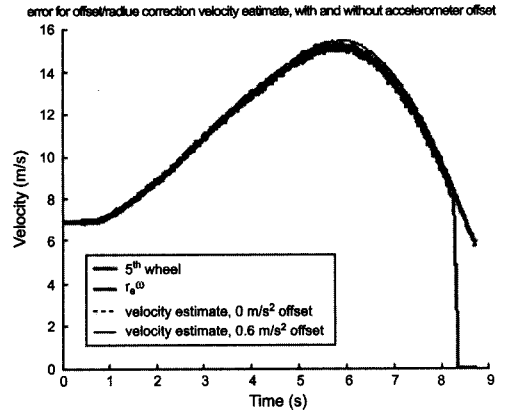


Fig. 7 Performance of weighted average velocity estimator with radius and offset correction (algorithm III)

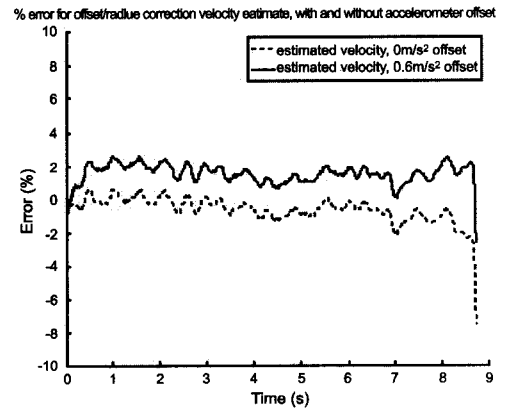


Fig. 8 Percent error for the velocity estimation results of Fig. 7

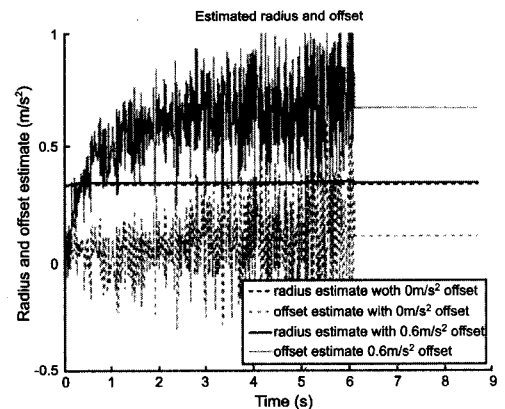


Fig. 9 Radius and offset estimates corresponding to Fig. 7

처음 시작점에서 거의 변화가 없다. 나머지 변동이 큰 두 선은 가속도 오프셋 추정치를 보여주고 있으며, 두 경우 모두 가속도 오프셋이 실제 오프셋 값에 근접함을 보여주고 있다. 또한 타이어 반경 추정치는 가속도 오프셋과는 무관함을 알 수 있다.

5. 결 론

차량속도를 정확하게 추정하기 위해서는 미끄럼이 발생하는 순간부터 미끄러지고 있는 바퀴 각속도 신호에 덜 의존하여야 한다. 미끄러지기 전의 바퀴각속도를 가속도 신호의 오프셋을 정하는데 이용하여 가속도 신호를 보정하고, 미끄럼이 발생하는 순간부터 보정된 가속도 신호를 적분하여 속도추정에 이용하였다. 본 논문에서는 유효타이어 반경과 가속도 오프셋에 민감한 단점이 있는 가중평균/칼만필터법을 개선하여 추정변수를 유효타이어 반경과 가속도 오프셋로 하는 변수추정/가중평균/칼만필터법을 개발하였다. 그 결과 가속도 오프셋이 있을지라도 속도추정값이 제 5바퀴 속도에 매우 근접함을 보여주고 있으며, 그 오차가 전 시험구간 내에서 3% 이내를 유지하고 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 BK21 지역대학육성사업단과 한국과학재단지정 경상대학교 항공기부품기술연구센터(ReCAPT)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) E. Bakker, H. Pacejka, L. Lidner, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE Transactions Journal of Passenger Cars, Vol.98, pp.101-113, 1989.
- 2) M. Uchanski, Road Friction Estimation for Automobiles Using Digital Signal Processing Methods, Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, 2001.
- 3) F. Gustafsson, "Slip-based Tire-road Friction Estimation," Automatica, Vol.33, No.6, pp. 1087-1099, 1997.
- 4) S. Muller, M. Uchanski, J. K. Hedrick, "Robust Identification of the Maximum Tire-Road Friction Coefficient During Braking," XV IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July 21-26, 2002.
- 5) K. Kobayashi, K. Cheok, K. Watanabe, "Estimation of Absolute Vehicle Speed using Fuzzy Logic Rule-Based Kalman Filter," Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington, USA, pp.3086-3090, June 1995.
- 6) A. Daiss, U. Kiencke, "Estimation of Vehicle Speed Fuzzy-Estimation in Comparison with Kalman-Filtering," Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications, pp.281-284, 1995.
- 7) M. Basset, C. Zimmer, G. L. Gissinger, "Fuzzy Approach to the Real Time Longitudinal Velocity Estimation of a FWD Car in Critical Situations," Vehicle System Dynamics, Vol.27 No.5-6, pp.477-489, 1997.
- 8) 오경흠, 송철기, "신경망 회로를 이용한 차량 절대속도 추정," 한국정밀공학회, 제19권 제9호, pp.51-58, 2002.
- 9) 송철기, 황진권, J. K. Hedrick, "퍼지로직을 이용한 차량 절대속도 추정," 한국자동차공학회논문집, 제10권 제1호, pp.179-186, 2002.
- 10) B. D. O. Anderson, J. B. Moore, Optimal Filtering, Prentice Hall, 1979.
- 11) M. H. Hayes, Statistical Digital Signal Processing and Modeling, John Wiley and Sons, Inc., 1996.