

제 5 바퀴속도와 비교한 차량절대속도 추정 알고리즘

황진권*, 송철기**

Estimation of the Absolute Vehicle Speed using the Fifth Wheel

Jin Kwon Hwang*, Chul Ki Song**

ABSTRACT

Vehicle acceleration data from an accelerometer and wheel speed data from standard, 50-tooth antilock braking system wheel speed sensors are used to estimate the absolute longitudinal speed of a vehicle. We develop the four velocity estimation algorithms. And we compare experimental results with the Butterworth filtered speed from the fifth wheel and find that it is possible to estimate absolute longitudinal vehicle speed during a hard braking maneuver lasting three seconds.

Key Words : Fuzzy Logic (퍼지 로직), Absolute Vehicle Speed (차량절대속도), Slip (미끄럼), Velocity Estimator (속도추정기), Fifth wheel (제 5 바퀴), Butterworth filter (Butterworth 필터)

1. 서론

차량의 주요 부품으로 장착되거나 개발되고 있는 장치인 ABS(Anti-locking Brake System), CWS(Collision Warning System), CAS(Collision Avoidance System), AHS(Autonomous Highway System) 등, 속도에 따라 작동되는 장치에는 차량절대속도 추정 알고리즘이 반드시 필요하다. 급발진이나 급제동시에는 바퀴의 미끄럼이 발생하기 때문에, 일반적으로 차량에 장착된 바퀴속도센서로만으로 차량절대속도를 추정할 수 없게 된다. 정확한 차량속도 추정을 위해서는 차량의 네 바퀴 회전속도값 외에 추가적인 센서신호를 활용하는 방법의 개발이 필요할 것이다.

차량절대속도 v 와 각 바퀴의 미끄럼율(slip ratio) λ_i 의 관계식은 아래와 같이 각 바퀴의 각속

도 ω_i , 각 타이어의 반경 r_i 로 표현된다¹.

$$\lambda_i = \frac{v_i - v}{\max(v_i, v)} \times 100 (\%), \quad v_i = r_i \omega_i, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (1)$$

여기서 i 는 차량에서 각 바퀴의 일련번호를 의미한다. 미끄럼율의 부호는 차량추진시(traction mode)에는 양이 되며, 차량제동시에는 음이 된다. 차량이 정상주행조건에서는 바퀴속도센서로부터의 신호가 비교적 정확하고 정상적이므로, 미끄럼율 또한 정상적이고 적은 값을 갖는다. 정상주행조건하에서는 차량절대속도와 노면마찰계수를 정확하게 추정할 수 있어, ABS, CWS, CAS, AHS 등에 잘 적용될 수 있는 반면, 급발진이나 급제동하에서는 추정하기가 쉽지 않다².

미끄럼율은 "Magic Formula Tire Model"에 잘 나

199 2002년 4월 25일 접수
* 2002년 4월 25일 접수
* 2002년 4월 25일 접수
** 경상대학교 기계항공공학부, ReCAPT

타나 있듯이¹, 차량의 가감속도와 관계있는 타이어 종력(longitudinal tire force)에 영향을 주기 때문에 중요하다. Magic Formula 는 타이어의 마찰특성을 규명한 수식으로, 다양한 미끄럼율의 변화에 따른 수직력 성분과 추진방향의 종력과 비율을 실험적으로 개발된 관계식이다. 이 때, 타이어 종력이란 바퀴의 전후 방향의 마찰력으로 가감속의 근본적인 힘성분이 된다. Fig. 1 은 “Magic Formula” 을 사용하여 얻은 것으로써, 여러 노면 조건에서 추진에 따른 타이어 종력과 미끄럼율(가로축)의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 세로축은 일정한 하중에 대한 타이어 종력의 비, 즉 마찰계수를 의미한다. 타이어 종력은 미끄럼율이 커짐에 따라 최대값에 이를 때까지 선형적으로 증가한다. 최대값을 지나고 나면 미끄럼이 증가할수록 타이어 종력이 감소하면서 바퀴가 고정되게(wheel lock-up) 된다. 눈이 있는 노면, 젖은 노면, 정상 노면일 때는 빙판 노면에 비해 각각 약 4 배, 7.5 배, 9 배의 최대 타이어 종력을 갖음을 보여준다. 많은 연구분야와 차량생산품에 이러한 미끄럼율 개념을 사용하고 있으며, 절대속도 추정기로부터 도움을 받고 있다.

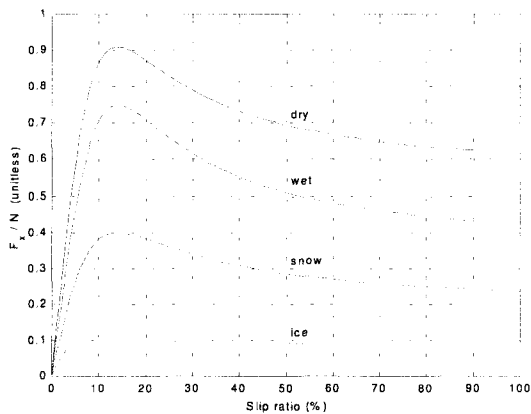


Fig. 1 Slip curve using Magic Formula

특히, 속도추정기는 노면조건 추정에 유용할 수 있다. 예를 들어, Gustaffson² and Yi, Hedrick, and Lee³ 는 최대 타이어/노면 마찰계수(the maximum tire/road coefficient of friction)를 찾기 위한 미끄럼기반 추정기(a slip-based estimator)를 연구하였다. 미끄럼기반 최대마찰계수 추정기를 이용하여 정상

주행에서의 저 미끄럼, 저 타이어 종력 데이터를 사용하여 최대 마찰을 결정하고자 하였다. 그러나 이들은 전형적인 추진상태(in traction)에서만 결과를 예측할 수 있었다. 이는 제동 상태(in braking)에 서보다 추진 상태에서 더 적은 센서량으로 미끄럼 추정기가 필요로 하는 측정량을 얻을 수 있기 때문이다. 일반적으로 이륜구동, 즉 전륜구동 또는 후륜구동 차량에서는, 자유회전 바퀴(free-rolling wheels)의 각속도에 그 바퀴의 반경을 곱함으로써 차량속도 v 을 얻고, 구동 바퀴(driven wheels)의 각속도에 그 바퀴의 반경을 곱함으로써 미끄럼바퀴 속도 v_i 를 얻는다. 반면에, 제동시에는 네바퀴 모두 미끄럼을 하기 때문에 차량속도 v 을 얻기가 어렵다. 따라서 제동시에는 차량속도를 측정하는 별도의 방법이 없다면, 미끄럼율을 계산하기가 어려워지며, 미끄럼기반 최대마찰계수 추정기를 설계할 때 때때로 제동조건이 무시되기도 한다. 주행 데이터만을 사용하는 추정기는 운전자가 구동시보다 제동시 마찰력을 더 많이 이용하기 때문에 약점이 될 수 있으므로, 주행 데이터는 물론 제동 데이터를 동시에 사용하는 추정기가 주행데이터만을 사용하는 추정기보다 더 유용할 수 있을 것이다⁴.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 절대속도추정기를 사용하였으며, 퍼지로직을 이용하여 정상주행조건에서는 물론 급추진이나 급제동에서도 차량속도를 잘 추정하는 새로운 알고리즘을 제시하고 이를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. 측정 센서 및 제 5 바퀴의 장착

차량절대속도는 지면에서 반사되는 밀리미터 파(mm-wave) 레이더 신호나 지구좌표계(global positioning systems)를 이용하여 추정될 수 있지만, 아직까지 연구용 차량이나 고급차량에서만 설치가 가능하다. 본 연구에서는 하나의 가속도계와 ABS 에 사용되는 네 개의 50-tooth 각속도 센서로 구성된 비교적 저렴한 측정센서를 사용하였다. 이 센서로부터 얻는 데이터를 이용하여 구동시는 물론 제동시의 차량 속도를 추정하고자 한다. 특히, 네 바퀴 모두 미끄러지는 제동조건에 집중할 것이다. 별도의 제 5 바퀴를 차량 후미에 장착하여 추정 차량절대속도를 검증 비교할 수 있도록 하였다.

Fig. 2 는 제 5 바퀴를 차량의 후미에 장착한 모습을 보여준다.



Fig. 2 The fifth wheel on the vehicle

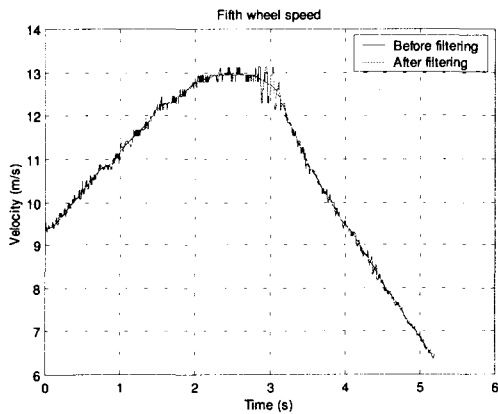


Fig. 3 Butterworth filtering for the fifth wheel speed

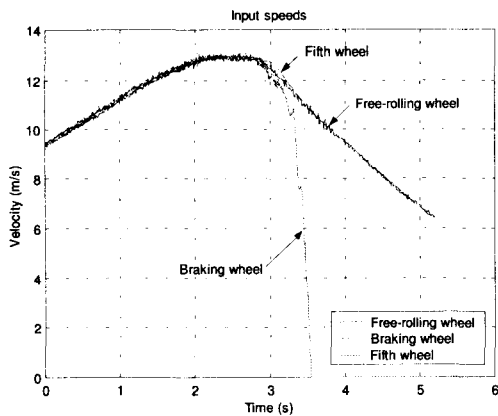


Fig. 4 Wheel speeds

Fig. 3 은 비접촉 타코미터 프로브로 읽혀지는 펄스로 환산되는 순간변화량이 큰(즉, 노이즈를 많이 포함한) 제 5 바퀴속도신호를 Zero-phase Butterworth 디지털 필터로 처리한 결과를 보여준다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 시험차량의 속도를 점차적으로 증가시키다가(Fig. 3 의 약 2.5 초 위치까지) 갑자기 제동하여 차량이 멈추도록 하였다. 이 때의 최대제동가속도는 약 $-0.3g$ 이었다.

본 시험차량에서는 제동력이 전륜 두 바퀴에만 가해지고, 후륜에는 제동력이 가해지지 않도록 제동유압회로를 차단시켜 후륜 두 바퀴가 자유회전바퀴가 되도록 하였다. Fig. 4 는 시험차량을 급감속시켜 제동바퀴가 록킹(locking)되는 현상을 보여주고 있다. 이 때 자유회전바퀴의 주행속도는 제 5 바퀴의 주행속도와 거의 비슷함을 알 수 있다.

Daiß와 Kiencke⁵는 퍼지 칼만 속도추정기(Fuzzy Kalman velocity estimator)와 아래 식으로 표현되는 가중평균속도추정기(weighted average velocity estimator)를 비교하였다.

$$v(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i v_i(k) + w_v (v(k-1) + a(k) \cdot \Delta t)}{\sum_{i=1}^4 w_i + w_v} \quad (2)$$

여기서 $v(k)$ 와 $v(k-1)$ 은 현재와 직전 속도추정치, v_i 는 i 번째 바퀴의 속도추정치, $a(k)$ 는 바이어스가 교정된 가속도신호, Δt 는 샘플링시간간격, w_i 는 퍼지로직으로 구해지는 각 속도별 가중치이며, w_v 는 직전 속도추정치와 가속도 신호에 대한 가중치이다. 즉 식 (2)는 각 바퀴의 속도와 가속도 계로부터 구하는 속도를 가중평균하는 식이다.

3. 차량절대속도추정법

본 논문에서 사용한 차량속도추정기는 네가지 주요 부분, 즉 차량절대속도의 계산, 미끄럼율의 계산, 퍼지로직, 가속도신호의 처리 등으로 구성되어 있다^{6,7}. 개발한 여러 알고리즘을 검증하는 데 사용되는 차량절대속도 v 의 실험값을 얻기 위하여, 속도추정기에 대한 최악의 제동시나리오를 구현할 수 있기 때문에 제동되는 전륜속도를 “바퀴 속도 v_i ”로 하고 자유회전하는 제 5 바퀴의 속도

를 “측정된 차량속도”로 사용하였다.

3.1 가속도 신호의 직접적분

첫번째의 속도추정기는 식 (3)과 같이 각 바퀴속도 $v_i(k)$, 가속도신호로부터 직접 적분가속도신호 $v_a(k)$, 직전의 차량절대속도 $v_{fuz}(k-1)$ 를 가중하여 차량절대속도 $v_{fuz}(k)$ 을 구한다. 여기서 아래 첨자 fuz 는 fuzzy logic에 의한 추정값을 의미한다.

$$v_{fuz}(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i v_i(k) + w_a v_a(k) + w_v v_{fuz}(k-1)}{\sum_{i=1}^4 w_i + w_a + w_v}$$

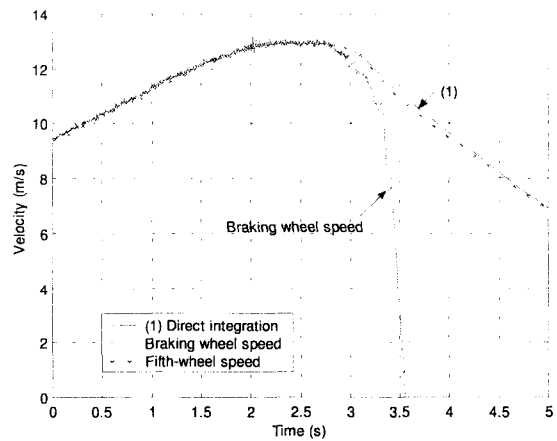
where $v_a(k) = v_o + \sum_{j=1}^k a(j) \cdot \Delta t$ (3)

여기서 Δt 는 샘플링간격 (sampling interval), w_i , w_a 와 w_v 는 각각 i 번째 (보통 $i=1, 2, 3, 4$ 이나 여기서는 한 바퀴만을 사용) 바퀴속도신호, 가속도신호로부터의 적분신호, 직전의 차량절대속도에 대한 가중치이다. $a(j)$ 는 가속도계로부터의 측정된 가속도 신호, v_o 는 적분시의 초기 상수이며, 차량이 정상 주행할 때의 값으로 고정하였다.

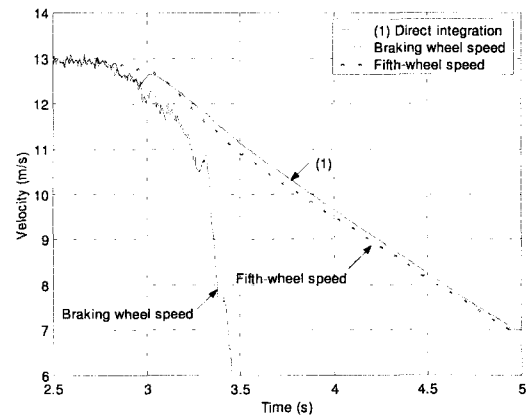
퍼지로그는 미끄럼율의 변화에 따라, 0과 100 사이의 값으로 w_i 를 결정하며, 미끄럼율이 0일 때는 $w_i=100$ 을 가지며, 급제동이나 급발진일 때는 $w_i=0$ 을 갖는다. w_v 는 본 방법에서 100으로 고정하였으며, w_a 는 10으로 고정하였다. 따라서, 바퀴가 자유회전하면 가중치 w_i 는 100이 되어, 퍼지 속도추정기에 100%의 각 바퀴속도 $v_i(k)$, 10%의 직접 적분가속도신호 $v_a(k)$ 과 100%의 직전 차량절대속도 $v_{fuz}(k-1)$ 모두가 기여하게 된다. 반면에, 바퀴가 록킹되면 가중치 $w_i=0$ 이 되어, 퍼지 속도추정기에 적분가속도신호와 직전의 속도성분만이 지배됨으로써 차량절대속도 $v_{fuz}(k)$ 은 적분가속도신호의 1차시스템이 된다.

Fig. 5(a)는 미끄럼이 거의 없는 정상주행조건동안에는(0초와 2.5초 사이) 차량절대속도 추정치와 바퀴속도가 제5바퀴의 속도에 잘 일치하고 있음을 보여준다. 2.5초부터 약간의 제동을 가하기 시작하였으며, 미끄럼이 시작되는 구간에서(2.5초

와 2.9초 사이) 차량절대속도 추정치가 미끄럼이 있는 바퀴속도에 계속 잘 따라가고 있다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 상세 그림이다. $t=3.0s$ 에서 록킹이 시작되어 바퀴의 미끄럼율이 매우 커졌다. 이때부터 퍼지로그는 바퀴신호에 더 적은 가중치가 할당되고 가속도 신호의 가중치에 주로 의존하게 된다. 이 측정에서의 적분가속도신호에 오프셋이 거의 포함되어 있지 않아 가속도 신호의 직접적분법에 의한 차량절대속도 추정치가 제 5 바퀴속도에 근접함을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Estimated vehicle speed using the “direct integration”

3.2 가속도신호의 단계적분

두번째의 속도추정기는 아래 식과 같이 각 바퀴속도 $v_i(k)$, 현재의 가속도신호 $a(k)$ 와 직전의 차량절대속도 $v_{fuz}(k-1)$ 를 가중하여 차량 절대속도 $v_{fuz}(k)$ 을 구한다.

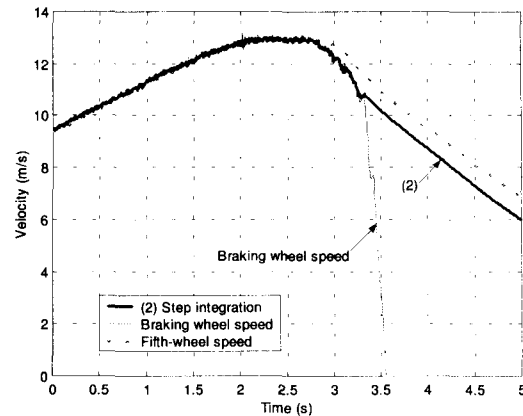
$$v_{fuz}(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i v_i(k) + w_v (v_{fuz}(k-1) + a(k) \cdot \Delta t)}{\sum_{i=1}^4 w_i + w_v} \quad (4)$$

앞 절에서와 마찬가지로 w_i 는 퍼지로지적으로 얻는 가중치이며, w_v 는 고정된 가중치이다. w_i 가 작은 값일 때는 w_v 가 상대적으로 더 중요한 역할을 하며, w_i 가 큰 값일 때는 w_v 가 상대적으로 덜 중요한 역할을 한다. 가속도 신호는 단계별 적분이 되어 가중치 w_v 에 곱하여진다.

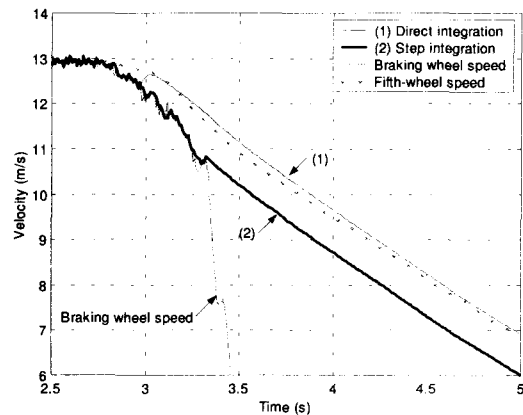
Fig. 6은 단계적분법을 이용하여 얻은 결과이며, Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 상세 그림이다. 미끄럼이 적을 때(0-3.0 초) 차량절대속도의 추정치는 바퀴속도를 잘 따라가고 있다. 그러나, 바퀴가 록킹이 시작되어 미끄럼이 커지면, 차량절대속도의 추정치는 가속도신호에 의존하게 된다. 직접적분 추정기와 마찬가지로 미끄럼이 끝 때 가속도신호의 단위증분에 의존하기 때문에 측정된 속도신호에 거의 평행하게 추정하고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 두 적분법의 추정오차를 비교하는 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 오프셋이 거의 없는 가속도신호의 직접적분법에 의한 차량속도 추정치 결과보다 오히려 나쁜 결과를 얻었음을 볼 수 있다.

3.3 속도재계산 후의 직접적분법과 단계적분법

3.1 절의 결과보다 더욱 좋은 추정결과를 얻기 위해 속도성분을 재계산하는 방법을 적용하였다. 식 (5)으로부터 차량제동시와 차량추진시의 바퀴속도를 재계산할 수 있으며, 이 재계산된 바퀴속도를 직접적분법과 단계적분법에 대입하여 식 (6)과 식 (7)과 같이 차량절대속도 $v_{fuz}(k)$ 를 구한다.



(a)



(b)

Fig. 6 Estimated vehicle speed using “step integration”

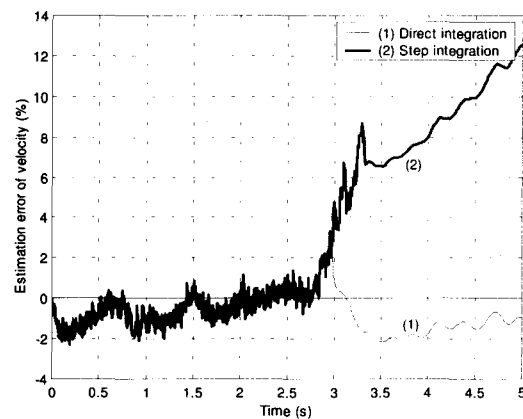


Fig. 7 Estimated errors of two integration methods

$$v_{re_i}(k) = \frac{v_i(k)}{1 + \lambda_i(k)} \quad \text{during braking}$$

$$v_{re_i}(k) = (1 - \lambda_i(k)) \cdot v_i(k) \quad \text{during traction} \quad (5)$$

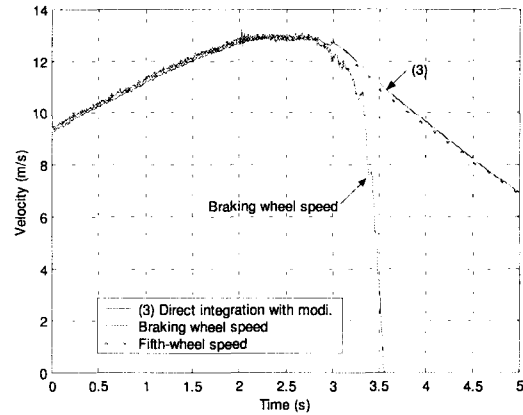
$$v_{fuz}(k) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^4 w_i v_i(k) + \sum_{i=1}^4 w_i' v_i'(k) + \\ w_a v_a(k) + w_v v_{fuz}(k-1) \end{array} \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^4 w_i + \sum_{i=1}^4 w_i' + w_a + w_v \right\} \quad (6)$$

$$v_{fuz}(k) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^4 w_i v_i(k) + \sum_{i=1}^4 w_i' v_i'(k) + \\ w_v (v_{fuz}(k-1) + a(k) \cdot \Delta t) \end{array} \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^4 w_i + \sum_{i=1}^4 w_i' + w_v \right\} \quad (7)$$

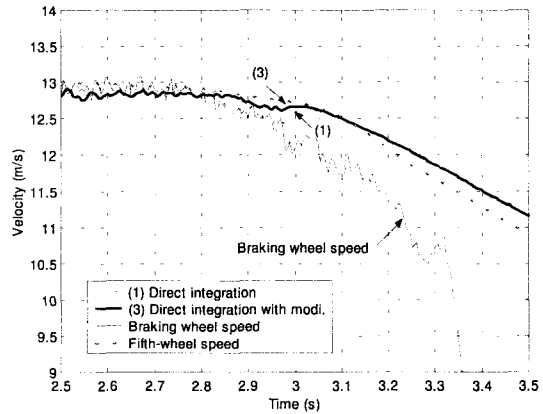
재가중치 w_i' 는 재계산된 v_i' 에 따라 새롭게 추가된 퍼지로그적으로 얻는 가중치이다.

Fig. 8은 직접적분법과 속도재계산후의 직접적분법으로 얻는 결과를 비교한 것이다. Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 상세 그림이다. 미끄럼이 적을 때(0-2.9 초)는 두 방법에 의한 차량절대속도 추정치는 제 5 바퀴속도를 잘 따라가고 있다. 그러나 미끄럼이 커지면(2.9 초 이후), 미끄럼이 일어나는 바퀴속도에 대한 가중치 w_i 가 영에 가까워져서 바퀴 속도 v_i 에 대한 기여도는 무시되지만 재계산된 바퀴속도 v_i' 와 이에 상응하는 재가중치 w_i' 는 가속도 신호와 함께 차량절대속도의 추정치에 기여하게 된다. 따라서 이 구간에서는 속도재계산에 의한 속도추정치에 더 정확한 값을 가지게 된다. 3.0 초 이후 가속도 신호에 더 의존하게 되면 두 속도 추정법의 차이는 거의 나타나지 않게 된다.

Fig. 9는 속도재계산 전후의 두 로직 결과를 비교한 상세그림으로 2.9 초 부근에서 속도재계산법에 의한 속도 추정 오차가 특히 적어짐을 볼 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 속도재계산후 직접적분법과 단계적분을 비교한 그림이다. 미끄럼이 커지는 2.9 초 부근에서는 속도재계산후 직접적분법이 유리하지만, 바퀴의 록킹이 발생하는 시간(3.3 초 이후)부터는 오히려 속도재계산후 단계적분법이 유리함을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 The “direct integration” with modified logic

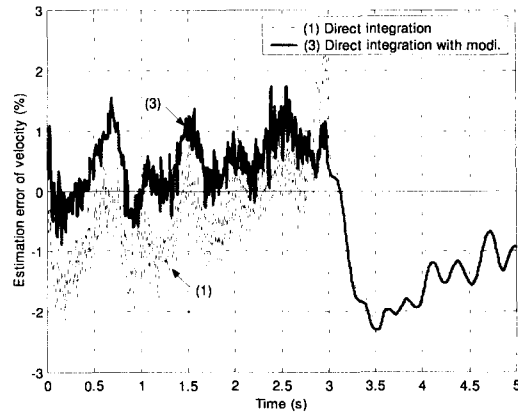
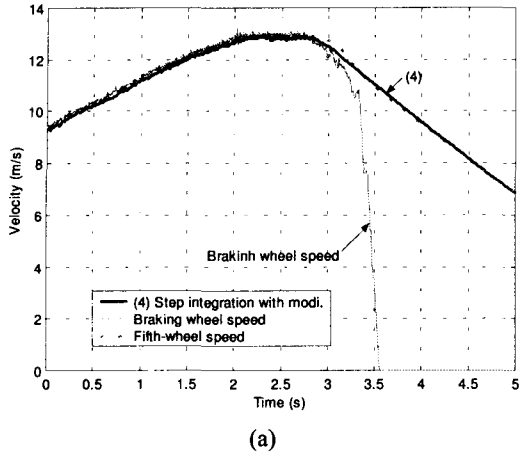
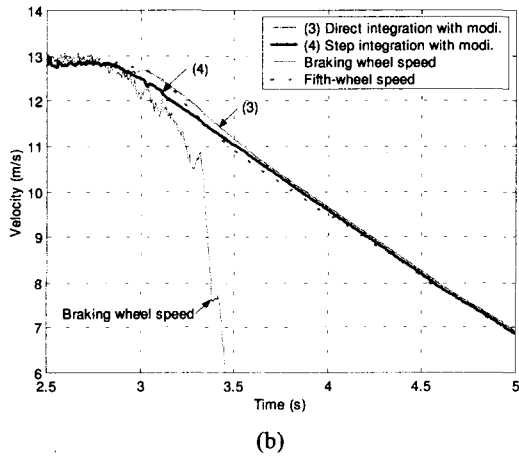


Fig. 9 Estimation errors of two direct integrations



(a)



(b)

Fig. 10 The “step integration” with modified logic

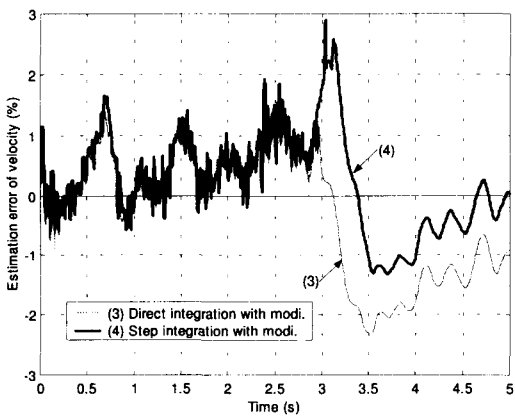


Fig. 11 Estimation errors of two modified logics

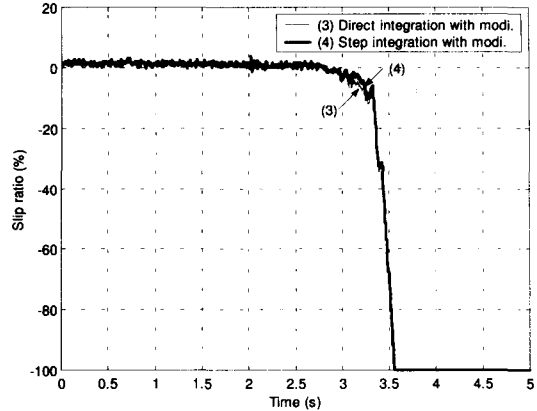


Fig. 12 Estimated slip ratios of two modified logics

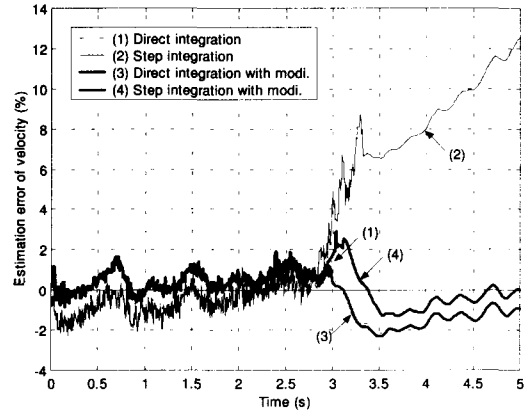


Fig. 13 Estimated errors of four modified logics

Fig. 12 는 속도재계산의 두 방법에 의해 추정되는 미끄럼율(식 (1))을 보여 준다. Fig. 13 은 네로직에 대한 속도추정오차를 나타낸 그림으로 급제동이 3 초 이상 지속되는 상황 하에서도 속도재계산법을 사용하여 추정하면 차량절대속도를 3% 오차 내 추정할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

타코미터를 통해 측정되는 제 5 바퀴의 속도는 Butterworth 디지털 필터를 사용하여 잘 보정할 수 있었다. 미끄럼이 발생하고 있는 바퀴속도를 미끄럼율로 재계산함으로써 차량속도를 추정하면 적은 데이터량으로 정확히 추정할 수 있다. 바퀴측정속도만을 사용하는 경우의 속도추정 알고리즘으로

추정한 결과와 제안된 알고리즘으로 추정한 차량 속도를 실험적으로 비교하여 이 알고리즘의 유용성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 지정 경상대학교 항공기부품기술연구센터(ReCAPT)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bakker, E., Pacejka, H., Lidner, L., "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE Transactions Journal of Passenger Cars, Vol. 98, pp. 101-113, 1989.
2. Gustafsson, F., "Slip-based tire-road friction estimation," Automatica, Vol. 33, No. 6, pp. 1087-99, June 1997.
3. Yi, Kyongsu, Hedrick, J. K. and Lee, Seong-Chul, "Estimation of Tire-Road Friction Coefficients Using Observer Based Identifiers," Vehicle System Dynamics, 31, pp. 233-261, 1999.
4. 오경흡, 송철기, "신경망 모델을 이용한 차량절대속도 추정," 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 9 호 pp. 51-58, 2002.
5. Daiß, A. and Kiencke, U., "Estimation of Vehicle Speed Fuzzy-Estimation in Comparison with Kalman-Filtering," Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications, pp. 281-284, 1995.
6. 송철기, 황진권, J. Karl Hedrick, "퍼지로직을 이용한 차량절대속도 추정," 한국자동차공학회논문집, 제 10 권, 제 1 호, pp. 179-186, 2002.
7. Song, Chul Ki, Uchanski, Michael and Hedrick, J. Karl, "Vehicle Speed Estimation Using Accelerometer and Wheel Speed Measurements," Automotive & Transportation technology Congress, July 9-11, 2002.