

## 퍼지로직을 이용한 차량절대속도 추정 Absolute Vehicle Speed Estimation using Fuzzy Logic

송철기\*, 황진권\*\*, J. K. Hedrick\*\*\*  
Chul Ki Song, Jin Kwon Hwang, J. Karl Hedrick

### ABSTRACT

The absolute longitudinal speed of a vehicle is estimated by using vehicle acceleration data from an accelerometer and wheel speed data from standard 50-tooth antilock braking system wheel speed sensors. An intuitive solution to this problem is, "When wheel slip is low, calculate absolute velocities from the wheel speeds; when wheel slip is high, calculate absolute velocity by integrating the accelerometer." Fuzzy logic is introduced to implement the above idea and a new algorithm of "modified velocities with step integration" is proposed. This algorithm is verified experimentally to estimate speed of a vehicle, and is also shown to estimate absolute longitudinal vehicle speed with a 6% worst-case error during a hard braking maneuver lasting three seconds.

주요기술용어 : Fuzzy logic(퍼지 로직), Absolute vehicle speed(차량절대속도), Slip(미끄럼), Velocity estimator(속도추정기)

### 1. 서론

추돌경보장치(CWS, Collision Warning System), 추돌회피장치(CAS, Collision Avoidance System) 이나 자동화고속도로시스템(AHS, Automated Highway System) 등과 같은 선진안전차량이나 ABS (Anti-locking braking system) 에 정확한 차량절대속도를 필요로 한다. 이러한 차량절대속도를 추정하는 방법으로 가속도신호와 네바퀴 각속도를 이용한 퍼지로직(Fuzzy logic)과 칼만필터링

(Kalman filtering)이 많이 응용되고 있다.<sup>1,2)</sup> 미끄럼률이 클수록 차량절대속도 추정의 신뢰도가 낮아진다. 미끄럼률과 차량절대속도에 대하여, 타이어 모델을 이용한 뉴럴네트워크(Neural-network),<sup>3)</sup> 바퀴하중, 제동압력과 각속도를 이용한 추정법,<sup>4)</sup> 엔진속도, 캐리어속도와 바퀴각속도를 가진 차량모델법<sup>5)</sup> 등이 연구되어 왔으나, 이들은 많은 데이터량을 요구하며, 과도한 미끄럼이 있는 급제동이나 급추진시 상대적으로 많은 오차를 유발하는 문제점이 있다.

차량절대속도  $v$ 와 각 바퀴의 미끄럼률  $\lambda_i$ 의 관계식은 아래와 같이 각 바퀴의 각속도  $\omega_i$ , 각 타이어의 반경  $r_i$ 로 표현된다.<sup>6)</sup>

\* 회원, 경상대학교 기계항공공학부

\*\* 회원, 한경대학교 제어계측학과

\*\*\* Dept. of Mechanical Engineering, UC Berkeley

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

(i=1,2,3,4)

미끄럼률의 부호는 차량추진시 (traction mode)에는 양이 되며, 차량제동시에는 음이 된다. 차량이 정상주행조건에서는 바퀴속도센서로부터의 신호가 비교적 정확하고 정상적이므로, 노면마찰계수 또한 정상적이고 적은 값을 갖는다. 정상주행조건하에서는 차량절대속도와 미끄럼률을 정확하게 추정하여, ABS, CWS, CAS, AHS 등에 잘 적용될 수 있는 반면, 급발진이나 급제동하에서는 쉽게 추정될 수 없다.<sup>7)</sup>

이 논문에서는 퍼지로직을 이용하여 정상주행조건에서는 물론 급추진이나 급제동에서도 차량절대속도를 잘 추정하는 새로운 알고리즘을 제시하고 이를 실험적으로 검증한다.

## 2. 가중평균속도추정기

차량절대속도를 측정하기 위해서는 지표면에 반사되는 레이더 신호 또는 지구좌표계(GPS, global positioning systems)를 이용할 수도 있지만, 이러한 방법들은 연구용 차량이나 고급차에서만 가능할 것이다. 본 연구에서는 일반 차량에서 저가로 구현할 수 있는 가속도계와 ABS 바퀴속도센서를 사용하였다. 가속도계로부터의 가속도신호를 이용한 차량절대속도  $v$ 의 추정은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{v} = a + w$$

여기서,  $a$ 는 바이어스 오차(bias error)를 필터링으로 제거한 가속도신호이며,  $w$ 는 “프로세스 잡음(process noise)”이다. 또한, 측정되는 바퀴각속도  $v_i$ 를 이용한 차량절대속도  $v$ 는 아래와 같이 나타내어진다.

$$v_i = v + n$$

여기서,  $n$ 은 노면 미끄럼에 기인되는 바이어스 오차를 포함하는 “측정잡음(measurement noise)”이다. Dai β와 Kiencke<sup>1)</sup>는 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 바이어스  $w_i$ 가 교정된 가속도신호,  $\Delta t$ 는 추정간격,  $w_i$ 는 퍼지로직으로 구해지는 각 속도별 가중치이며,  $w_v$ 는 직전 속도추정치와 가속도 신호에 대한 가중치이다.

## 3. 차량절대속도추정법

차량절대속도를 구하는 직관적이고 효과적인 방법은 “바퀴의 미끄럼(slip)이 적을 때에는 바퀴각속도데이터에 의존하고, 바퀴의 미끄럼이 클 때에는 차량가속도데이터를 적분한 속도에 의존하는” 것이다. 퍼지로직을 이용하면, 미끄럼이 크고, 보통이고, 또는 적다는 등 문장으로 표현되는 계산법칙을 수치적인 해로 효과적으로 변환할 수 있으므로, 본 논문에서는 Dai β와 Kiencke<sup>1)</sup>가 사용한 것과 유사한 방법의 퍼지 로직을 사용하였다.

Fig. 1은 본 논문에서 사용한 차량속도추정기에 대한 간략도이다. 이 추정기는 아래와 같은 네 가지 주요 부분으로 구성되어 있다.

1) 차량절대속도계산 : 차량절대속도는 가속도신호를 적분한 속도와 측정된 각 바퀴속도의 가중평균치로 구해진다. 각 바퀴속도에 대한 가중치는 퍼지로직 블록에서 각 바퀴의 노면마찰계수에 따라 구해진다. 가속도신호를 적분한 속도에 대한 가중치는 일정한 상수로 정하였으나, 각 바퀴속도에 대한 가중치가 변함에 따라 상대적 중요도가 커지기도 하고 적어지기도 한다.

2) 미끄럼률의 계산 : 각 바퀴속도신호에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여,  $i$ 번째 바퀴의 미끄럼

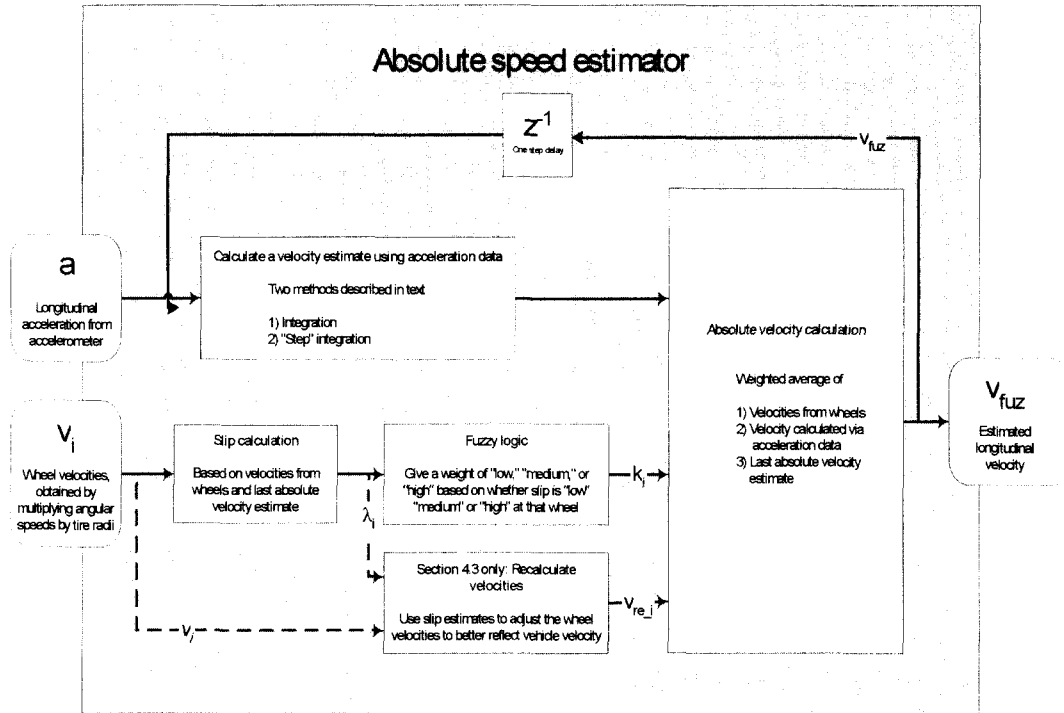


Fig. 1 Schematic diagram for estimation of the real vehicle speed and the slip ratios

를  $\lambda_i(k)$ 는 아래 식과 같이 직전의 차량절대속도  $v_{fuz}(k-1)$ 와  $i$ 번째 바퀴속도  $v_i(k)$ 로 계산된다.

$$\lambda_i(k) = \frac{v_i(k) - v_{fuz}(k-1)}{\max(v_i(k), v_{fuz}(k-1))} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

3) 퍼지로직 : 퍼지로직은 미끄럼률로부터 각 바퀴속도에 대한 가중치를 계산한다. Fig. 2는 입

력변수에 대한 퍼지화(fuzzyfication)를 보여준다. 여기서, 미끄럼률의 수치적 값을 다섯 개의 문자 변수 - 급제동, 정상제동, 보통, 정상발진, 급발진 - 중 하나로 변환하여 사용한다. Fig. 3은 식(2)의 가중평균속도를 구하는 데 쓰이는 가중치를 얻기 위한 디퍼지화(defuzzyfication)를 보여주며, 세 개의 문자변수 - 저, 보통, 고 - 로부터 수치적

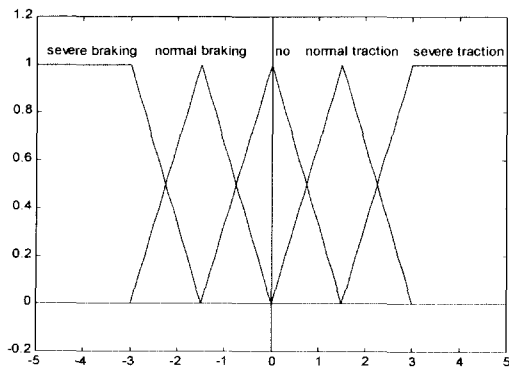


Fig. 2 Fuzzyfication of wheel slip data

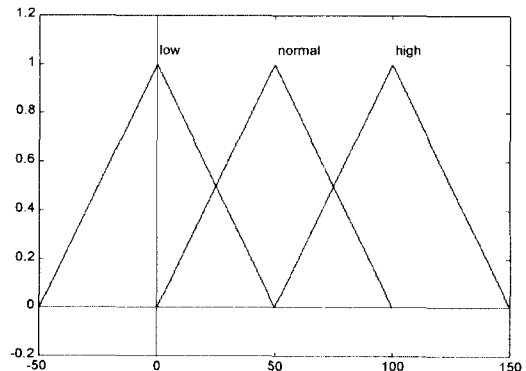


Fig. 3 Defuzzyfication to obtain weights

Table 1 Summary of fuzzy logic used to obtain weights of the wheels as a function of their slips

|                       | If a wheel has a slip that indicates... |                |      |                 |                 |
|-----------------------|---|----------------|------|-----------------|-----------------|
|                       | severe braking                          | normal braking | No   | normal traction | severe traction |
| ...then its weight is | low                                     | Normal         | high | Normal          | Low             |

값으로 변환시킨다. Table 1은 각 바퀴속도의 가중치를 미끄럼률의 함수로 변환시키는 문자화법칙을 나타낸 표이다.

4) 가속도신호의 처리: 가속도신호로부터 속도신호를 얻는데 두 종류의 방법으로 구별하였다. 하나는 “직접적분(direct integration)”이고, 다른 하나는 “단계적분(step integration)”이다.

다음에 전개되는 3절은 Fig. 1의 속도추정기 구조에 포함된 방법들을 나타낸 것으로 각각 실험으로 검증하였다. 3.1절은 각 바퀴속도신호에 대한 가중평균치와 “직접적분”된 가속도신호를 사용함으로써 구한 속도추정 결과를 보여준다. 가속도신호를 “직접적분”할 때 발생하는 편차 특성 때문에 이 방법은 성공적이지 못하였으며, 3.2절에 보여주는 바와 같이 다른 가속도신호처리 방법으로 발전되었다. “단계적분”으로 명명된 이 방법으로 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 끝으로, 3.3절에서는 각 바퀴속도를 미끄럼률로 보정하는 새로운 추정기를 사용함으로써 더욱 향상된 차량절대속도 추정결과를 얻을 수 있었다.

3.1절, 3.2절, 3.3절에 보여주는 속도추정 결과는 시험차량에 장착된 바퀴속도센서와 가속도계로부터의 신호를 입력신호로 사용한 실험 결과들이다. 시험주행은 평지의 젖은 포장도로에서 제동하면서 얻은 결과이며, 처음에는 제동페달에 약한 압력을 가하다가, 바퀴가 록킹(locking) 될 때까지 5초 이상동안 제동압력을 증가하면서 수행하였다.

본 논문에서 개발한 여러 알고리즘을 검증하는데 사용되는 차량절대속도  $v$ 의 실험값을 얻기 위하여, 전륜에만 제동력이 걸리도록 하고 후륜

은 제동유압을 차단하여 자유롭게 회전하도록 하였다. 다음의 세가지 이유에 근거하여, 제동되는 전륜속도를 “바퀴속도  $v_i$  (wheel speed)”로 하고 자유회전하는 후륜속도를 “측정된 차량속도  $v_{measured}$  (measured speed)”로 사용하였다. 첫째, 바퀴속도와 측정된 차량속도에 대한 직접적인 관계를 얻을 수 있기 때문에 실험결과를 얻기 용이하다. 둘째로 이러한 접근으로 속도추정기에 대한 최악의 제동시나리오를 구현할 수 있다. 최악의 경우라 하면 한 바퀴만 먼저 록킹된 후 이어 다른 바퀴들이 순차적으로 록킹되는 경우를 말할 수 있으며, 이 경우에는 가속도신호 외에 어느 신호도 속도추정기에 의미가 없어지게 된다. 셋째로, 전륜속도만을 “바퀴속도  $v_i$ ”로 사용하면 가중평균속도추정기(estimator)와 관측기(observer) 사이의 관계를 쉽게 파악할 수 있다.

### 3.1 가속도 신호의 “직접적분”(“Direct integration” of acceleration signal)

첫 번째의 속도추정기는 아래 식과 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.

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

where,  $v_a(k) = v_0 + \sum_{j=1}^k a(j) \cdot \Delta t$  (4)

여기서,  $\Delta t$ 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 가속도신호,  $v_0$ 는 적분시의 초기 상수이며, 차량이 자유회전 (free-rolling)할 때의 값으로 고정하였다.

퍼지로직은 미끄럼률의 변화에 따라, 0과 100 사이의 값으로  $w_i$ 를 결정하며, 미끄럼률이 0일 때는  $w_i=100$ 을 가지며, 급제동이나 급발진일 때

는  $w_i=0$ 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  $w_a(k)$ 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. 4(a)은 미끄럼이 거의 없는 정상주행조건 동안에는 (0초와 4초 사이) 차량절대속도 추정치가 바퀴속도에 잘 일치하고 있음을 보여준다.  $t=4s$ 에서 약간의 제동을 가하였으며, 미끄럼이 적은 구간에서 (4초와 6.7초 사이) 차량절대속도

추정치가 바퀴속도에 계속 잘 따라가고 있다.  $t=6.7s$ 에서 - Fig. 4(b)에서 더 자세히 볼 수 있다 - 전륜은 록킹이 시작되어 바퀴의 미끄럼이 매우 커졌다. 이때부터 퍼지로직은 바퀴신호에 더 적은 가중치가 할당된다. 짧은 변환구간 후에는 ( $t=6.7s$  -  $t=6.9s$ ) 차량절대속도는 적분가속도신호(Integrated acceleration)를 따라 가고 있다.

그러나, 적분시간이 길어질수록 누적되는 가속도신호의 오프셋 오차 때문에 이 적분가속도신호는 시간이 경과할수록 실제속도와 더 차이가 나게 된다. 그래서 가속도신호를 처리하는 새로운 방법을 찾게 되었다.

### 3.2 가속도신호의 “단계적분”(“Step integration” of acceleration signal)

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

$$v_{fuz}(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i v_i(k) + w_v (v_{fuz}(k-1) + a(k) \cdot \Delta t)}{\sum_{i=1}^4 w_i + w_v} \quad (5)$$

앞 절에서와 마찬가지로  $w_i$ 는 퍼지로직으로 얻는 가중치이며,  $w_v$ 는 고정된 가중치이다.  $w_i$ 가 적은 값일 때는  $w_v$ 가 상대적으로 더 중요한 역할을 하며,  $w_i$ 가 큰 값일 때는  $w_v$ 가 상대적으로 덜 중요한 역할을 한다. 가속도신호는 단계별 적분이 되어 가중치에 곱하여진다.

Fig. 5(a)는 3.1절에서와 같은 방법으로 얻는 결과를 보여준다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 상세 그림이다. 미끄럼이 적을 때 (0 - 6.7 초) 차량절대속도의 추정치는 바퀴속도를 잘 따라가고 있다. 그러나, 바퀴가 록킹이 시작되어 미끄럼이 커지면, 차량절대속도의 추정치는 가속도신호에 의존하게 된다. 직접적분 추정기와 마찬가지로 미끄럼이 클 때는 가속도계에 의존하기 때문에 여전히 측정된 속도신호와 차이를 갖고 있다. 그러나, Fig. 6에서 보는 바와 같이 직접적분의 결과보다

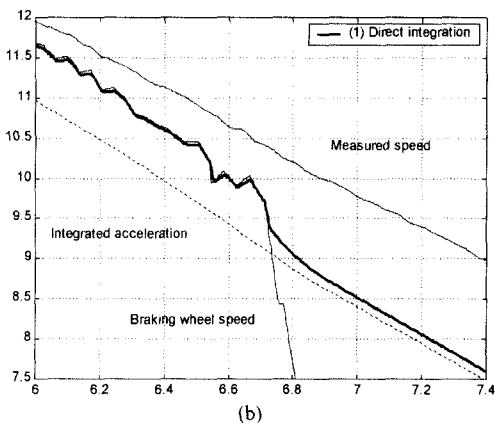
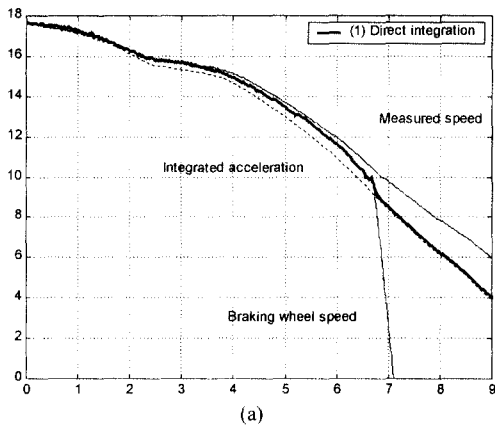


Fig. 4 Estimated vehicle speed using the “direct integration”

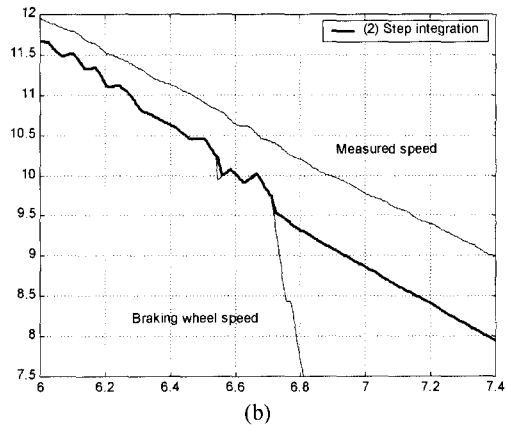
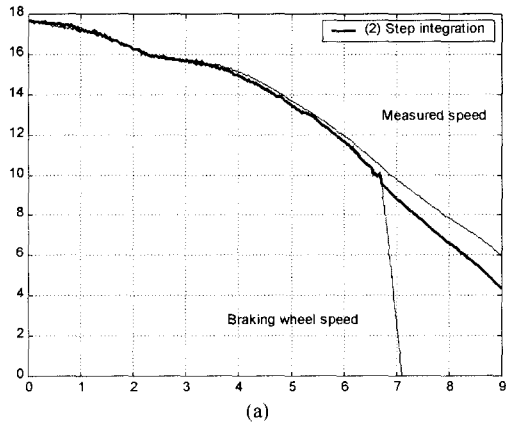


Fig. 5 Estimated vehicle speed using “step integration”

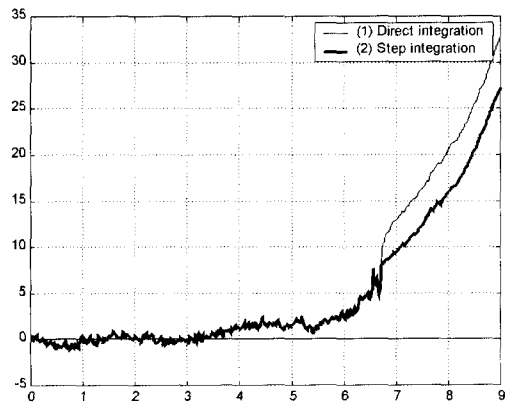


Fig. 6 Estimation errors vs. time of “direct integration” and “step integration”

는 속도추정 오차량이 훨씬 줄어들었음을 알 수 있다.

### 3.3 속도재계산(Modified velocities with step integration)

3.2절의 결과보다 더욱 좋은 추정결과를 얻기 위해 속도성분을 재계산하는 방법을 새로이 제안하였다. 식(1)로부터, 바퀴속도를 재계산할 수 있으며, 세 번째의 속도추정기는 이 재계산된 바퀴속도를 포함시켜 식(8)과 같이 차량절대속도  $v_{fuz}(k)$ 를 구한다.

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

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

$$v_{fuz}(k) = \left\{ \sum_{i=1}^4 w_i v_i(k) + \sum_{i=1}^4 w_{re\_i} v_{re\_i}(k) + w_v (v_{fuz}(k-1) + a(k) \cdot \Delta t) \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^4 w_i + \sum_{i=1}^4 w_{re\_i} + w_v \right\} \quad (8)$$

재가중치  $w_{re\_i}$ 는 재계산된  $v_{re\_i}$ 에 따라 새롭게 추가된 퍼지로그직으로 얻는 가중치이다.

Fig. 7(a)는 앞의 두 절에서와 방법으로 얻는 결과를 보여준다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 상세 그림이다. 미끄럼이 적을 때 (0-6.7 초) 차량절대속도의 추정치는 바퀴속도를 잘 따라가고 있다. 그러나, 바퀴가 록킹이 시작되어 미끄럼이 커지면 (6.7-7.1 초), 가중치  $w_i$ 는 영에 가까워져서 바퀴속도  $v_i$ 에 대한 기여도는 무시되지만 재계산된 바퀴속도  $v_{re\_i}$ 와 이에 상응하는 재가중치  $w_{re\_i}$ 는 가속도 신호와 함께 차량절대속도의 추정치에 기여하게 된다. 바퀴의 록킹이 완료되면 (7.1초 이후) 이때부터 차량절대속도의 추정치에 가속도 신호만이 의존하게 된다.

Fig. 8은 세 로직의 결과를 비교한 상세그림으로 급제동시에 새로이 제안된 속도재계산법을 적용했을 때 차량절대추정이 가장 우수함을 알 수 있다.

Fig. 9는 세 로직에 대한 속도추정오차를 나타낸 그림으로 급제동이 3초 이상 지속되는 상황에서 차량절대속도를 6% 오차 내 추정할 수 있음을 확인하였다. 다른 두 방법에 비교하여 10

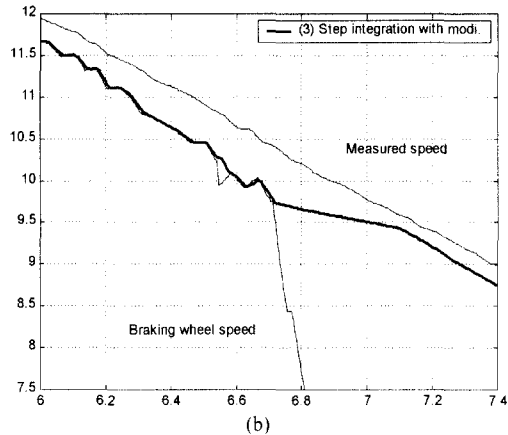
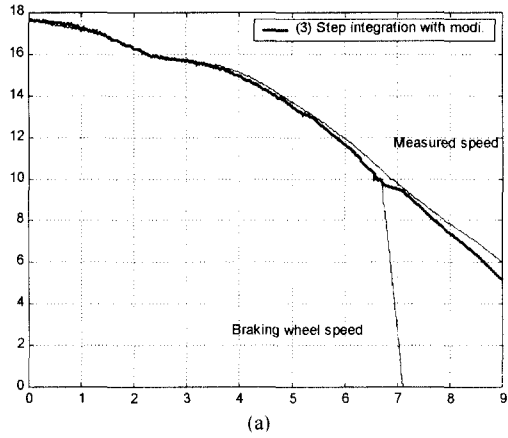


Fig. 7 The "step integration" with modified logic

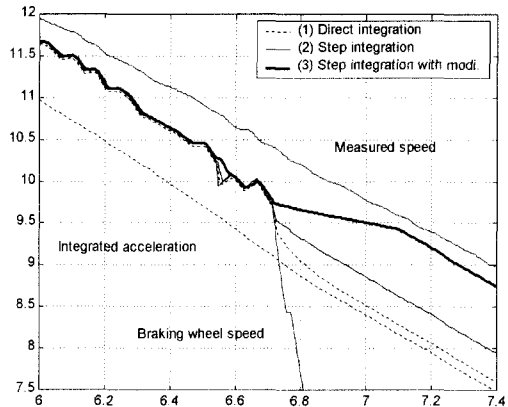


Fig. 8 Estimated speed of three logics

% 이상의 속도추정오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 급제동시 측정된 속도를 거의 일정

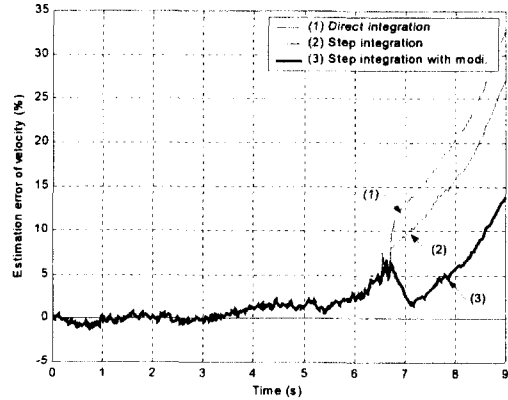


Fig. 9 Estimation errors of three logics

한 차이로 추정해갈 때 속도추정오차율의 분모 성분이 되는 차량의 절대속도가 감소함에 따라 속도추정오차율은 점점 커질 수밖에 없다.

#### 4. 결론

퍼지로직을 적용하여 차량의 급제동이나 급추진시에도 차량속도를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 단계별 가속도신호 적분법과 미끄럼률에 따라 재계산되는 바퀴속도를 사용하는 방법으로 적은 데이터량으로 차량절대속도를 정확히 추정할 수 있다. 바퀴측정 속도만을 사용하는 경우의 속도추정 알고리즘으로 추정한 결과와 제안된 알고리즘으로 추정한 차량속도를 실험적으로 비교하여 이 알고리즘의 유용성을 검증하였다.

#### 후 기

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구지원비와 한국과학재단 지정 항공기부품기술 연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1) A. Dai  $\beta$ , 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.
- 2) K. Kobayashi, K. Cheok, K. Watanabe, "Estimation of Absolute Vehicle Speed using Fuzzy Logic Rule-Based Kalman Filter," Proceeding of the American Control Conference, Seattle, Washington, pp.3086-3090, 1995.
  - 3) U. Kiencke, A. Daiss, "Estimation of Tyre Friction for enhanced ABS-Systems," Proceedings of AVEC '94, International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp.515-520, 1994.
  - 4) W. Pasterkamp, H. Pacejka, "The Tyre as a Sensor to Estimate Friction," Proceedings of AVEC '96, International. Symposium on Advanced Vehicle Control, pp.839-853, 1996.
  - 5) Kyongsu Yi, J. K. Hedrick, Seong-Chul Lee, "Estimation of Tire-Road Friction Coefficients Using Observer Based Identifiers," Vehicle System Dynamics 31, pp.233-261, 1999.
  - 6) 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.
  - 7) F. Gustafsson, "Slip-Based Tire-Road Friction Estimation," Automatica, Vol.33, No.6, pp.1087-1099, 1997.