

슬립률을 이용한 상용차용 공압식 브레이크 기반 ABS 알고리즘 개발

김자유* · 권백순** · 이경수***,†

Anti-lock Braking System for Commercial Vehicles
with Pneumatic Brake System by Using Slip Ratio

Jayu Kim*, Baeksoon Kwon**, Kyongsu Yi***,†

Key Words : Anti-lock braking system(미끄럼방지 제동장치), Slip ratio(미끄럼율), Pneumatic brake(공압식 브레이크), Commercial vehicle(상용차)

ABSTRACT

This paper presents an anti-lock braking system for commercial vehicles with pneumatic brake system by using slip ratio. By virtue of system reliability, most commercial vehicles adopt pneumatic brake system. However, pneumatic brake systems control is more difficult than hydraulic systems due to a longer time delay and the system nonlinearity. One of the major factors in generating braking forces is the wheel slip ratio. Accordingly, the proposed ABS strategy employs the slip ratio threshold-based valve on/off control. This threshold-based algorithm is simple but effective to control the pneumatic brake systems. The control performance of the proposed algorithm has been validated via simulation studies using MATLAB/Simulink and Trucksim. The results show ABS by using slip ratio reduces the braking distance and improves vehicle control.

1. 서론

ABS(Anti-lock Braking System)는 급제동 시 미끄러짐을 방지하여 안전성을 향상시킨다. 휠의 잠기는 현상(locking)은 타이어와 노면의 마찰력을 감소시키고, 조향성을 잃게 하여 큰 사고를 유발한다. 현재 대부분의 ABS 알고리즘은 휠의 각가속도를 통해 제어된다.⁽¹⁾ 각가속도는 Kalman Filter를 이용해 계산해야 한다.⁽²⁾ 휠의 각가

속도의 한계점에 따라 브레이크 챔버의 압력을 높여주는 Building, 유지하는 Holding, 낮춰주는 Exhausting 과정을 거친다. 하지만, 제동력은 수직 항력, 슬립률 그리고 노면 마찰 계수 3개의 변수로 이루어진 함수로 휠의 각가속도와 직접적인 영향이 없다.⁽³⁾ 위의 변수 중 수직 항력과 마찰계수는 제어할 수 없으므로, 본 논문에서는 슬립률을 제어하는 3가지 버전을 제안하고자 한다.

슬립률은 차량의 속도와 휠의 속도로 이루어졌기 때문에 직접적으로 제어할 수 없다. 따라서, 공압식 브레이크의 기본 제어 방법인 Building, Holding, Exhausting으로 슬립률을 간접적으로 제어하고자 한다. Building 과정에서는 브레이크의 챔버 압력이 증가하므로 휠속이 급격히 감소한다. 따라서 슬립률은 증가하게 되고, Exhausting 과정에서는 챔버 압력이 감소하여 슬립률은 증가하게

* 서울대학교 차량 동역학 및 제어 연구실, 학생

** 서울대학교 차량 동역학 및 제어 연구실, 박사후 연구원

*** 서울대학교 기계항공공학부, 교수

†교신저자 : kyi@snu.ac.kr

E-mail : rlawkdb122@snu.ac.kr

된다. Holding은 챔버의 압력이 유지되므로 상대적으로 슬립률이 유지된다. 이 3가지 밸브 제어를 통해 슬립률을 간접적으로 제어함으로써 잠김 현상을 방지하고자 한다.

차량의 속도를 정확히 측정하기 위해서는 GPS 장치가 필요하다. 그러나 이는 실제로 상용화를 할 수가 없으므로, 속도 또한 추정해야 한다. 가속도 센서가 있을 때와 없을 때의 속도 추정방법을 선행논문을 통해 구현하고, 보완해서 로직에 적용해보려고 한다. 마지막으로, Trucksim 소프트웨어를 통해 고속에서 급정지하는 상황을 시뮬레이션 하고자 한다.

2. Anti-lock braking system 모델링

2.1. ABS Overall Structure

ABS의 전체 구조는 Fig. 1과 같다. 차량에서 가속도와 휠속을 측정하면, 그 센서 데이터를 통해 차속과 슬립률을 추정한다. 밸브 제어기에서는 추정한 슬립률을 정해진 한계점과 비교하여 Building, Holding, Exhausting 중 하나를 선택한다. 그에 맞게 브레이크 챔버의 압력이 증가, 유지, 감소하며 차량의 거동이 변하게 된다.

2.2. Compressible fluid dynamics

Instantaneous mass flow rate은 quasi-steady-state isentropic orifice flow로 표현할 수 있다. 밸브 제어기에서 Building을 하면 mass flow가 증가하고, Holding하면 유지하며, Exhausting하면 감소한다. Mass flow rate이 변화면 이상기체 상태방정식에 따라 압력 변화율이 변하고, 이를 적분하면 챔버의 압력을 구할 수 있다. Orifice flow에 관한 전체 구조는 Fig. 2이다.⁽⁴⁾



Fig. 2 Block diagram of fluid dynamics

3. ABS 제어 알고리즘

제동력은 슬립률과 도로의 마찰계수에 영향을 받는데, 도로의 마찰계수는 제어할 수 없으므로 슬립률을 제어해야 한다. 제동 상황의 슬립률은 아래와 같이 식 (1)로 정의할 수 있다.

$$\lambda = \frac{V_x - r_{eff} \cdot \omega}{V_x} \tag{1}$$

V_x 는 차량의 속도, ω 는 휠의 속도, r_{eff} 는 휠의 유효 반경을 뜻한다. 슬립률은 차량의 속도와 휠 속도에 관한 함수이다. 실제로 이 두 변수는 제어할 수 없으므로 공압식 브레이크의 제어 전략을 통해 간접적으로 제어해야 한다. 공압식 브레이크 제어 기본 방법은 챔버의 압력을 높여주는 Building, 유지하는 Holding, 줄여주는 Exhausting으로 나뉜다. 이 3가지 입력을 통해 슬립률을 제어하는 전략 3가지를 소개할 것이다.

3.1. 슬립률을 이용한 제어 전략 version 1

첫번째 버전은 2가지를 정의하여, 상한치보다 슬립률이 높으면 감소시켜주는 Exhausting 밸브 제어를 하고, 하한치보다 낮으면 증가시켜주는 Building 밸브 제어를 하는 간단한 로직이다. 이를 표로 나타낸 것이 Table 1, 개념도로 나타난 것이 Fig. 3이다.

Version 1의 제어 알고리즘을 이용하면 Building ->

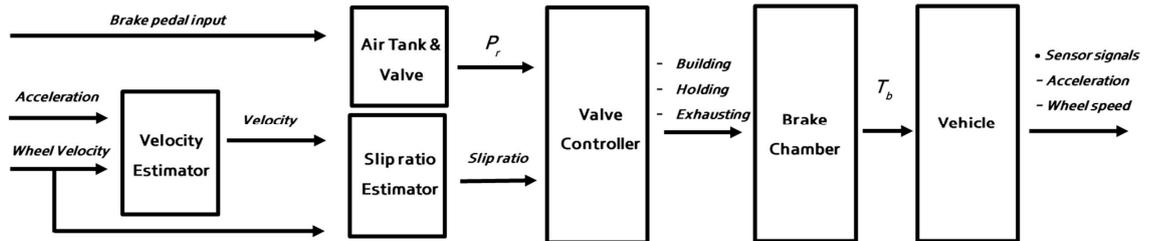


Fig. 1 Block diagram of the ABS overall structure

Table 1 ABS version 1 algorithm

Condition	Mode
$\lambda < \lambda_{lower} - \alpha$	Building
$\lambda_{upper} + \alpha < \lambda$	Exhausting
$\lambda_{lower} - \alpha < \lambda < \lambda_{upper} + \alpha$	Holding
Else	Previous mode

Table 2 ABS version 2 algorithm

Condition	Mode
Manual	Manual
$\lambda < \lambda_{lower} - \alpha$	Step Building
$\lambda_{upper} + \alpha < \lambda$	Exhausting
$\lambda_{lower} - \alpha < \lambda < \lambda_{upper} + \alpha$	Previous mode

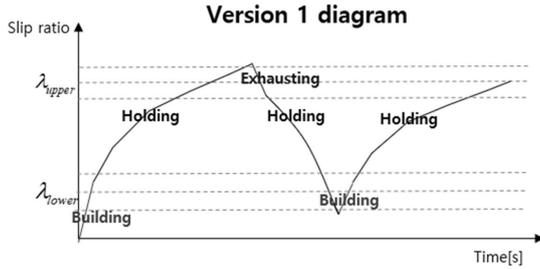


Fig. 3 ABS version 1 diagram

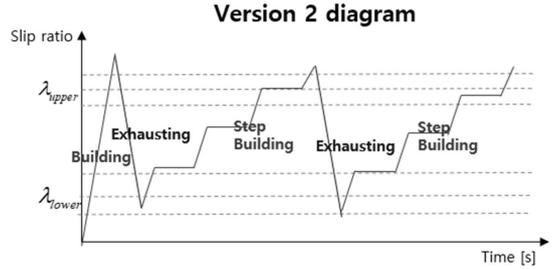


Fig. 4 ABS version 2 diagram

Holding → Exhausting → Holding → Building ... 과정을 반복한다. Table 1에서 α 는 실제 데이터의 noise로 인해 히스테리시스(hysteresis) 효과를 부여한 것이다. 단순히 슬립률의 대소 관계만으로 제어를 하는 것이 아니라 다음 제어 입력 값이 현재 제어 입력 값에 영향을 받도록 설정하였다. 예를 들어 현재 밸브 제어가 Holding일 때는 슬립률이 $\lambda_{upper} + \alpha$ 보다 커야 Exhausting을 하지만, 현재 밸브제어가 Exhausting이면 $\lambda_{upper} - \alpha$ 보다 작아야 Holding 제어를 한다. α 가 0에 가까우면 Building과 Exhausting이 충분히 일어나지 못하는 현상이 발생되기 때문에 0.001로 설정하였다.

슬립률을 λ_{lower} 와 λ_{upper} 사이의 이상적인 값으로 유지할 수 있기 때문에 제동력 또한 이상적인 최대 값이 나오게 된다.⁽⁵⁾ 그러나, 밸브 제어가 여러 번 스위칭 되어 주파수가 높다는 단점이 있다. 너무 잦은 밸브 제어를 이용하면 기계의 노후화 문제가 발생하므로, 실제 상용화하기에는 어려움이 있다.

3.2. 슬립률을 이용한 제어 전략 version 2

Valve control의 주파수를 감소시키기 위해, version 2에서는 Step Building을 이용하였다. Step Building이란 Building을 계속 하는 것이 아니라 0.01 초 동안 Building을 하고 0.1초동안 Holding해서 계단식으로 Building을

실행하는 것을 뜻한다. 이에 대한 로직은 Table 2와 같고, 이해를 돕기 위한 시뮬레이션 결과는 Fig. 4이다.

Version 2는 version 1에 비해 주파수 측면에서 장점을 갖고 있지만, 챔버의 압력을 계단식으로 천천히 증가시키기 때문에, 위급한 제동상황에서 브레이크 작동이 느리게 발생할 수 있다. Version 3에서는 이 점을 보완하였다.

3.3. 슬립률을 이용한 제어 전략 version 3

이전의 version에서는 모든 Building 상황이 Step으로 이루어져 있다면, version 3는 그렇지 않다. 챔버의 압력을 증가시켜야 하는 상황이라면, 먼저 Step Building을 2회 실행한다. 여기서 Step Building은 version 2와 동일하게 0.01 초 동안 Building 하고 0.1 초 동안 Holding하는 과정을 뜻한다. Step Building 이후, 슬립률이 특정 한 계점(λ_{mid})보다 낮으면 Full Building을 실행함으로써 압력을 빠르게 증가시키고 높으면 다시 Step Building을 실행한다. 이 과정을 반복하다가 λ_{upper} 보다 슬립률이 커지게 되면 Exhausting 과정을 실행한다. 이에 대한 로직은 Table 3과 Fig. 5와 같다.

Step Building을 기본으로 이용함으로써 version 1의 주파수 문제를 해결하고, Full Building 과 Step Building의 실행여부를 슬립율의 한계점을 통해 다시 결정하므로 version 2의 단점도 해결하였다.

Table 3 ABS version 3 algorithm

Condition	Mode
Manual	Manual
$\lambda_{lower} < \lambda < \lambda_{mid}$ after Step Building	Full Building
$\lambda < \lambda_{lower}$ after Exhausting	Step Building
$\lambda_{mid} < \lambda < \lambda_{upper}$ after Step Building	
$\lambda < \lambda_{upper}$	Exhausting
else	Previous mode

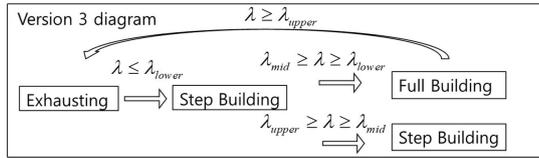


Fig. 5 ABS version 3 diagram

4. 속도 추정기

위에서 언급한 제어 전략에서 슬립률을 계산하기 위해서는 차량의 속도를 알고 있어야 한다.

4.1. 가속도 센서가 있을 때의 속도 추정기

가속도 센서가 있을 경우의 속도 추정은 선행 논문을 참고하였다.⁽⁶⁾ 선행 논문에서는 차량의 status를 직전의 status, 평균 휠 속도로 정의하였다. 제동상황에서의 속도는 가속도 데이터를 이용해 적분한 가속도를 이용해 계산한다. 하지만, 가속도 센서가 장착되지 않는 차량에서는 이 방법을 사용할 수가 없다. 특히 ABS는 제동상황일때 작동하므로, 가속도 데이터가 없을 때는 속도 추정이 불가능하다.

4.2. 가속도 센서가 없을 때의 속도 추정기

가속도 센서가 없으면 휠의 속도만을 이용해 차의 속도를 추정해야 한다. 선행 논문에서는 ABS가 작동할 때 Fig. 6과 같이 휠 속도를 이용해 속도를 추정하는 방법을 제안하였다.⁽⁷⁾

4바퀴에서 추정한 속도의 최대 값을 현재 차속으로 추정하는 방법에서 2가지를 보완하여 본 연구에 적용하였다. 선행논문에서는 가속도를 새로 업데이트 할 때, ①→②의

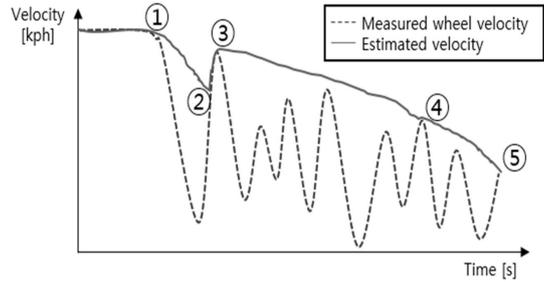


Fig. 6 Velocity estimator using wheel speed diagram

기울기는 기존에 설정한 값을 이용하고, ③→④의 기울기는 ①→③의 기울기, ④→⑤의 기울기는 ③→④의 기울기를 이용하였다. 즉, 직전의 극댓값과 차속 그래프가 만나는 점과 현재의 휠속의 기울기를 이용한 것인데, 본 연구에서는 ④→⑤의 기울기를 ③→④이 아닌 ①→④의 기울기로 이용하였다. 이렇게 한 이유는, 바로 직전의 휠속이 바뀌기 헛돌아서 크게 측정되거나, 노이즈로 인해 정확하지 않을 수 있어서 더 강건한 방법을 선택하였다.

두 번째는 브레이크 페달 압력을 input으로 추가하여, 페달을 밟은 이후 추정속도를 0.3초동안 등속도로 유지하였다. 브레이크를 밟으면 휠속은 급격히 감소하지만 실제 차속은 그렇지 않기 때문이다.

가속도 센서 없이 휠 속도만으로 속도를 추정하면, 실제 속도 보다 낮게 추정된다는 단점이 있다. 속도가 낮게 추정되면 추정 슬립률도 실제 슬립률보다 낮게 추정되어 실제로 휠이 잠긴 상황이지만 이를 그렇지 않다고 판단할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위해 한계점을 이상적인 슬립률보다 낮게 설정하여 보수적으로 제어하였다.

5. 슬립률을 이용한 ABS 시뮬레이션 검증

슬립률을 이용한 제어전략을 Trucksim 소프트웨어를 이용하여 검증하였다. 72kph에서 급브레이크를 하는 상황을 구현한 후, Version 1~3의 데이터를 측정하였다. 또한, 마찰계수가 낮은 블랙 아이스 도로 상황인 low mu 상황(마찰계수: 0.3)과 마찰 계수가 높은 마른 콘크리트 도로 상황인 high mu(마찰계수: 0.88) 상황에서 각각 진행하였다.

5.1. Version 1, 2 분석

Version 1, 2의 시뮬레이션 결과는 Fig. 7, 8과 같다. 그

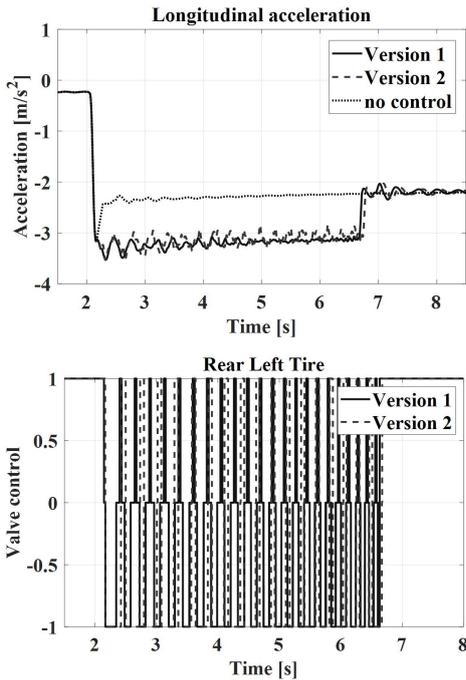


Fig. 7 Version 1 & Version 2 velocity, acceleration, valve control (Low μ)

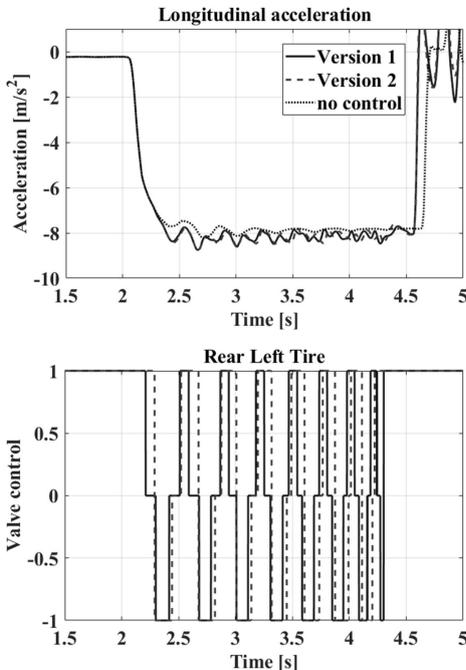


Fig. 8 Version 1 & Version 2 velocity, acceleration valve control (High μ)

래프에서 볼 수 있듯이 밸브 제어의 스위칭 횟수는 version 2가 1보다 30%가량 감소했다. 가속도의 진동이 더 크게 나타나는 이유는 Step Building에 있다. 가속도를 최대로 이용하기 위해서는 휠이 잠기지 않을 때 빠르게 압력을 높여줘 최대 제동력을 이용해야 하지만 version 2에서는 Step Building으로 Hold를 해줌으로써 압력이 Full Building보다 천천히 올라간다. 그러나 감속도 측면에서 봤을 때, 제동력의 손실은 크지 않다.

5.2. Version 2, 3 분석

ABS가 작동하지 않을 때와 version 2, 3의 시뮬레이션 결과는 Fig. 9, 10과 같다. 밸브 제어를 보면Building 과정을 상황에 맞게 Step Building과 Full Building을 선택적으로 사용하고 있다.

ABS가 작동할 때 운전자는 밸브의 On/Off를 소리와 페달의 느낌으로 인지할 수 있기 때문에 스위칭 횟수가 감성적으로 중요한 요소이다. 특히 Exhausting가 많을수록 불편함을 느낀다. Version 3는 2에 비해 20% 낮은 Exhausting횟수를 갖고 있다.

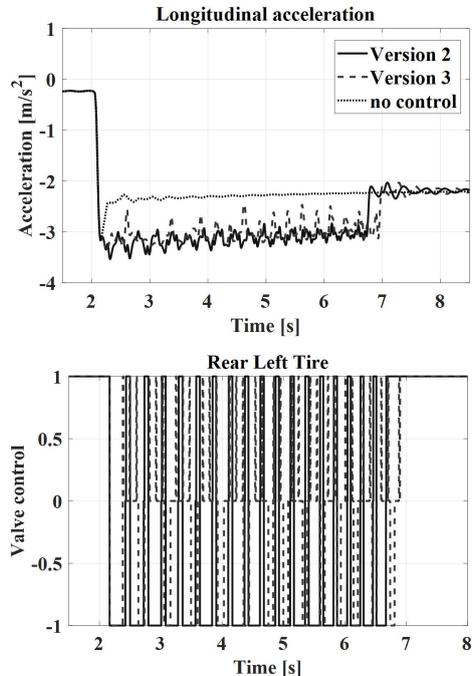


Fig. 9 Version 2 & Version 3 velocity, acceleration, valve control (Low μ)

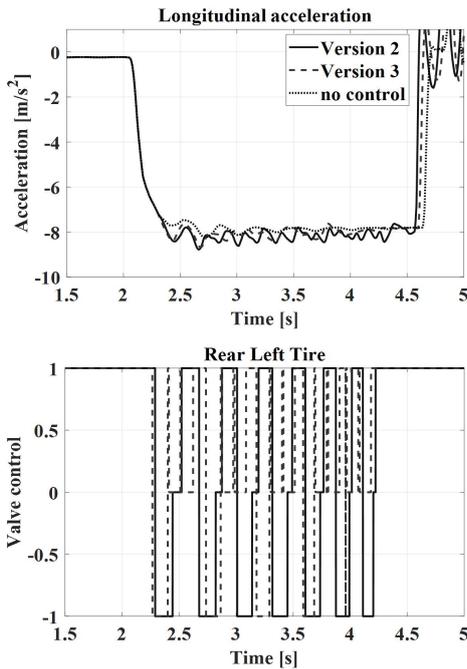


Fig. 10 Version 2 & Version 3 velocity, acceleration, valve control (High mu)

6. 결론

이 연구에서는 슬립률을 밸브 On/Off 제어를 통해 간접적으로 제어하였다. 슬립률을 추정하기 위해서 가속도 센서가 있을 때와 없을 때를 각각 나누어 속도 추정기를 설계하였고, 추정된 속도 값과 측정된 휠속으로 슬립률을 추정하였다. 3가지 밸브 제어 전략을 적용하고, 72kph에서 급브레이크 하는 시뮬레이션을 통해 각 version의 장단점을 분석해보았다.

Version 1에서는 슬립률에 따라 제어 입력을 다르게 설정하여 휠의 잠김 현상을 방지하였다. 또한 노이즈에 강건히 대응하기 위하여 히스테리시스 효과를 적용하였다. 그러나 version 1은 너무 잦은 밸브 제어를 이용해 액추에이터에 부담을 준다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 version 2에서는 Building과 hold를 반복하는 Step Building을 적용하였다. 압력이 계단식으로 천천히 올라가기 때문에 액추에이터에 부담을 덜 준다는 장점이 있다. 마지막 version 3에서는 Step Building과 Full Building을

휠 가속도에 따라 선택적으로 이용함으로써 version 2보다 높은 감속도 성능을 보여준다. 이기술은 딜레이가 큰 상용차 공압식 브레이크 ABS로직에 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부 도심도로 자율협력주행 안전·인프라 연구 사업의 연구비지원(과제번호 19PQOW-B152473-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Uwe Kiencke, Lars Nielsen, 2000, "Automotive Control Systems: For Engine, Driveline and vehicle", Springer, pp. 410~412.
- (2) Zhang, Q., Liu, G., Wang, Y., & Zhou, T., 2004, "Study of calculation method of wheel angular acceleration in ABS system", In International Conference on Information Acquisition, pp. 147~150.
- (3) Mauer, Georg F., 1995, "A fuzzy logic controller for an ABS braking system", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 381~388.
- (4) Acarman, T., Ozguner, U., Hatipoglu, C., & Igusky, A. M., 2000, "Pneumatic brake system modeling for systems analysis", SAE Technical Paper, Vol. 109, No. 2, pp. 414~423.
- (5) 한승재, 이태영, 이경수, 2013, "타이어-노면 마찰 계수 추정을 이용한 AEBS 알고리즘", 한국자동차 안전학회, Vol. 5, No. 2, pp. 17~23.
- (6) Tanelli, M., Savaresi, S.M., Cantoni, C., 2006, "Longitudinal vehicle speed estimation for traction and braking control systems", IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, Munich, pp. 2790~2795.
- (7) Fangjun Jiang and Zhiqiang Gao, 2000, "An adaptive nonlinear filter approach to the vehicle velocity estimation for ABS", IEEE International Conference on Control Applications, Anchorage, USA, pp. 490~495.