

휠 다이내믹스를 이용한 ABS 제어 알고리즘 설계

조광현*¹⁾ · 최세범¹⁾ · 유주현²⁾ · 김종갑²⁾
KAIST 기계공학과¹⁾ · 현대자동차²⁾

Design of an ABS Control Algorithm using Wheel Dynamics

Kwanghyun Cho*¹⁾ · Seibum Choi¹⁾ · Joohyun Ryu²⁾ · Chongkap Kim²⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, KAIST, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

²⁾ Hyundai Motor Company, Hyundai KIA Motors Bldg., Yangjae 2-dong, Seocho-gu, Seoul 137-938, Korea

Abstract : In this paper, an anti-lock brake system(ABS) algorithm using wheel pressure sensors is proposed. The wheel pressure sensors are used to estimate the road friction coefficient, which sensors are used recently to smart cruise control system and a hybrid car. The road friction coefficient is the most important information to control the vehicle stability. Using the estimated road friction coefficient, the vehicle detects mu-transition situation such as high-to-low mu or low-to-high mu and split-mu situation easily. Also, the performance of the estimation for vehicle states such as vehicle speed and acceleration can be improved. Especially, it is efficient to control the left/right and front/rear wheel independently because the friction coefficient is estimated separately. The simulation has been performed to verify the robustness of the proposed ABS algorithm in a variety of road conditions which has different friction coefficients.

Key words : ABS(차륜잠금 방지 브레이크 시스템), Brake system(제동 장치), Vehicle Dynamics(차량 동역학), Wheel pressure sensor(차륜 압력 센서), Automotive control(차량 제어), Wheel dynamics(차륜 동역학)

Nomenclature

I_w : wheel inertia, kg·m²
 ω : wheel angular velocity, rad/s
 μ : friction coefficient
 R : rotating radius, m
 F_{zf}, F_{zr} : front/rear tire vertical force, N·m
 T_B : brake torque, N·m
 F_{ca} : clamping force, N
 μ_b : caliper friction coefficient
 P_B : brake pressure,

A : cylinder area
 r_d : disk radius, m

Subscripts

ABS : anti-lock brake system
 SCC : smart cruise control
 HEV: hybrid electric vehicle
 ESC: electronic stability control

1. 서론

오늘날 자동차의 ABS는 운전자와 차량의 안정성을 위해 보편적으로 장착되고 있다. ABS는 차량의 차륜이 잠기는 현상을 방지함으로써 차량의 제동 능력 및 조향 능력을 향상시키는데 그 목적이 있다.

* 조광현, E-mail: khcho08@kaist.ac.kr.

ABS는 1970년대 Bosch사에서 개발된 이래 많은 연구가 진행되었고, 상당한 개발의 진전이 있어왔다. [1] 대부분의 ABS 알고리즘은 차량의 속도와 가속도 정보를 이용하여 차륜에 적용되는 압력을 APPLY-HOLD-DUMP 시킴으로써 차륜이 잠기는 현상을 방지한다. 하지만 차륜 속도 센서만을 이용하여 차량을 제어하기 때문에 각 상황들에 대한 차량의 안정성을 확보하기 위해 수많은 제어 규칙들이 적용되게 된다. 이는 알고리즘의 단순화 및 성능 향상에 있어 한계점으로 작용하게 된다. [2][3][4][5][6]

다양한 노면 조건들과 운전자 입력에 있어 차량을 안정한 상태로 유지시키기 위해서는 차량 및 노면에 대한 추정 정보가 필요하다. 특히 차량이 주행중인 노면에 대한 정보는 차량 제동을 위해 절대적으로 필요한 정보이다. 하지만 차륜 속도 센서만 이용할 경우 노면에 대한 정확한 추정을 할 수 없으며, 이는 제동력 향상에 있어서도 제한적 성능을 야기시킨다.

본 논문에서는 차량의 각 차륜에 장착되는 차륜 속도 센서뿐 만 아니라 차륜 압력 센서를 추가적으로 이용하여 노면에 대한 정보를 추정함으로써 차량의 제동력을 향상시키고자 하는데 주 목적이 있다. 차륜 압력 센서는 최근 Smart Cruise Control(SCC) 또는 HEV의 회생 제동용으로 추가적으로 장착되고 있어, ABS 제어를 위한 추가적인 정보로써 활용될 수 있다. 또한 각 차륜에 적용되는 차륜 압력 차를 통해 차량의 좌-우측에 다른 노면 조건이 적용되는 경우나 전-후 노면이 갑자기 바뀌는 경우를 보다 정확하게 탐지함으로써 다양한 상황에서의 차량 제동 성능을 향상시켰다. 그리고 설계된 알고리즘의 강건성을 확보하기 위해 차량 동역학 시뮬레이션 프로그램, CarSim을 이용하여 다양한 노면 조건에서 ABS 동작을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 차륜 압력 센서를 사용하지 않을 경우 차량의 상태 추정 성능뿐 만 아니라 제동성능 또한 향상됨을 보였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 차량 노면을 추정하기 위한 방법이 논의된다. 3장에서는 설계된 ABS 제어 알고리즘에 대한 설명이 이루어진다. 4장에서는 설계된 알고리즘의 강건성을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과에 대해 논의된다.

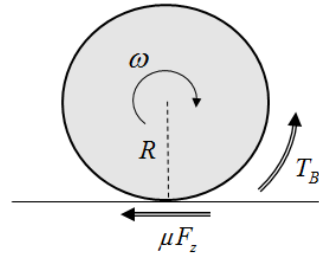


Fig. 1 Wheel dynamics

2. 휠 다이내믹스를 이용한 노면 추정

차량을 안정한 상태로 제어하기 위해서는 차량의 상태뿐 만 아니라 차량이 주행중인 노면에 대한 정보의 추정이 이루어져야 한다. ABS 제어는 추정된 노면에 따라 브레이크의 압력 제어가 이루어지기 때문에 차량 제어를 위해서는 가장 중요한 정보라고 할 수 있다.

2.1 휠 다이내믹스

Fig. 1은 노면을 주행중인 차륜에 대한 동역학적 표현을 묘사한다. 여기서 모멘트 평형식을 구하면 다음과 같다.

$$I_w \dot{\omega} = \mu R F_z - T_B \quad (1)$$

식 (1)을 추정하고자 하는 마찰계수에 대한 식으로 정리하면 식(2)와 같이 된다.

$$\mu = \frac{I_w \dot{\omega} + T_B}{R F_z} \quad (2)$$

이 때 차륜 속도, 회전반경과 차륜 inertia는 측정 가능한 인자이며, 브레이크 torque와 수직항력은 추정되어야 한다. 추정된 마찰계수는 차륜에 가해지는 브레이크 토크에 의해 최대 제동력을 가지는 지점을 기준으로 cycling 하기 때문에 최대 제동력을 얻기 위해서는 cycling 하는 값의 최대값을 추정하여야 한다. 본 논문에서는 rate-limiter를 이용하여 추정된 마찰계수의 최대값만을 선택함으로써 최종적으로 노면에 대한 마찰계수를 추정하였다.

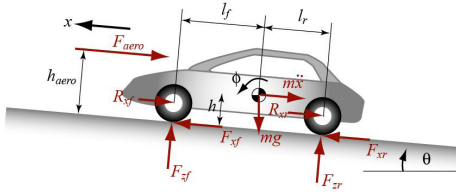


Fig. 2 Longitudinal dynamics

2.2 수직 항력 추정

Fig. 2에서는 차량이 감속하고 있는 경우의 종방향 요소들을 묘사하고 있다. 이 때 차량의 전륜 및 후륜에 대한 수직방향 힘을 구하면 식(3)과 (4)와 같다.

$$F_{zf} = \frac{al_r - bh - M_{car} - M_{aero}}{L} \quad (3)$$

$$F_{zr} = \frac{al_f + bh - M_{car} + M_{aero}}{L} \quad (4)$$

where,

$$a = mg \cos \theta, \quad b = mg \sin \theta,$$

$$M_{car} = m\ddot{x}h, \quad M_{aero} = F_{aero}h_{aero}$$

여기서, 노면 상태가 평지이고 공기저항을 무시할 경우 타이어에 작용하는 수직항력은 식 (5)와 (6)과 같이 간단하게 구해질 수 있다.

$$F_{zf} = \frac{mgl_r - m\ddot{x}h}{L} \quad (5)$$

$$F_{zr} = \frac{mgl_f + m\ddot{x}h}{L} \quad (6)$$

2.3 브레이크 토크 추정

브레이크 토크는 Fig. 3에서 차륜에 가해지는 힘과 힘을 내기 위한 실린더 압력과의 관계에 의해 구해진다. 여기서 브레이크 디스크 패드에 가해지는 힘은 식 (7)과 같이 구해진다.

$$F_B = \mu_b F_{ca} = \mu_b (2F_{BN}) = 2\mu P_B A \quad (7)$$

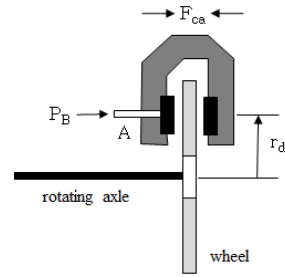


Fig. 3 Longitudinal dynamics

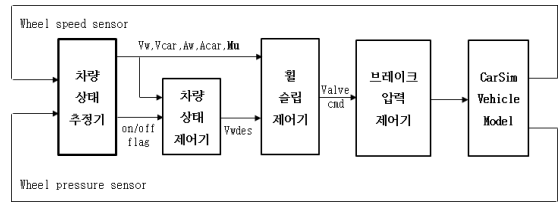


Fig. 4 ABS control algorithm block diagram

이 때 추정하고자 하는 브레이크 토크는 식(8)과 같이 구해진다.

$$T_B = F_B \cdot r_d = k_B P_B \quad (8)$$

여기서 k_B 는 브레이크 gain을 나타내며, 이 값은 브레이크에 사용된 실린더 사양에 의해 정해지며, 본 논문에서는 $k_{Bf} = 263.38$, $k_{Br} = 86.18$ 이 사용되었다.

3. ABS 제어 알고리즘

Fig. 4는 ABS 제어를 위한 알고리즘의 블록도를 나타낸다. 제어 알고리즘은 차량 상태 추정기, 차량 상태 제어기, 휠 슬립 제어기로 크게 세 부분으로 구성된다.

3.1 차량 상태 추정기

차량 상태 추정기에서는 제어에 사용되는 기본적인 차량 및 차륜의 속도, 가속도가 추정되며, 이 때 2장에서 언급한 노면 마찰계수 정보를 부가적으로 이용하게 되면, 보다 정확한 차량의 상태를 추정할 수 있다.

3.1.1 차량 속도 추정

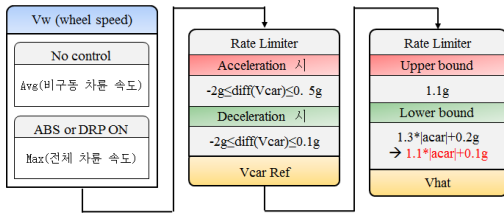


Fig. 5 Vehicle speed estimation

실제 차량에는 차량 속도 센서가 장착되어 있지 않기 때문에 차륜의 속도를 기준으로 한 차량 속도 추정이 요구된다. Fig. 5는 차량의 속도를 추정하기 위한 블록도를 나타낸 것이다. 여기에서 Vcar_Ref는 차륜 속도를 통해 추정된 차량 속도의 물리적인 범위 내에서 제한을 둔 신호이고, 이 신호는 추정된 차량의 가속도를 이용하여 Vhat으로 보다 정확하게 보정된다. 이 때 사용된 차량의 가속도는 2장에서 추정한 노면 상태 계수(road friction coefficient)를 나타낸다.

3.1.2 차량 가속도 추정

ESC가 장착된 차량의 경우 기본적으로 차량의 종방향 가속도 센서가 장착되지만 그렇지 않을 경우 차량의 가속도 또한 추정되어야 한다. 본 논문에서는 식(9)와 (10)을 이용하여 차량의 가속도가 추정된다.

$$\hat{a}_{braking} = \hat{\mu} \cdot g \quad (9)$$

$$\hat{a}_{driving} = \dot{V}_{hat} \quad (10)$$

차량이 제동 중이 아닌 경우, 즉 브레이크 압력이 없는 경우에는 식 (2)에서 $T_B = 0$ 이 되어 도로 노면 마찰 계수가 올바른 값을 가지지 못하게 된다. 따라서 식(9)에서 가속도 추정이 제대로 이루어지지 않는다. 그러므로 일반적인 주행 상황인 경우에는 식(10)과 같이 추정된 차량 속도를 이용하여 차량의 가속도를 추정한다.

3.2 차량 상태 제어기

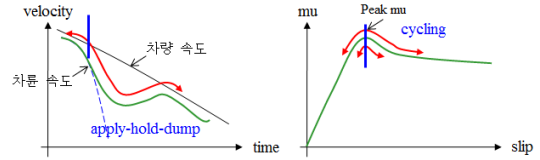


Fig. 6 Peak mu 탐지를 위한 시간 영역과 mu-slip curve

차량 상태 제어기에서는 차륜이 잠기지 않기 위해 차륜을 제어하기 위한 요구차륜 속도를 형성한다. 본 논문에서는 차량의 요구 속도를 형성하기 위해 후륜의 Apply-Hold-Dump cycling을 통해 최대 정지 마찰 계수를 추정하여 이를 기반으로 한 전륜 요구 속도를 형성하는 방법을 이용하였다.[7]

3.2.1 후륜 요구 속도 및 제어 명령 형성

후륜 요구 속도는 브레이크 압력의 Apply-Hold-Dump 명령을 반복적으로 cycling 함으로써 peak mu를 탐지하도록 하여 형성한다. Fig. 6은 시간영역과 mu-slip curve에서 peak mu를 탐지하기 위해 사용된 방법을 묘사한 것이다. Fig. 6의 좌측 그림은 노면 마찰 계수를 이용하여 추정된 차량 가속도를 통해 현재 차륜 속도를 차량 속도에 근접하도록 제어하는 방법을 나타낸 것이다. 이 때 차륜의 감가 속도 한계점은 추정된 노면 마찰 계수 근처값으로 설정되고, 이를 기준으로 브레이크 압력은 Apply-Hold-Dump 동작을 반복하게 된다. 이는 Fig. 6의 우측 그림과 같이 mu-slip curve에서 peak mu를 기준으로 cycling 하는 형태로 나타나게 된다.

3.2.2 전륜 요구 속도 형성

전륜 요구 속도는 후륜에서 추정된 peak mu(최대 정지마찰력)를 기준으로 margin이 부여되어 형성된다. 즉, 후륜에서 제어되는 속도를 기점으로 일정 margin이 부여된 속도가 전륜 제어를 위한 요구속도가 된다. Peak mu를 기준으로 보다 적은 슬립의 경우(Fig. 6의 우측 그림에서 peak mu의 좌측 영역), 즉 under braking 영역은 차량을 제어하기는 쉽지만 차량 제동이 잘 되지 않는다. 반면 많은 슬립의 경우(Fig. 6의 우측 그림에서 peak mu의 우측 영역), 즉 over-braking 영역은 차량을 불안정한 상태로 만들지만 under-braking보다는 차량의 제동

이 잘 이루어진다. 따라서 ABS의 경우 under-braking보다는 over-braking이 차량을 제동시키기 위해서 효과적이기 때문에 peak mu를 초과하는 margin을 부여하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

3.3 휠 슬립 제어기

휠 슬립 제어기의 목표는 측정된 차륜 속도가 요구되는 차륜 속도를 추종하는 것이다. 제어를 위해서는 일반적으로 사용되는 PID 제어기가 사용된다. 후륜의 경우는 3.2.1절에서 peak mu 지점 근처에서 제어하기 위한 Apply-Hold-Dump 명령이 직접적으로 출력되기 때문에 PID 제어기는 전륜 제어를 위해 사용된다. 식(11)은 전륜을 제어하기 위해 사용되는 제어입력이다.

$$u = -k_p e - k_i \int e dt - k_d \dot{e} \quad (11)$$

여기서 $e = \omega - \omega_{des}$ 이다.

4. 시뮬레이션

노면 마찰 계수 추정에 따른 차량의 상태 추정 성능과 제안된 ABS 제어 알고리즘의 제동 능력을 검증하기 위해 CarSim을 이용하여 다양한 노면 조건에서 시뮬레이션이 수행되었다. Table 1은 시뮬레이션에 사용된 노면의 마찰 계수를 나타낸다.

4.1 노면 상태 추정

Fig. 7은 추정된 노면 마찰 계수를 이용하여 차량의 가속도를 추정한 결과를 실제 가속도 센서의 값과 비교한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 균일한 노면 마찰계수를 갖는 경우 가속도 추정 성능이 상당히 우수함을 보였다. 노면 천이 구간의 경우, 즉 low mu에서 high mu 천이 구간의 경우는 실제 high mu 진입 시 mu값을 보다 빠르게 탐지하였다. 이는 차량의 빙판길에서 갑작스런 아스팔트 도로 진입과 유사한 경우로 빠른 노면 천이 구간 탐지가 이루어지지 않을 경우 큰 사고를 유발할 수 있다.

Table 1 Simulation cases

	High	Low	High2Low	Low2High	Split
m	0.8	0.2	0.8→0.2	0.2→0.8	0.1(L)

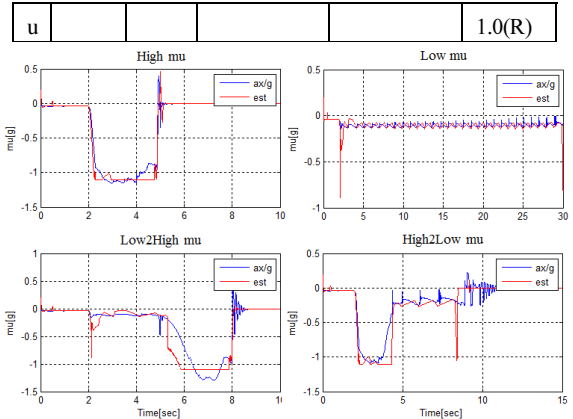


Fig. 7 Peak mu 탐지를 위한 시간 영역과 mu-slip curve

4.2 주행 중 제동 능력

차량의 주행 중 ABS의 제동 능력을 평가하기 위해 차량을 100kph 속도로 주행시키면서 운전자가 2초부터 0.3초 이내에 완전히 브레이킹을 가하도록 시뮬레이션 하였다. Fig. 8과 9는 low2high mu 천이 구간과 split mu 구간에서 ABS 제동 결과를 나타낸다. 그림에서 Vhat은 추정된 차량 속도, Vw는 측정된 차륜속도, Pb/10은 차륜에 가해진 압력의 1/10, 그리고 Vwdes는 요구되는 차륜 속도이다.

Fig. 8에서는 low mu에서 high mu로 천이 되는 구간에서 차륜 속도가 증가되었다가 차륜의 압력이 증가하면서 차륜 속도가 요구되는 차륜 속도를 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림의 후륜의 압력 변화를 보면 3.2.1절에서 설명하였듯이 peak mu를 탐지하기 위해 압력의 cycling 하는 부분을 관찰할 수 있다. 전륜의 경우는 후륜을 기준으로 요구되는 차륜 속도가 형성되기 때문에 나타난 바와 같이 압력에 있어서 cycling이 관찰되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9는 동일한 노면을 주행하다가 좌-우측이 서로 다른 노면 마찰 계수를 가지는 도로로 진입한 경우이다. Split mu의 경우, 전륜 제어가 적절히 이루어지지 않을 경우는 차륜의 조향 능력이 저하되고, 후륜 제어가 제대로 이루어지지 않을 경우는 차량이 spin out 되는 현상이 발생한다. 따라서 좌-우측의 노면 마찰 계수의 독립적인 추정이 요구되며, 각 노면에 적절한 브레이크 제어가 요구된다. 본 논문에서는 2장에서 제시한 방법을 통해 좌-우측의 노면 마찰 계수를 각각 추정하여, 제어를 위한 정보로 사용하게 된다. 그러므로 그림에서 보는

바와 같이 좌-우측 노면의 마찰 계수에 따라 브레

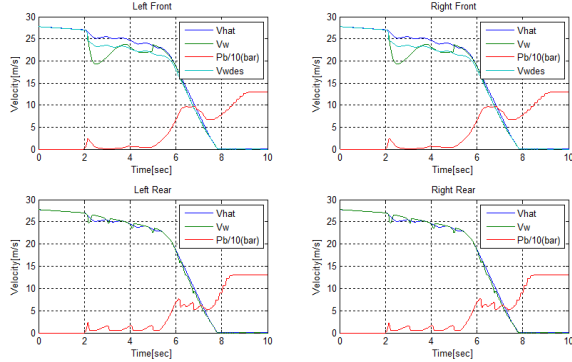


Fig. 8 Road friction coefficient: low2high mu transition

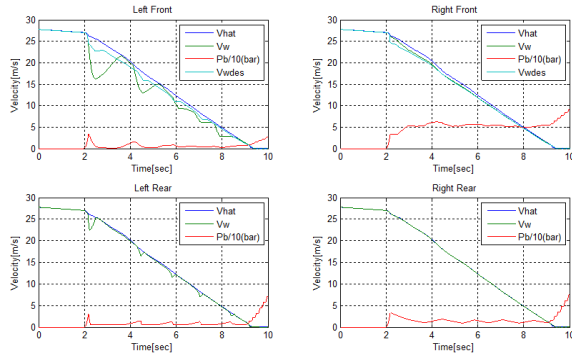


Fig. 9 Road friction coefficient: split mu

이크 압력을 다르게 적용하고, 이 때 좌-우측의 압력 차이가 너무 커지는 것에 제한을 줌으로써 차량의 안정성을 확보한 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

오늘날 ABS는 차량의 제동능력 향상을 위해 필수적인 시스템이 되었으며, 그 중요성만큼 활발한 연구가 이루어져 왔다. 하지만 대부분의 알고리즘이 차륜 속도 센서만을 이용하여 제어하기 때문에 알고리즘의 성능 향상에 있어 한계점이 존재하였다.

본 연구에서는 오늘날 SCC나 HEV에 주로 장착되고 있는 차륜 압력 센서를 추가적으로 이용함으로써 ABS 제어 알고리즘의 성능을 개선시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보여주었다. 첫째로, 차륜 압력 센서를 이용하여 노면의 마찰 계수를 간접적

으로 추정함으로써 차량 제어 동작을 수행하기 위해 기준으로 사용하는 차량 상태들, 즉 속도, 가속도 등의 추정 성능을 향상시켰다. 둘째로, 노면 마찰 계수에 있어 좌/우측, 전-후륜을 독립적으로 추정함에 따라 split mu 또는 mu transition 상황에서 보다 안정한 상태로 차량을 제어할 수 있음을 확인하였다.

References

- 1) H.Leiber and A. Czincze, Antiskid system for passenger cars with a digital electronic control unit. Soc. Automobile Eng., Washiton, DC, SAE 790458, 1979
- 2) M. Salehi and G. Vossoughi, "Vehicle integrated control[ABS,ASUS,4WS with variable structure control(sliding mode)]: The new method for active suspension system", in ASME DETC, Long Beach, CA, 2005
- 3) Y. Hou and Y. Sun, Fuzzy sliding mode control method for ABS, Soc. Automobile Eng., Washington, DC, SAE 2004-01-0252, 2004
- 4) J. Son, Development of fuzzy logic anti-lock braking system for light bus. Soc. Automobile Eng., Washington, DC, SAE 2003-01-0458, 2003
- 5) L. Jun, Z. Zhang, and F. Yu, An investigation into fuzzy control for anti-lock braking system based on road autonomous identification. Soc. Automobile Eng., Washington, DC, SAE 2001-01-0599, 2001
- 6) S. Drakunov, and et al., "ABS control using optimal search via sliding modes", IEEE Trans. Control System Technology, vol.3, no.1, Mar, 1995
- 7) S.B. Choi, Antilock Brake System With a Continuous Wheel Slip Control to Maximize the Braking Performance and the Ride Quality, IEEE Trans. Control System Techonology, vol.16, no.5, September, 2008