

〈응용 논문〉

비대칭 적분 베리어 리아푸노프 함수 기반 상용 차량 전자식 파킹 브레이크 슬립 추종 제어

김주찬¹⁾ · 유세선²⁾ · 이영욱³⁾ · 조현종⁴⁾ · 손영섭^{*5)}
 계명대학교 전기공학과¹⁾ · 인천대학교 전자공학부²⁾ · 대림대학교 메카트로닉스과³⁾ ·
 (주)상신브레이크 전장사업부⁴⁾ · 경북대학교 데이터사이언스대학원⁵⁾

Asymmetric Integral Barrier Lyapunov-based Slip Tracking Control for Commercial Vehicle Electronic Parking Brake

Juchan Kim¹⁾ · Sesun You²⁾ · Youngok Lee³⁾ · Hyunjong Cho⁴⁾ · YoungSeop Son^{*5)}¹⁾Department of Electrical Energy Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea²⁾Department of Electronics Engineering Incheon National University Incheon 22012, Korea³⁾Department of Mechatronics Engineering, Daelim University, Gyeonggi 13916, Korea⁴⁾Sangsin Brake Co., Ltd., 90, Techno Jungang-Daero, Yuga-Eup, Dalseong-Gun, Daegu 43023, Korea⁵⁾Graduate school of Data Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received 29 January 2026 / Revised 13 February 2026 / Accepted 19 February 2026)

Abstract : This paper proposed a slip tracking controller that could integrate an Asymmetric Integral Barrier Lyapunov Function (AIBLF) and Neural Networks (NN) to ensure stable vehicle stopping in emergencies where the main braking system fails. The featured controller employed the AIBLF to directly constrain the slip ratio, a state variable existing in the negative region, within asymmetric constraints defined by a predefined lower bound and upper bound. Specifically, the lower bound constraint prevents situations where braking is insufficient, while the upper bound constraint effectively prevents wheel lock-up and the consequent loss of steering capability. Simultaneously, the robustness of the control is secured by estimating and compensating for various uncertainties, such as complex parameter variations in vehicle slip dynamics and unknown nonlinearities in real-time using the NN. Furthermore, it is proved via Lyapunov stability theory that tracking errors and neural network weight estimation errors are Uniformly Ultimately Bounded (UUB). Simulation verification using MATLAB/Simulink and TruckSim confirms that stable deceleration performance and directional stability can be maintained even on snow road conditions by strictly limiting the slip ratio within the desired boundaries.

Key words : Electronic parking brake(전자식 주차 브레이크), Slip tracking control(슬립 추종 제어), Asymmetric integral barrier lyapunov function(비대칭 적분 장벽 리아푸노프 함수), Neural network(신경망), Vehicle stability(차량 안정성), Commercial vehicle(상용 차량)

1. 서론

차량의 주행 안전성을 확보하기 위해 제동 시스템의 성능은 필수적인 요소이며, 이에 따라 제동 장치에 대한 연구가 지난 수십 년간 활발히 수행되어 왔다.¹⁻⁵⁾ 상대적으로 질량이 큰 상용차량의 경우에는 유지 보수가 용이하고 강력한 제동력을 발휘할 수 있는 공압식 제동

시스템을 채택한다⁶⁾. 최근 승용 차량뿐만 아니라 상용 차량에도 Electronic Parking Brake(EPB)가 도입되고 있다. 이에 따라 상용차량의 안전성을 위해 EPB를 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다.^{6,7)} 특히 EPB를 통한 제동 시, 후륜 휠 잠김을 방지하고 조향 능력을 유지하기 위해서는 EPB 액추에이터를 이용한 정밀한 슬립률

*Corresponding author, E-mail: ys.son@knu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

제어가 필수적으로 요구된다.⁷⁾

하지만 EPB는 제동력 생성 시, 본질적으로 응답 속도가 느리고 히스테리시스와 같은 강한 비선형적 특성을 가지므로 정밀한 제어가 어렵다. 이러한 특성들로 인해 시스템의 안정성이 크게 위협받을 수 있어 이에 대한 강한 제어 전략이 요구된다.^{8,9)} 또한, 복잡한 환경에서는 단순한 제어 메커니즘으로 외부 반응을 예측하기 어렵다는 점¹⁰⁾과, 후륜에 주로 작용하는 EPB의 특성상 제동력이 적절히 제어되지 않을 경우 요 레이트 불안정으로 인한 차량의 스핀 현상을 초래할 수 있다는 점¹¹⁾을 고려할 때, 하드웨어의 한계를 극복하고 제약 조건 내에서 안정적인 제어를 수행할 수 있는 비선형 제어 기법이 필수적이다.

안전한 제동을 위해서는 휠 잠김으로 인한 제동 거리 증가 혹은 조향 능력 상실을 방지하고, 슬립률이 최적 구간 내에서 유지되어야 한다. 제동 시스템을 비롯한 엄격한 제한이 요구되는 다양한 분야에서는 미리 설정된 오차의 범위를 넘지 않는 특성을 가진 Barrier Lyapunov Function(BLF) 기법이 폭넓게 적용되어 왔다.¹²⁻¹⁵⁾ 또한, 적분항을 도입하여 오차가 아닌 상태 변수를 직접적으로 제약할 수 있는 Integral Barrier Lyapunov Function(IBLF) 기법도 많이 채택되어 왔다.¹⁶⁻¹⁸⁾ 대부분의 분야에서는 상태 변수의 물리적 특성상 대칭적 제약 조건이 비효율적이다. 이러한 한계를 극복하고자 최근에는 비대칭 제약 조건으로 상태변수를 직접 제한하는 Asymmetric Integral Barrier Lyapunov Function(AIBLF) 기법이 다양한 분야에 적용되고 있다.^{19,21)} 차량의 제동 시, 슬립률은 음수 영역에만 존재하므로, 기존의 BLF 기법을 통한 대칭적인 제약 조건은 시스템의 물리적 허용 범위를 정밀하게 반영하기 어렵다.²²⁾ 안전한 비상 제동을 위해서는 비대칭적인 제약 조건을 통해 상태 변수인 슬립률을 직접 제한하는 방식이 필요하다.

이러한 방식이 실제 제동 시스템에서 최적의 성능을 발휘하기 위해서는 제어의 기준이 되는 타이어-노면 마찰력과 같은 물리량을 정확히 파악하는 것이 선행되어야 한다.²³⁾ 이처럼 추정이 어려운 정보들을 실시간으로 추정하기 위해 차량 동역학 통합 제어와 연계된 추정 기법과 다양한 관측기 설계 기법들이 제안되어 왔다.²⁴⁻²⁹⁾ 그러나 이러한 모델 기반 접근 방식은 시스템 파라미터가 명확하지 않거나 모델링되지 않은 동역학적 불확실성이 존재할 경우 추정 성능이 저하될 수 있다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 복잡한 비선형 시스템의 미지 동역학이나 계산이 복잡한 다양한 외란을 효과적으로 근사할 수 있는 Neural Network(NN) 기반의 제어 기법이 활발히 연구되고 있다.³⁰⁻³²⁾

최근 엄격한 상태 제약 조건 만족과 시스템 불확실성 보상을 동시에 달성하기 위해 AIBLF와 NN을 결합하는 융합 연구가 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다.³³⁻³⁵⁾ 제동 시스템 특성상 비대칭적 제약 조건이 필요하며, 물리량의 변화가 많고 불확실성이 다양하게 존재하므로 강건한 제어 성능과 제동 안정성을 보장할 수 있도록 AIBLF와 NN을 적용하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 주 제동 장치의 기능 상실이라는 비상 상황에서 차량의 안정적인 정지를 보장하기 위한 AIBLF와 NN을 결합된 슬립 추종 제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 AIBLF를 도입하여 상태 변수인 슬립률을 사전에 설정된 하한과 상한으로 음수 값에 존재하는 슬립률을 정의된 비대칭 제약 조건 내에 구속한다. 하한 제약 조건을 통해 제동이 되지 않는 상황을 방지하고, 상한 제약 조건을 통해 휠 잠김 현상 및 그로 인한 조향 능력 상실을 효과적으로 방지한다. 이와 동시에, 차량의 슬립 동역학의 복잡한 파라미터 변화 및 미지의 비선형성과 같은 다양한 불확실성을 NN을 통해 실시간 추정하여 보상함으로써 제어의 강건성을 확보하였다. 또한, 리아푸노프 안정성 이론을 통해 추적 오차와 신경망 가중치 추정 오차가 Uniformly Ultimately Bounded(UUB)됨을 증명하였다. MATLAB/Simulink와 TruckSim을 이용한 시뮬레이션 검증은 통해 Snow 노면 환경에서도 슬립률을 원하는 경계안으로 제한함으로써, 안정적인 감속 성능과 방향 안정성이 유지됨을 검증한다.

2. 제어 목표

2.1 EPB 구성

Fig. 1은 상용차량에 사용되는 공압식 EPB 시스템의 전체 구성을 나타낸다. 공압식 EPB 시스템은 상용차의 제동 특성을 고려하여 공기압을 주된 동력원으로 활용하며, 크게 신호 입력 부, ECU, 구동 액추에이터로 구성되며, 이는 일반적인 EPB 시스템의 신호 처리 및 제어 흐름을 따른다.⁶⁾ 차량 내 ECU는 차량 내 CAN 통신을 통해 가속 및 브레이크 페달 스위치, 엔진 토크, 요 레이트, 차량

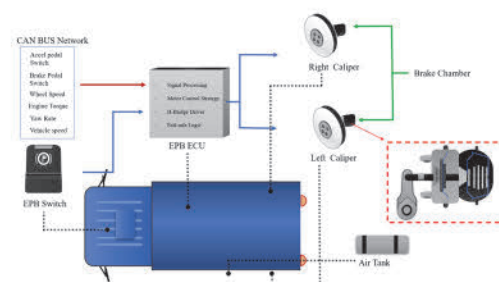


Fig. 1 EPB system configuration

속도, 현재 공기압과 같은 데이터를 실시간으로 수집한다. 공기압 상실과 같은 차량의 비상 상황 시 주차 브레이크 챔버 내부에 스프링의 팽창을 통해 휠을 고정하여 안정성을 확보한다.

2.2 제어기 설계

EPB시스템은 내재된 비선형성과 응답 지연으로 인해, 실제 주행 환경에서 정밀한 제동력을 확보하는 것에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 AIBLF기법을 통한 비대칭 제약조건으로 음수 값으로 존재하는 슬립률을 효율적으로 제한한다. 하한 제약범위를 통해 제동이 되지 않는 상황을 방지하며, 상한 제약범위를 통해 휠 잠금을 방지한다. 모델링 되지 않은 외란을 보상하기 위해 NN 관측기를 결합한 제어 구조를 설계하였다. 전체적인 구성은 Fig. 2와 같으며 전체 제어 구조는 운전자의 EPB 스위치 조작각에 따라 목표 슬립률을 산출하는 것으로, 제어기는 차량 센서로부터 실제 슬립률과 오차를 입력받아 연산을 수행한다. AIBLF는 상태변수인 슬립률이 정의된 임계값 내에 무무르도록 제한하여, 과도한 슬립이나 휠 잠금을 방지한다. NN 기반 관측기를 통해 실제 환경에서 물리량 변동 같은 다양한 차량 동역학 시스템에는 수학적 모델링이 난해한 다양한 비선형 외란을 실시간으로 학습하고 추정하는 역할을 수행한다. 이를 통해 시스템은 예측 불가능한 외란이 인가되는 상황에서도 안정적인 제어 성능을 유지가 가능해진다.

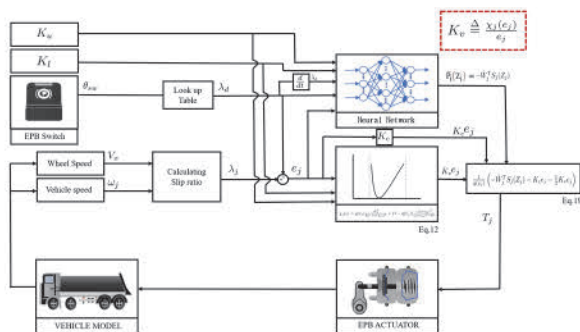


Fig. 2 Block diagram of the proposed AIBLF-NN slip control system

3. 차량 동역학 및 슬립 동역학

본 장에서는 제어기 설계를 위한 차량의 동역학 모델을 정의한다. 또한, 차량의 타이어나 노면 사이의 마찰 특성 및 슬립율을 정의한다.

3.1 차량의 운동 방정식

차량의 종 방향 운동 방정식과 횡의 회전 운동 방정식

은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{v}_x &= \frac{1}{m} \left(\sum_i F_{xi} - cv_x^2 \right) \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{J} (-R_{eff} F_{xi} - T_i) \\ i &\in \{fl, fr, rl, rr\},\end{aligned}\tag{1}$$

v_x 는 차량의 무게중심에서의 종 방향 속도, ω_i 는 각 휠의 각 가속도이며, J 는 휠의 관성 모멘트, R_{eff} 은 휠의 유효반경, T_i 는 브레이크 토크를 나타낸다. 각각 fl, fr, rl, rr 는 왼쪽 앞 바퀴, 오른쪽 앞 바퀴, 왼쪽 뒷바퀴, 오른쪽 뒷바퀴를 나타낸다. m 은 차량의 질량, c 는 종 방향 공기 저항 계수이다. F_{xi} 는 각 휠의 위치에서의 종 방향 타이어-노면 마찰력이며, 마찰 계수 μ 와 타이어의 수직 하중의 곱으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{xi} &= \mu(\lambda_i) F_{zi} \\ F_{z fj} &= \frac{l_r mg - l_h m \dot{v}_x}{2(l_f + l_r)} \\ F_{z rj} &= \frac{l_f mg + l_h m \dot{v}_x}{2(l_f + l_r)} \end{aligned} \quad (2)$$

$\mu(\lambda_i)$ 는 슬립률에 따른 마찰 계수이며, F_{zi} 는 바퀴에 가해지는 수직 하중으로 제동 중 발생하는 하중 이동을 고려할 때 전륜(f)과 후륜(r)에 작용하는 수직하중의 l_f, l_r 는 각각 무게 중심에서 앞/뒤축까지의 거리를 나타내며, g 는 중력 가속도, h_h 는 무게중심의 높이를 나타낸다.

3.2 슬립롤 정의

슬립 추종 제어의 핵심 상태 변수인 슬립률 λ 는 제동 시 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_j = \frac{v_x - R_{eff} \omega_j}{v_x}. \quad (3)$$

제어기 설계를 위해 식(3)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\lambda}_j = \frac{\dot{v}_x(1-\lambda_j) - R_{eff}\dot{\omega}_j}{v_x}. \quad (4)$$

식 (4)에 앞서 정의한 차량의 종 방향 운동 방정식과 횡동역학 방정식을 대입하면, 다음과 같은 상태 방정식을 도출할 수 있다.

$$\dot{\lambda}_j = \frac{(1-\lambda_j)\sum_i F_{xi}}{v_{xm}} - \frac{(1-\lambda_j)cv_x^2}{v_{xm}} + \frac{R_{eff}^2 F_{xj}}{v_{xj}} + \Delta(t) + \frac{R_{eff}}{g(\lambda_j)} T_j. \quad (5)$$

상태 변수 x_j 를 슬립률 λ_j 로 정의한다. 식 (5)를 비선형 시스템 형태 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x}_j = f(x_j) + g(x_j)T_j + \Delta(t). \quad (6)$$

4. 제어기 설계

4.1 슬립 오차 동역학 기반 제어기 설계

슬립률을 안전 범위 내에서 효과적으로 억제하기 위해, 슬립 추종 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e_j = x_j - x_{jd}, \quad (7)$$

x_{jd} 는 목표 슬립률을 나타낸다. 오차 e_j 를 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{e}_j = \dot{x}_j - \dot{x}_{jd} = f(x_j) + \Delta(t) + g(x_j)T_j - \dot{x}_{jd}. \quad (8)$$

제동 중 과도한 슬립으로 인한 휠 잠김 현상을 방지하고 조향 안정성과 제동 효율을 보장하기 위해, x_j 는 허용 가능한 범위 내에 구속되도록 제한해야 한다. 이를 위해 다음과 같은 비대칭 제약 조건을 설정한다.

$$k_l < \lambda_j < k_u, \quad (9)$$

(9)에서 k_l, k_u 는 각각 오차의 하한 및 상한 경계를 규정하는 양의 함수이다. 비대칭 제약 조건을 충족하기 위해, 다음과 같은 전환 함수 $q(e_j)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$q(e_j) = \begin{cases} 1, & e_j > 0 \\ 0, & e_j \leq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

AIBLF 후보 함수 V_j 는 다음과 같이 정의된다.

$$V_j = \int_0^{e_j} \chi_j(\varsigma) d\varsigma, \quad (11)$$

$\chi_j(\varsigma)$ 는 다음과 같이 설계된다.

$$\chi_j(\varsigma) = q(e_j) \frac{\varsigma k_u^2}{k_u^2 - (\varsigma + x_{jd})^2} + (1 - q(e_j)) \frac{\varsigma(\varsigma + x_{jd})^2}{(\varsigma + x_{jd})^2 - k_l^2}. \quad (12)$$

제한 값인 k_u 와 k_l 은 상수이고, e_j 가 시간에 따라 변하는

함수이기 때문에, 식 (11)에 라이프니츠 적분 규칙 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_j &= \chi_j(e_j) \dot{e}_j + \int_0^{e_j} \frac{\partial \chi_j(\varsigma)}{\partial t} d\varsigma \\ &= \chi_j(e_j) \dot{e}_j + \dot{x}_{jd} \int_0^{e_j} \frac{\partial \chi_j(\varsigma)}{\partial x_{jd}} d\varsigma \end{aligned} \quad (13)$$

가상이득을 $K_v \triangleq \chi_j(e_j)/e_j$ 로 정의하여, 도출된 $\dot{V}_j$ 를 제어 입력 설계에 용이한 형태로 변환하면, 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_j &= e_j K_v (f(x_j) + \Delta(t) + g(x_j)T_j - \dot{x}_{jd}) \\ &\quad + \dot{x}_{jd} (q(e_j)\psi_{1j} + (1 - q(e_j))\psi_{2j}) \end{aligned} \quad (14)$$

ψ_{1j}, ψ_{2j} 는 x_{jd} 의 편 미분에서 발생한 적분항으로써, 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \psi_{1j} &= \int_0^{e_j} \frac{\partial}{\partial x_{jd}} \left(\frac{\varsigma k_u^2}{k_u^2 - (\varsigma + x_{jd})^2} \right) d\varsigma \\ \psi_{2j} &= \int_0^{e_j} \frac{\partial}{\partial x_{jd}} \left(\frac{\varsigma(\varsigma + x_{jd})^2}{(\varsigma + x_{jd})^2 - k_l^2} \right) d\varsigma \end{aligned} \quad (15)$$

미지의 비선형성을 그룹화하기 위해 다음과 같이 재정렬할 수 있다.

$$\dot{V}_j = e_j K_v (g(x_j)T_j + P_j(Z_j)), \quad (16)$$

결합 불확실성 $P_j(Z_j)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} P_j(Z_j) &= f(x_j) + \Delta(t) - \dot{x}_{jd} \\ &\quad + \frac{\dot{x}_{jd}}{e_j K_v} (q(e_j)\psi_{1j} + (1 - q(e_j))\psi_{2j}) \end{aligned} \quad (17)$$

Radial Basis Function Neural Network(RBFNN)을 사용하여, 식 (17)을 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$P_j(Z_j) = W_j^* T S_j(Z_j) + \epsilon_j, \quad (18)$$

ϵ_j 은 재구성 오차를 나타낸다.

4.2 AIBLF-NN 비선형 제어기 설계

EPB의 제동 토크 제어 입력 T_j 는 비 선형성을 상쇄하고 시스템을 안정화하기 위해 다음과 같이 설계된다.

$$T_j = \frac{1}{g(x_j)} \left(-\tilde{W}_j^T S_j(Z_j) - K_c e_j - \frac{1}{2} K_v e_j \right), \quad (19)$$

$K_c > 0$ 은 제어 이득이며, $\tilde{W}_j$ 는 추정된 가중치 벡터이다. 가중치 적응 법칙은 다음과 같이 선택된다.

$$\dot{\tilde{W}}_j = \Gamma_j (e_j K_v S_j(Z_j) - K_a \tilde{W}_j), \quad (20)$$

$\Gamma_j = \Gamma_j^T > 0$ 는 적응 이득 행렬이며, $K_a > 0$ 은 sigma-modification 파라미터이다.

4.3 안정성 분석

앞서 설계된 제어 입력 T_j 와 가중치 적응 법칙이 전체 페루프 시스템의 안정성을 보장하는지 검증하기 위해, 리아프노프 후보함수 L_j 를 다음과 같이 정의한다.

$$L_j = V_j + \frac{1}{2} \tilde{W}_j^T \Gamma_j^{-1} \tilde{W}_j, \quad (21)$$

$\tilde{W}_j = \hat{W}_j - W_j^*$ 는 신경망 가중치 추정 오차를 나타낸다. (21)을 시간에 대해 미분하고, 앞서 도출한 오차동역학 식과 제어 입력 식 (19)를 대입하면 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \dot{L}_j = & e_j K_v \left(-\tilde{W}_j^T S_j - K_c e_j - \frac{1}{2} K_v e_j + W_j^{*T} S_j + \epsilon_j \right) \\ & + \tilde{W}_j^T \Gamma_j^{-1} \dot{\tilde{W}}_j \end{aligned} \quad (22)$$

정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{L}_j = & -K_c K_v e_j^2 - \frac{1}{2} (e_j K_v)^2 + e_j K_v \epsilon_j - e_j K_v \tilde{W}_j^T S_j \\ & + \tilde{W}_j^T \Gamma_j^{-1} \dot{\tilde{W}}_j \end{aligned} \quad (23)$$

Young's inequality($e_j K_v \epsilon_j \leq \frac{1}{2} (e_j K_v)^2 + \frac{1}{2} \epsilon_j^2$)를 적용하면, $-\frac{1}{2} (e_j K_v)^2$ 항이 상쇄되며, (19)를 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{L}_j \leq & -K_c K_v e_j^2 + \frac{1}{2} \epsilon_j^2 - e_j K_v \tilde{W}_j^T S_j \\ & + \tilde{W}_j^T (e_j K_v S_j - K_a \tilde{W}_j) \\ \leq & -K_c K_v e_j^2 + \frac{1}{2} \epsilon_j^2 - K_a \tilde{W}_j^T \tilde{W}_j \end{aligned} \quad (24)$$

강건한 적응 제어를 위해 부등식 $-K_a \tilde{W}_j^T \tilde{W}_j \leq -\frac{K_a}{2} \|\tilde{W}_j\|^2 + \frac{K_a}{2} \|W_j^*\|^2$ 를 식에 적용하면, 최종적으로 다음과 같은 $\dot{L}_j$ 에 대한 미분 부등식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{L}_j \leq & -K_c V_j - \frac{K_a}{2} \|\tilde{W}_j\|^2 + \left(\frac{K_a}{2} \|W_j^*\|^2 + \frac{1}{2} \epsilon^2 \right) \\ \leq & -A L_j + C \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 $A = \min(K_c, K_a \lambda_{\min}(\Gamma_j))$ 이며, $C = \frac{K_a}{2} \|W_j^*\|^2 + \frac{1}{2} \epsilon^2$ 는 유계된 양의 상수이다. 미분 부등식을 풀면 다음과 같은 해를 얻는다.

$$L_j(t) \leq L_j(0) e^{-At} + \frac{C}{A} (1 - e^{-At}). \quad (26)$$

식 (24)에 따르면 $t \rightarrow \infty$ 임에 따라 $L_j(t)$ 는 C/A 근방으로 수렴하며 유계 된다. L_j 가 유계됨으로써, 이를 구성하는 V_j 와 가중치 오차 $\tilde{W}_j$ 또한 모두 유계됨이 증명되었다. 이는 추적 오차와 신경망 가중치 추정 오차가 Uniformly Ultimately Bounded(UUB)임을 의미한다. 이로써 식 (9)를 절대 위반하지 않음을 수학적으로 보장한다.

5. 시뮬레이션 결과

제안된 제어기의 성능을 평가하기 위해 상용 차량동역학 시뮬레이션인 TruckSim과 MATLAB/Simulink 활용한 공동 시뮬레이션 환경에서 진행하였다. 시뮬레이터 환경은 GVW상태의 15.5t급 중형 사용 트럭 모델을 통한 미끄러운 Snow 노면 환경($\mu = 0.2$)에서의 제동력과 안정성을 평가하였다. 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 높이기 위해 실제 공압식 EPB 모듈레이터의 비선형적인 응답 지연을 시뮬레이션에 구현하였으며, 상용차 특유의 하중 배분 및 휠 관성 등 실제 차량 특성을 엄격히 준수하여 실제 시스템의 거동을 충실히 재현하였다. 시뮬레이션 환경은 선행 연구를 통해 검증된 Table 1에 명시된 상용 차량의 제원을 기반으로 수행되었다.⁹⁾ 슬립 제약조건인 k_l 와 k_u 은 최대 마찰력이 발생하는 지점과 과도한 슬립으로 인해 제동력이 저하되는 것을 방지하기 위한 값으로 선정하였으며, 이를 통해 제동 중 슬립률이 k_l 와 k_u 값의 사이를 유지하며 마찰력을 효율적으로 운용할 수 있도록 설계되었다.

Table 1 Simulation parameters

Simulation parameters					
Curb Vehicle Weight	10,000kg	Aerodynamic Drag Coefficient	4.3m		
Gross Vehicle Weight	15,500kg	Center of Gravity Height	1.35m		
Wheel Rotational Inertia	17.5kg · m ²	Wheelbase	0.419m		
Effective Rolling Radius of Tire	0.298K g/m	k_u	k_l	-0.02	-0.11

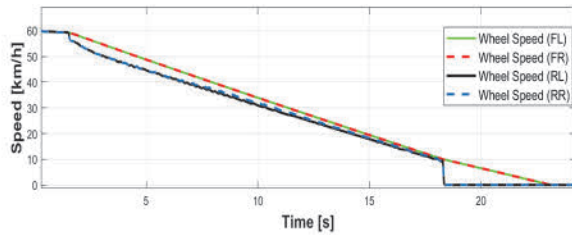
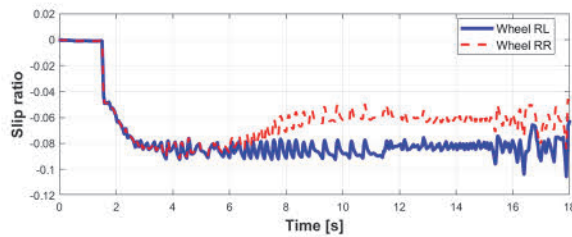
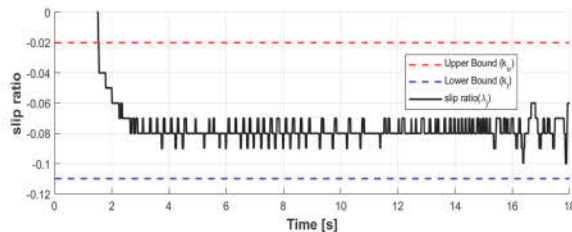


Fig. 3 Vehicle wheel speeds



(a) Variations of slip ratio during braking

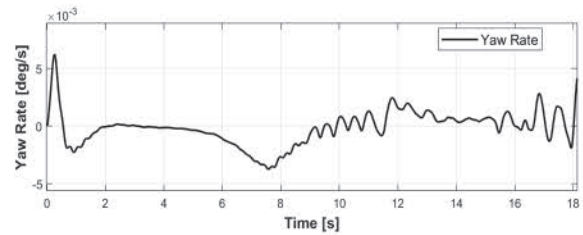


(b) Slip ratio constraint performance within prescribed bounds

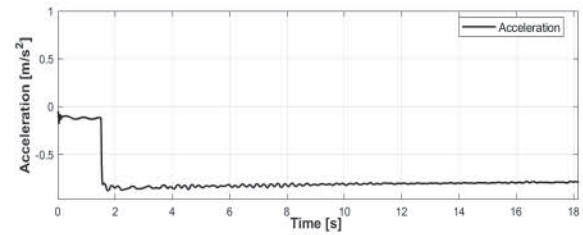
Fig. 4 Slip ratio analysis

Fig. 3은 Snow 노면 환경에서의 전륜 및 후륜의 휠 속도를 나타낸다. 차량은 60 km/h 로 주행 중 후륜EPB를 통한 제동을 수행하는 시나리오이다. 전륜 바퀴는 자유 회전하며, 차량의 속도와 휠 속도가 동일하게 유지된다. 약 2 s 부터 브레이크를 밟아 제동 명령을 인가하였으며, 약 22 s 에 차량이 완전히 정지한다. 저속 구간에서의 슬립률 제어는 실효성이 낮으므로, 약 18 s 이후 저속 구간에서는 제어가 개입하지 않는다. 차량에 제동 명령이 인가된 시점부터 제어가 개입하지 않는 시점까지 후륜의 휠 속도는 차량의 속도를 안정적으로 추종하며, EPB를 통한 후륜만으로 제동을 수행하는 상황에서도 후륜의 휠 속도가 0이 되는 휠 잠금 현상이 발생하지 않음을 보여준다.

Fig. 4는 슬립률 변화를 나타낸다. 운전자가 탑승한 좌측 휠의 상태를 기준으로 제어를 진행하였다. Fig. 4(a)에서 차량의 감속 과정에서 후륜 좌측 바퀴와 후륜 우측 바퀴의 슬립률이 제어 과정 동안 휠 잠금 현상이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)에서 나타난 바와 같이, 제어 과정 구간에서 사전에 정의한 제약조건 (9)를 이탈하지 않는 것을 확인할 수 있다. 미끄러운 눈길 노면 환경에서도 발산없이 제약 조건을 완벽히 만족시킴으로



(a) Measurement of vehicle directional stability (yaw rate)



(b) Changes in vehicle braking deceleration over time

Fig. 5 Deceleration and vehicle stability

써, 시스템의 상태 변수가 증명된 안전 영역 내에 머무름을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

Fig. 5(a)는 제동 시나리오 동안 발생한 차량의 요 레이트를 나타낸다. 제어 과정 구간 동안 최대 요 레이트는 약 $3.9 \times 10^{-3} \text{ deg/s}$ 이내로 측정되었다. 이는 눈길과 같은 불규칙한 노면 조건에서도 심각한 스핀이나 횡방향 미끄러짐 없이 주행 경로를 안정적으로 유지했음을 의미한다. 이어 제안된 제어기의 실제 제동 효율을 평가하기 위해 감속도 응답을 분석하였다. Fig. 5(b)는 시뮬레이션의 가속도 센서 데이터를 산출한 감속도이다. 실험이 진행된 눈길 환경에서 차량은 제동 구간 동안 약 1.1 m/s^2 내외의 일정한 감속도를 유지하였다. 제안된 제어기가 슬립률을 엄격하게 제한함으로써, 타이어가 미끄러운 노면에서 낼 수 있는 마찰력을 지속적으로 최대치에 가깝게 활용하고 있음을 시사한다. 결과적으로, Snow 노면 환경에서도 제동거리를 효과적으로 단축할 수 있다는 것을 의미한다.

5. 결론

본 논문에서는 상태 변수인 슬립률이 제약 조건을 위배하지 않도록 제한하는 AIBLF 제어 구조를 설계하였으며, 설계된 제어기의 안정성은 리아푸노프 안정성 이론을 통해 증명하였다. 시뮬레이션 결과 저마찰 노면 환경에서도 슬립률이 사전에 정의한 제약 조건 내에 안정적으로 제한됨을 확인하였다. 이를 통해 차량의 안정적인 감속 성능과 휠 잠금 방지를 통한 조향 능력을 확보하여 비상 제동 시의 주행 안정성을 검증하였다. 향후 연구에서는 제안된 고정된 제약 조건을 노면 마찰력과 같은 물

리량을 추정하여 주행 상황에 따라 실시간으로 최적화 되는 시변 제약 조건으로 확장하는 제어기를 설계할 예정이다. 또한, 시뮬레이션을 수행하여 다양한 환경에서의 안정성과 성능을 확보하고, 기존 제어기법과의 비교 분석 통해 검증할 예정이다.

후 기

본과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 대구광역시의 재원으로 대구RISE센터의 지원을 받아 경북대학교에서 수행하는 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-03-001).

References

- 1) Z. Q. Shi, I. Legate, F. Gu, J. Fieldhouse and A. Ball, "Prediction of Antilock Braking System Condition with the Vehicle Stationary Using a Model-Based Approach," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.11, No.3, pp.363-373, 2010.
- 2) T. A. Johansen, J. Kalkkuhl, J. Ludemann and I. Petersen, "Hybrid Control Strategies in ABS," *Proceedings of the 2001 American Control Conference*, Vol.2, pp.1704-1705, 2001.
- 3) S. L. Perić, D. S. Antić, M. B. Milovanović, D. B. Mitić, M. T. Milojković and S. S. Nikolić, "Quasi-Sliding Mode Control with Orthogonal Endocrine Neural Network-Based Estimator Applied in Antilock Braking System," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.21, No.2, pp.754-764, 2016.
- 4) B. Wang, X. Guo, W. Zhang and Z. Chen, "A Study of an Electric Parking Brake System for Emergency Braking," *International Journal of Vehicle Design*, Vol.67, No.4, pp.315-346, 2015.
- 5) J. Park, C. Im, T. Kim and Y. Kim, "Design of Electronic Parking Brake Control Simulator for Emergency Vehicle Braking," *Transactions of KSAE*, Vol.25, No.1, pp.19-27, 2017.
- 6) Y. O. Lee, S. Kwon, J. S. Cho, M. C. Kwon and Y. S. Son, "Rule-Based Dynamic Braking Control of Pneumatic Electronic Parking Brake for Commercial Vehicles," *Electronics*, Vol.14, No.16, Paper No.3255, 2025.
- 7) P. Peng, H. Wang, X. Wang, W. Wang, D. Pi and T. Jia, "Research on the Hill Start Assist of Commercial Vehicles Based on Electronic Parking Brake System," *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, Vol.65, No.1, pp.11-22, 2019.
- 8) Z. Wang, X. Zhou, C. Yang, Z. Chen and X. Wu, "An Experimental Study on Hysteresis Characteristics of a Pneumatic Braking System for a Multi-Axle Heavy Vehicle in Emergency Braking Situations," *Applied Sciences*, Vol.7, No.8, Paper No.799, 2017.
- 9) W. G. Lee, Y. O. Lee, M. S. Jang, C. W. Lee, C. C. Chung and H. B. Chung, "Fault Tolerant Control of Sensor Fault of EPB System," *Transactions of KSAE*, Vol.18, No.4, pp.8-17, 2010.
- 10) V. Guglielmetti, P. Grasso, F. Gaj and G. Giacomini, "Mechanized Tunneling in Urban Environment: Control of Ground Response and Face Stability When Excavating with an EPB Machine," *Reclaiming the Underground Space*, Vol.2, Routledge, London, pp.645-652, 2022.
- 11) H. Zhu, L. Li, M. Jin, H. Li and J. Song, "Real-Time Yaw Rate Prediction Based on a Nonlinear Model and Feedback Compensation for Vehicle Dynamics Control," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol.227, No.10, pp.1431-1445, 2013.
- 12) K. P. Tee and S. S. Ge, "Control of Nonlinear Systems with Partial State Constraints Using a Barrier Lyapunov Function," *International Journal of Control*, Vol.84, No.12, pp.2008-2023, 2011.
- 13) Y. Kumar, S. B. Roy and P. B. Sujit, "Barrier Lyapunov Function-Based Trajectory Tracking Controller for Autonomous Vehicles with Guaranteed Safety Bounds," *Proceedings of the 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp.722-728, 2020.
- 14) D. Cruz-Ortiz, I. Chairez and A. Poznyak, "Sliding-Mode Control of Full-State Constraint Nonlinear Systems: A Barrier Lyapunov Function Approach," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol.52, No.10, pp.6593-6606, 2022.
- 15) W. Sun, S. F. Su, Y. Wu, J. Xia and V. T. Nguyen, "Adaptive Fuzzy Control with High-Order Barrier Lyapunov Functions for High-Order Uncertain Nonlinear Systems with Full-State Constraints," *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol.50, No.8, pp.3424-3432, 2020.
- 16) Y. Zhou, W. Dong, Z. Liu, M. Lv, W. Zhang and Y. Chen, "IBLF-Based Fixed-Time Fault-Tolerant Control for Fixed-Wing UAV with Guaranteed Time-Varying State Constraints," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.72, No.4, pp.4252-4266, 2023.
- 17) T. Gao, T. Li, Y. J. Liu and S. Tong, "IBLF-Based Adaptive Neural Control of State-Constrained Uncertain Stochastic Nonlinear Systems," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol.33, No.12, pp.7345-7356, 2022.
- 18) Y. Wei, Y. Wang, C. K. Ahn and D. Duan, "IBLF-Based Finite-Time Adaptive Fuzzy Output-Feedback Control for Uncertain MIMO Nonlinear State-Constrained

- Systems,” IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.29, No.11, pp.3389-3400, 2021.
- 19) X. Chen, Z. Dai, H. Lin, Y. Qiu and X. Liang, “Asymmetric Barrier Lyapunov Function-Based Wheel Slip Control for Antilock Braking System,” International Journal of Aerospace Engineering, Vol.2015, Article ID 917807, 2015.
- 20) J. Li, X. Wang, R. Jiao and M. Dong, “Asymmetric Integral Barrier Lyapunov Function-Based Human-Robot Interaction Control for Human-Compliant Space-Constrained Muscle Strength Training,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol.54, No.7, pp.4305-4317, 2024.
- 21) S. Pal and S. Hota, “Impact Angle Control Guidance Using Asymmetric Integral Barrier Lyapunov Function with FOV and Input Constraints,” IEEE Control Systems Letters, Vol.9, pp.2663-2668, 2025.
- 22) L. Zhang, L. Zhu and C. Hua, “Adaptive Exponential Convergence State-Constrained Control for Interconnected Nonlinear Systems with Time-Varying Unknown Parameters,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol.54, No.8, pp.4713-4725, 2024.
- 23) D. K. Lee, J. I. Park and J. H. Lee, “The Real-Time Measurement of Dynamic Radius and Slip Ratio at the Vehicle,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.6, pp.89-94, 2006.
- 24) R. Wang, C. Hu, Z. Wang, F. Yan and N. Chen, “Integrated Optimal Dynamics Control of 4WD4WS Electric Ground Vehicle with Tire-Road Frictional Coefficient Estimation,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.60-61, pp.727-741, 2015.
- 25) J. J. Rath, K. C. Veluvolu and M. Defoort, “Simultaneous Estimation of Road Profile and Tire Road Friction for Automotive Vehicle,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.64, No.10, pp.4461-4471, 2015.
- 26) J. J. Castillo, J. A. Cabrera, A. J. Guerra and A. Simon, “A Novel Electrohydraulic Brake System with Tire-Road Friction Estimation and Continuous Brake Pressure Control,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.63, No.3, pp.1863-1875, 2016.
- 27) J. J. Rath, K. C. Veluvolu, M. Defoort and Y. C. Soh, “Higher-Order Sliding Mode Observer for Estimation of Tyre Friction in Ground Vehicles,” IET Control Theory & Applications, Vol.8, No.6, pp.399-408, 2014.
- 28) M. Faraji, V. J. Majd, B. Saghaei and M. Sojoodi, “An Optimal Pole-Matching Observer Design for Estimating Tyre-Road Friction Force,” Vehicle System Dynamics, Vol.48, No.10, pp.1155-1166, 2010.
- 29) S. Ko, J. Ko, S. Lee, J. Cheon and H. Kim, “A Study on the Road Friction Coefficient Estimation and Motor Torque Control for an In-Wheel Electric Vehicle,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.229, No.5, pp.611-623, 2015.
- 30) L. Zhang, Z. Li and C. Yang, “Adaptive Neural Network-Based Variable Stiffness Control of Uncertain Robotic Systems Using Disturbance Observer,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.64, No.3, pp.2236-2245, 2017.
- 31) S. Mukhopadhyay and K. S. Narendra, “Disturbance Rejection in Nonlinear Systems Using Neural Networks,” IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.4, No.1, pp.63-72, 1993.
- 32) H. Sun and L. Guo, “Neural Network-Based DOBC for a Class of Nonlinear Systems with Unmatched Disturbances,” IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol.28, No.2, pp.482-489, 2017.
- 33) Y. Guo, T. Yan, B. Xu, C. Tao and S. Sun, “Asymmetric Integral BLF-Based State-Constrained Flight Control Using NN and DOB,” International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.32, No.5, pp.3021-3038, 2022.
- 34) L. Li, L. Zhang and C. Yang, “AIBLF-Based Adaptive Neural Learning Event-Triggered Fault-Tolerant Control for Underwater Teleoperation Systems with Output and Communication Constraints,” IFAC-PapersOnLine, Vol.59, No.22, pp.710-715, 2025.
- 35) J. Chen, Z. Y. Dong, S. Shi, Y. Wei, X. Yu and L. Ou, “Adaptive-Constrained Admittance Control for Physical Human-Robot Interaction,” Transactions of the Institute of Measurement and Control, Vol.48, No.7, pp.1223-1237, 2025.