

대형트럭 보조 브레이크 시스템을 위한 브레이크 잠김 방지 시스템

오 지 열¹⁾ · 최 세 범^{*2)}

한국과학기술원 기계공학과¹⁾

Anti-lock braking system for heavy-duty truck with auxiliary braking system

Jiyeol Oh¹⁾ · Seibum Choi^{*2)}

^{1,2)}Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

Abstract : Heavy-duty trucks, used primarily for freight transportation, carry more weight and travel longer distances at high speed compared to passenger cars. Given the seriousness of the accidents involving heavy-duty trucks, the importance of strong and durable brakes in heavy-duty trucks should be stressed even more. While passenger cars depend on the friction brakes for deceleration, the active use of auxiliary brakes is recommended in heavy-duty trucks to prevent momentary and permanent degradation of the main brakes. However, the excessive or incorrect use of auxiliary brakes on slippery roads can cause slip of the driving wheels, which leads to vehicle instability. The driving wheel slip caused by auxiliary brakes can not be handled by conventional ABS(anti-lock braking system) equipped at the friction brakes. To address such problem, this study proposes a novel control algorithm to prevent vehicle instability caused by wheel slip resulting from the excessive use of auxiliary brakes, especially retarder here. The proposed algorithm is evaluated through MATLAB and TruckSim simulation programs, and the results are discussed in detail.

Key words : Heavy-duty truck(대형트럭), Auxiliary braking system(보조 브레이크 시스템), Retarder(리타더), Anti-lock braking system(바퀴 잠김 방지 장치), Driving wheel slip(구동륜 슬립), Vehicle lateral stability(차량 횡방향 안정성)

Nomenclature

I_w : driving wheel moment of inertia, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 ω : wheel rotational velocity, rad/s
 T_w : wheel torque applied by drive axle, $\text{N}\cdot\text{m}$
 $T_{b,rtid}$: retarder braking torque, $\text{N}\cdot\text{m}$
 r_e : effective radius of wheel, m
 F_x : tire longitudinal force, N
 F_y : tire lateral force, N
 F_z : tire vertical force, N
 λ : tire longitudinal slip ratio, -
 α : tire lateral slip angle, rad

g_d : gear ratio of differential box
 L_f : distance between front axle to vehicle c.g. point, m
 L_r : distance between rear axle to vehicle c.g. point, m
 t : track width, m
 τ_{rtid} : time constant of retarder
 τ_{pneu} : time constant of pneumatic friction brake

Subscripts

f1 : 1st front axle
 f2 : 2nd front axle
 r1 : 1st rear axle
 r2 : 2nd rear axle

1. 서론

미국 연방 고속 도로국(Federal Highway Administration)에서는 적재 중량을 포함하는 차량 총중량(gross vehicle weight)에 따라 트럭을 8가지 유형으로 분류하였고, 그중에 26,000lbs 이상의 7급과 33,000lbs 이상의 8급 트럭들을 가리켜 대형트럭이라 지칭한다. 이러한 대형트럭들은 차량의 무게가 약 10톤에서 40톤 정도로 일반 승용 차량의 5배에서 최대 40배에 달하고, 화물 운송을 주 목적으로 하기 때문에 장거리 고속주행을 하는 경우가 많다. 위와 같은 대형트럭의 물리적인 특성 및 주행 환경적인 특성으로 인해 더 높은 제동 성능과 내구성을 갖춘 브레이크 시스템을 요구하게 된다.^{1,2)}

대형트럭은 제동 및 정지를 위해 베이퍼 록(vapor lock) 현상 없이 강력한 제동 성능을 보이는 공압 마찰 브레이크(pneumatic friction brake)를 주 브레이크로 사용하지만, 이는 과도한 사용으로 인해 과열될 경우 브레이크 패드 페이드(fade) 현상에 의한 순간적인 제동 성능의 감소와 장기적인 성능 악화를 겪게 될 수 있다.³⁾ 마찰 브레이크의 이러한 문제점은 특히 지속적인 감속이 필요한 내리막 상황에서 자주 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서 현재 대형트럭은 마찰 브레이크를 보조하는 보조 브레이크 장치들을 필수적으로 장착하게 되어있다. 현재 가장 많이 사용되는 보조 브레이크에는 3가지 유형이 있는데, 엔진의 배기 밸브를 막음으로써 엔진 실린더에 역토크를 발생시키는 배기 브레이크(exhaust brake)와 엔진 행정 과정의 밸브 개폐 타이밍을 조절하여 역토크를 생성하는 제이크 브레이크(Jake brake)는 엔진 브레이크^{4,5)}, 변속기에 장착되어 유체 혹은 전자기 저항을 통해 출력축에 제동을 가하는 리타더(retarder)는 트랜스미션 브레이크로 분류된다.^{1,6)} 보조 브레이크들의 적절한 사용은 마찰 브레이크의 제동 부하를 분담함으로써 브레이크 패드의 과열로 인한 제동 성능 및 내구성 악화를 방지할 뿐만 아니라 제동 시 승차감 및 연비를 개선하여 주고, 지속적인 제동이 필요한 내리막길과 같은 주행상황

에서 운전자의 피로도를 완화해주기도 한다.

하지만 보조 브레이크는 엔진과 변속기에 연결된 구동륜에만 제동을 가할 수 있다는 한계를 가지고 있고, 기존에 트럭에 장착된 바퀴 잠김 방지 장치(Anti-lock Braking System, 이하 ABS)로는 보조 브레이크의 사용으로 인한 구동륜의 슬립에 대처할 수 없다는 한계를 갖고 있다. 일반적으로 보조 브레이크는 마찰 브레이크에 비해 작은 제동력을 갖고 있기에 바퀴가 미끄러지거나 잠기는 현상이 발생하는 경우는 흔치 않지만, 후륜에 구동륜을 갖는 대형트럭의 특성상 보조 브레이크의 사용으로 인해 바퀴가 미끄러질 경우 심한 오버스티어(oversteer)가 발생하게 되고 이는 전륜이 미끄러지는 언더스티어(understeer)가 발생하는 상황보다 운전자가 대응하기 어렵기 때문에 큰 사고로 이어질 수 있다. 특히 굴절부를 갖고 있는 트랙터-트레일러 차량의 경우 구동 차량인 트랙터의 오버스티어는 잭나이프(jackknife) 현상으로 이어질 수 있다는 점에서 보조 브레이크의 사용으로 인한 구동륜의 슬립은 차량에 매우 심각한 안전 문제를 야기할 수 있다.

본문에서는 시뮬레이션을 통해 보조 브레이크를 장착한 대형트럭에서 구동륜의 슬립이 발생할 수 있는 대표적인 경우인 내리막길 선회 주행을 수행한다. 이때 보조 브레이크로는 단순성을 위해 고속에서 가장 강력한 제동 성능을 보이는 엔진 브레이크를 제외한 리타더만이 사용되고, 리타더의 사용으로 인해 구동륜의 슬립이 발생하는 것을 방지하는 리타더 ABS(Retarder Anti-lock Braking System, 이하 RABS)를 위한 간단하고 효과적인 제어 로직을 제안하고자 한다.

2. Retarder ABS 제어기

2.1 바퀴 다이내믹스

바퀴 다이내믹스는 다음과 같다.

$$I_w \dot{\omega} = T_w - r_e F_x \quad (1)$$

* 오지열, E-mail: wlduf3187@kaist.ac.kr

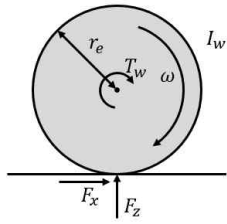


Fig. 1 Wheel dynamics

2.2 RABS 제어기

타이어의 종방향 및 횡방향 마찰력은 타이어 종방향 슬립율 $\lambda = \frac{r_e \omega - V_x}{V_x}$ 와 타이어 횡방향 슬립각 $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{v_{y,tire}}{v_{x,tire}} \right)$ 으로 묘사된다. 가장 단순한 타이어 마찰력 모델인 선형 타이어 모델에서는 타이어 종방향 힘과 횡방향 힘이 독립적이지만, 실제로 둘은 종속적인 관계를 보인다.^{7,8)}

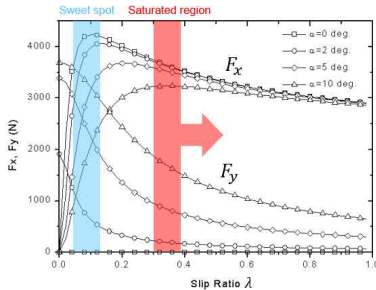


Fig. 2 Generic tire force graph

2.2.1 최적 슬립 목표값

ABS는 기본적으로 제동 시에 바퀴의 과도한 슬립으로 인해 타이어의 접지력, 특히 타이어가 횡방향으로 접지력을 잃는 것을 막아주기 위해 장착된다.^{7,8)} 따라서 타이어 종방향 슬립율의 크기가 최대 0.2를 넘지 않게 하고, 타이어 횡방향 슬립각 α 가 커질수록 타이어 종방향 슬립율 λ 목표값이 지수 함수의 형태로 감소하는 식 (2)와 같이 채택하였다.⁹⁾

$$\lambda^* = -0.2 \exp(-11.513|\alpha|) \quad (2)$$

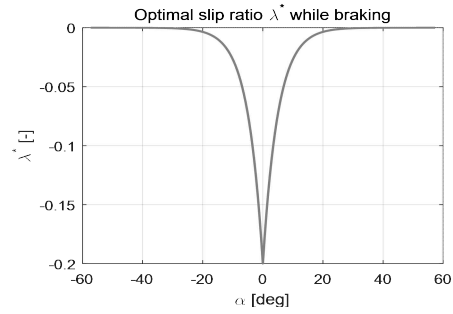


Fig. 3 Optimal tire longitudinal slip ratio λ^*

2.2.2 RABS 작동 조건

리타더는 변속기 출력축에 장착되어 구동륜에 제동을 가하게 된다. 따라서 구동륜의 슬립이 발생했다고 판단될 경우 RABS를 식 (3)과 같이 작동시킨다.

$$\begin{aligned} &\text{if } \min_{\text{wheels}} \lambda \leq -0.2, \text{ RABS on} \\ &\text{if } \min_{\text{wheels}} \lambda > -0.1, \text{ RABS off} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2.3 리타더 제동 토크 목표값

리타더는 변속기 출력축에 장착되어 변속기 출력축 회전 속도의 제동에 비례하는 최대 제동토크를 갖는다.

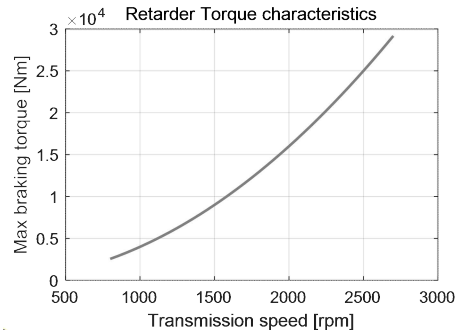


Fig. 4 Retarder maximum braking torque

리타더의 제동 토크 목표값을 계산하기 위해서 식 (4) 같은 리아푸노프 함수(Lyapunov function)를 선정하였다. 또한 바퀴 다이내믹스를 타이어 종방향 슬립율에 대한 식으로 변형하면 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$V(\tilde{\lambda}) = \frac{1}{2} \tilde{\lambda}^2 \quad \text{where } \tilde{\lambda} = \lambda - \lambda^* \quad (4)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{r_e}{I_w V_x} (T_w - r_e F_x) \quad (5)$$

위 함수를 미분한 값이 negative definite 하게 만들게 되면 타이어 종방향 슬립율 λ 는 λ^* 에 지수 함수의 형태로 수렴하게 된다. 이를 위해 바퀴 다이내믹스 식 (1)을 타이어 종방향 슬립율에 대한 식으로 변형한 식 (5)를 사용하여 휠 토크 목표값 T_w 를 찾게 되면 식 (6)와 같이 된다.

$$\dot{V} = \dot{\lambda} \dot{\lambda} = \dot{\lambda} \left[\frac{r_e}{I_w V_x} (T_w - r_e F_x) \right] = -k \dot{\lambda}^2 \quad (6)$$

$$T_w = r_e F_x - \frac{I_w V_x}{r_e} k (\min \lambda - \lambda^*)_{wheels}$$

결과적으로 리타더의 제동 토크 목표값은 오픈 디퍼렌셜의 기어비를 곱하여 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{b,rtd} = \frac{1}{g_d} \Sigma T_w \quad (7)$$

3. 시뮬레이션

시뮬레이션 환경은 MATLAB, Simulink, TruckSim 을 통해 구성되었다.

3.1 대상 차량

	4축 카고 트럭
차량 총중량	16,500kg
L_{f1}	2.479m
L_{f2}	0.674m
L_{r1}	3.521m
L_{r2}	5.326m
t	2.07m
I_w	24m
r_e	0.51m
g_d	4.4
τ_{rtd}	0.05s
τ_{pneu}	0.3s

Table. 1 Vehicle specifications

실험 차량은 8x4 카고 트럭으로 3축과 4축에 구동륜을 갖는다. 동력의 분배는 모두 오픈 디퍼렌셜 (open differential)을 통해 이루어지며, 차량 제원은

표 1과 같다.

3.2 차량 제어기

3.2.1 종방향 속도 제어기

종방향 속도 제어기는 목표 속도에 대한 간단한 PD 제어기를 통해 차량의 구동 혹은 제동 토크의 요구값을 얻었다. 제동 시에 공압 마찰 브레이크와 리타더를 모두 사용할 경우 리타더의 사용을 우선시 하고 종방향 속도 제어기로부터의 제동 토크 요구량이 리타더의 최대 제동 토크값을 초과할 경우 나머지 공압 마찰 브레이크에 할당하였다.

3.2.2 횡방향 조향 제어기

횡방향 조향 제어 모델은 TruckSim 차량 시뮬레이션 프로그램의 내장 운전자 모델을 사용하였다. 이때 운전자의 preview time은 1.5초로 선택하였다.

3.3 시뮬레이션 결과 및 분석

경사도가 -6%이고 노면 마찰계수가 0.3, 지름이 500m인 선회로에서 60km/h로 달리던 차량이 30km/h로 감속하는 주행 시나리오에 대해 실험을 진행했고, RABS 장착 여부에 따른 실험 결과를 분석하였다.

3.3.1 리타더만 사용한 경우

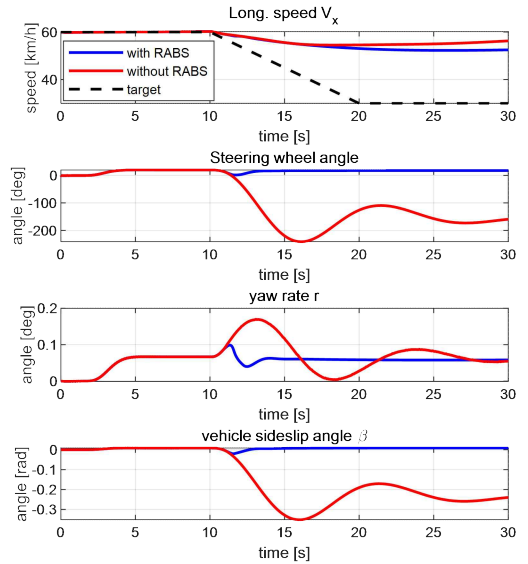


Fig. 5 Simulation results, retarder only (1)

Fig. 5를 보면 먼저 RABS가 사용된 경우와 사용되지 않은 경우 모두 속도 레퍼런스를 따라가지 못하는 모습을 보인다. 이는 리타더만으로는 해당 노면에서 충분한 제동력을 얻어낼 수 없기 때문이다. 다만 RABS를 사용하였을 경우 약간의 접지력 개선을 통해 종방향 속도 추종에 있어 근소한 성능 개선을 보임이 확인된다. 차량 횡활각 그래프를 보게 되면 RABS가 없는 경우 구동륜의 슬립으로 인해 차량의 횡방향 안정성이 크게 위협받는 것을 확인할 수 있고 운전자가 차량의 이동 경로를 보정하기 위해 카운터스티어를 수행하는 것을 확인할 수 있다.

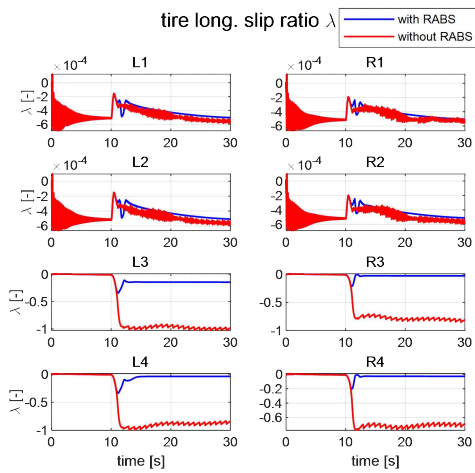


Fig. 6 Simulation results, retarder only (2)

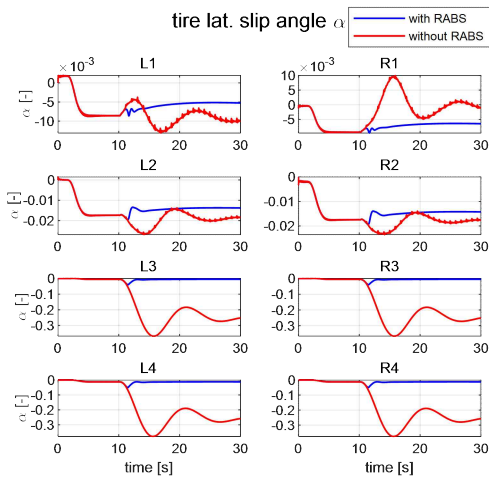


Fig. 7 Simulation results, retarder only (3)

Fig. 6과 Fig. 7은 각 바퀴에서의 종방향 및 횡방향

슬립에 대한 그래프로, 이를 통해 RABS가 없는 경우 미끄러운 노면에서 리타더의 사용으로 인해 구동륜의 슬립이 발생하고 본문에서 제안하는 RABS의 장착이로 구동륜의 과도한 슬립을 막을 수 있음이 더욱 명확하게 확인된다.

3.3.2 리타더와 공압 브레이크를 사용한 경우

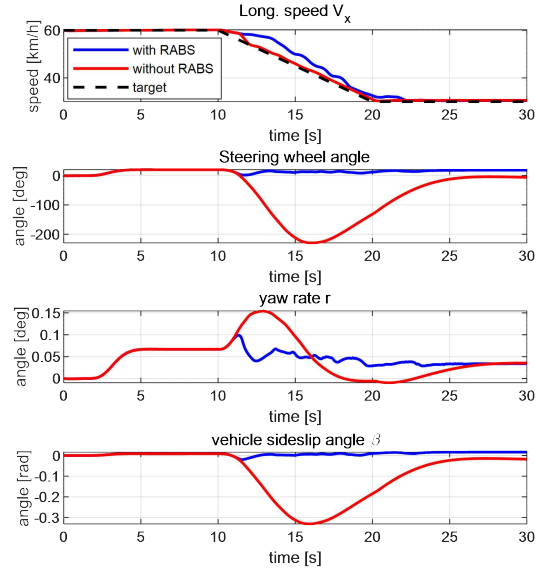


Fig. 8 Simulation results, pneumatic and retarder (1)

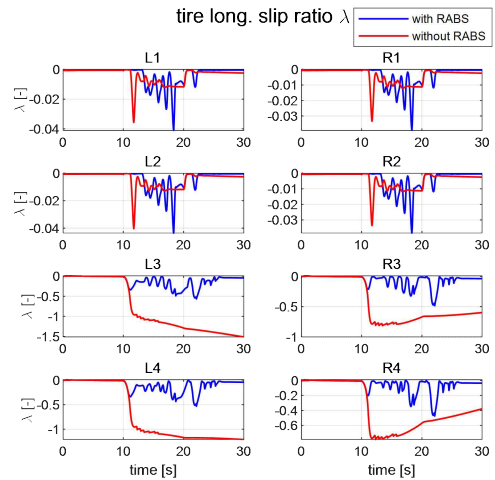


Fig. 9 Simulation results, pneumatic and retarder (2)

리타더만을 사용한 제동의 경우에서 확인할 수 있는 것과 마찬가지로 RABS를 통해 구동륜의 슬립을 막고 차량의 횡방향 안정성을 개선할 수 있음을

확인할 수 있다. 다만 이 경우에는 RABS 사용으로 인해 속도 추종 성능이 악화된 모습을 확인할 수 있는데 이는 종방향 속도 제어기로부터 생성된 리타더 제동 토크 요구값을 무시하고 RABS에서 생성된 독립적인 리타더 제동 토크 목표값을 넣어주었기 때문에 발생한 것이다. 해당 차이는 공압 마찰 브레이크의 적절한 대응을 통해 쉽게 개선할 수 있다.

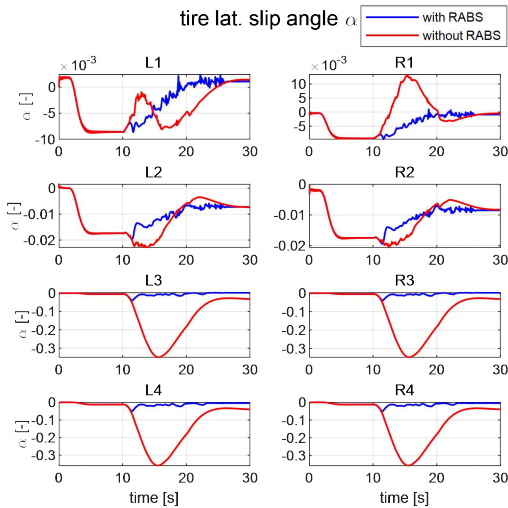


Fig. 10 Simulation results, pneumatic and retarder (3)

4. 결론

본문에서는 대형트럭에 사용되는 보조 브레이크의 사용으로 인해 구동륜에 슬립이 발생할 수 있고 이는 기존의 공압 마찰 브레이크만을 위해 설계된 ABS로는 해결될 수 없음을 짚고 이에 대한 해결책으로 간단하고 효과적인 RABS 알고리즘을 제안하고, 이를 내리막 선회 주행 시나리오에 대해 시뮬레이션을 진행했다. 시뮬레이션 결과 본문에서 제안하는 RABS 알고리즘은 리타더의 사용으로 인한 구동륜의 슬립을 효과적으로 방지하고 차량의 횡방향 안정성에 도움을 주는 것을 확인할 수 있었다.

Acknowledgement

이 연구는 교육부 및 한국연구재단의 4단계두뇌한국21 사업(4단계BK21 사업) 연구비 지원, 산업기술혁신사업 캐빈교체형 자율셔틀 공용새시플랫폼

기술 개발 연구비 지원(20014983), 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(20010263), 정부(산업통상자원부 및 산업기술평가관리원)의 재원으로 자율주행기술개발혁신사업단의 지원(20018181)에 의한 연구임.

References

- 1) Lu, Xiao-Yun, and J. Karl Hedrick. "Heavy-duty vehicle modelling and longitudinal control." *Vehicle System Dynamics* 43.9 (2005): 653-669.
- 2) Druzhinina, M. and Stefanopoulou, A., 2002, Speed control experiments for commercial heavy vehicle with coordinated friction and engine compression brakes, Proc. of 2002 American Control Conference, Anchorage, Alaska, 8-10 May, pp. 2546-2551.
- 3) 김진택, et al. "상용 트럭의 공압 브레이크 응답 특성에 관한 연구." *한국산학기술학회 논문지* 13.5 (2012): 1969-1975.
- 4) Khan, P. M., et al. "Development and evaluation of exhaust brake systems for light commercial vehicle." (2005).
- 5) Manolache-Rusu, I. C., M. Glovnea, and C. Suciuc. "Preliminary studies on the braking efficiency of an engine working in combined Jake brake and exhaust brake regime." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 591. No. 1. IOP Publishing, 2019.
- 6) Gao, Zhiwei, et al. "Design and Braking Stability Analysis of a Novel Internal Pump-Hydraulic Retarder Axle for Heavy Articulated Vehicle." *International Journal of Automotive Technology* 23.5 (2022): 1285-1294.
- 7) M. Choi and S. B. Choi, "Model predictive control for vehicle yaw stability with practical concerns," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 8, pp. 3539-3548, 2014.
- 8) H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 2nd ed. SAE, 2006.
- 9) Park, Jong Hyeon, and Chan Young Kim. "Wheel slip control in traction control system for vehicle stability." *Vehicle system dynamics* 31.4 (1999): 263-278.