



자작자동차 선회 성능 향상을 위한 후륜 독립 구동 토크 벡터링 제어 로직에 관한 연구

김종윤^a, 김성준^b, 박서희^b, 김성걸^{b,*}

Rear Wheel Independent Drive Torque Vectoring Control Logic for Improving Cornering Performance of a Custom-built Vehicle

Jong Yun Kim^a, Seong Jun Kim^b, Seohee Park^b, Seong Keol Kim^{b,*}^a Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology^b Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	30	July	2025
Revised	26	August	2025
Accepted	3	September	2025

Keywords:

Torque vectoring
Cornering performance
Rear wheel independent drive
Vehicle dynamic control
Electric vehicle

ABSTRACT

This study aimed to enhance the cornering performance of a custom-built vehicle by applying a rear wheel independent drive (RWID) system. The drivetrain was designed to independently distribute power to the left and right axles, optimizing agility and stability. A torque vectoring controller based on yaw moment control was developed in MATLAB/Simulink and preliminarily validated using vehicle dynamics simulations. The validated controller was implemented on the vehicle through automatically generated code, and its performance was verified via real-world driving tests. Torque measurements using a chassis dynamometer and data collection through a logger confirmed the effectiveness of the system. Compared to a conventional equal torque distribution strategy, the proposed RWID system reduced slalom lap time by 1.4% and steering angle by 6.7% under identical test conditions. These results demonstrate the effectiveness of independent rear-wheel drive systems in improving cornering performance, particularly for lightweight electric vehicles and autonomous mobility platforms.

1. 서론

모빌리티 산업에 전자제어 시스템이 들어오면서 차량의 선회 성능을 향상하고자 토크 벡터링(torque vectoring)과 여러 제어에 관한 연구가 이어지고 있다. 본 연구에서는 자작 자동차의 코너링(cornering) 성능을 향상하기 위한 토크 벡터링 중 후륜 모터 독립 구동 시스템을 선택하였다. 후륜 모터 독립 구동 방식은 좌우 모터가 독립적으로 제어되어 제어할 수 있는 토크 범위가 넓고 보다 큰 요 모멘트(yaw moment)를 만들 수 있다. 그러나 모터 성능으

로 인한 최대 토크(torque) 출력치에 한계가 있다는 단점이 있다. 하지만 이러한 단점들을 보완하면서 토크 벡터링 제어를 구현하였다.

맷랩/시뮬링크(Matlab/Simulink) 환경에서 제어를 설계하고 차량 동역학 시뮬레이션과 연계하여 제어기의 유효성을 사전 검토하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 코드 변환 작업을 거쳐 실제 자작 차량에 제어를 적용하고, 실제 주행 테스트를 통해 성능을 최종 검증하였다.

또한, 샤시 다이내모미터(chassis dynamometer)를 활용하여

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6855

E-mail address: rhett@seoultech.ac.kr (Seong Keol Kim).



Fig. 1 Appearance of developing vehicle

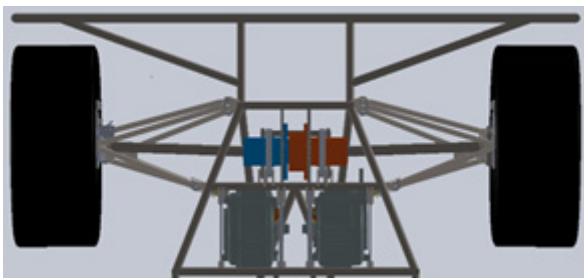


Fig. 2 Appearance of RWID system

각 휠(wheel)의 토크 출력을 측정하고, 데이터 로거(data logger)를 통해 성능 개선 효과를 수집 및 분석하였다. 실험 결과, 토크 벡터링 시스템 도입이 자작 자동차의 슬라럼 랩타임(slalom lap time)을 1.4% 단축하고 조향각을 6.7% 감소시키는 효과를 보였다.

본 연구는 독립 구동 시스템이 차량 코너링 성능에 미치는 긍정적인 영향을 입증하며, 향후 자율주행차 및 고성능 차량 개발에서 새로운 가능성을 제시한다. 이 연구는 차량 성능 향상을 위한 차세대 구동 제어 기술의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 자작자동차의 모델링

2.1 자작자동차의 모델링

기존의 자작자동차는 보통 하나의 모터의 동력이 차동기어를 거쳐 양쪽 휠로 전달되는 형식이다. 이러한 형식은 선회 시 좌우 휠의 동력분배를 수동적으로 할 수밖에 없다는 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하고 능동적인 동력분배를 통해 선회성능을 향상 시키고자 후륜독립구동 토크 벡터링을 적용하였다. 자작자동차의 외형, 제원 그리고 파워트레인(powertrain), 후륜독립구동 시스템의 외형은 각각 Table 1과 Fig. 1, Fig. 2에 나타나 있다.

차동기어 없이 모터에서 발생한 동력을 좌우측의 휠로 바로 보내는 방식으로 독립구동 시스템을 설계하였다. 독립구동 제어 시

Table 1 Vehicle specification and performance

Parameter	Value
Vehicle mass	230 [kg]
Distance from C.G to front axle	0.65 [m]
Distance from C.G to rear axle	0.64 [m]
Tire diameter	0.452 [m]
Track width	1.086 [m]
Cornering stiffness	350 [N/deg]
Gear ratio	3.643

스템은 기존 연구^[1-3]를 참고하여 센서와 마이크로 컨트롤러 유닛(Microcontroller unit, MCU)보드를 선정하였다.

3. 제어기 설계

3.1 모터 토크제어

자작 자동차 토크 벡터링 제어는 실제 요 각속도가 기준 요 각속도를 따라갈 수 있도록 양쪽 모터의 토크를 분배하는 방식으로 설계되었다. 운전자가 페달을 밟는 양에 비례하여 요구되는 구동력을 계산하고 revolutions per minute (RPM)에 따라 제한되는 최대 토크와 운전자의 가속 의지, 요구 요 모멘트를 계산하여 최대한 가속 성능 저하 없이 토크 벡터링이 이루어지도록 설계하였기 때문에 모터의 토크 그래프 및 데이터는 필수적인 요구사항이었다. 72 V 정격 모터를 대회 규정으로 인해 48 V에서 사용하게 되면서 기존 모터 회사에서 제공하는 데이터가 아닌 실험을 통해 48 V에서의 데이터를 얻기 위해 다음과 같이 두 가지의 방법으로 실험을 진행하였다.

3.1.1 직선도로 실험을 통한 모터 토크 그래프

직선도로에서 진행된 실험에서는 모터의 RPM과 마이크로 컨트롤러 유닛에 입력되는 스로틀링(throttling) 값에 따른 토크 데이터를 수집했다. 이 실험은 아두이노(Arduino)를 통해 일정한 스로틀 값을 컨트롤러에 입력하고, 주행 중 모터의 RPM을 캔(controller area network, CAN) 모듈로 받아 에스디(secure digital, SD) 카드에 저장하는 방식으로 진행했다. 수집된 데이터를 바탕으로 시간-모터 RPM 그래프를 작성했고, 차량의 무게, 바퀴 반지름, 기어 비를 고려하여 모터의 RPM에 따른 토크를 식 (1)~(4)로 계산했다. Fig. 3 또한 공기 저항 식 (5)와 구름 저항 식 (6)을 고려한 후, 다이نام미터에서 얻은 모터 토크 데이터와 유사한 값을 도출할 수 있었다.

$$\frac{MotorRPM}{\geq arRatio} = WheelRPM \quad (1)$$

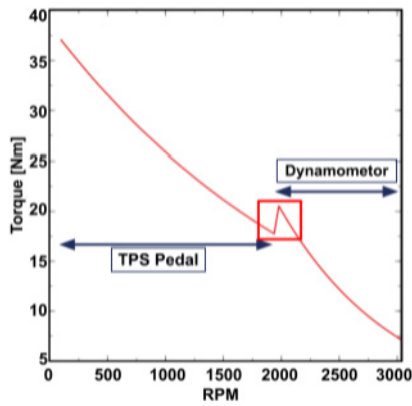


Fig. 3 A torque-RPM graph without considering rolling resistance and air resistance

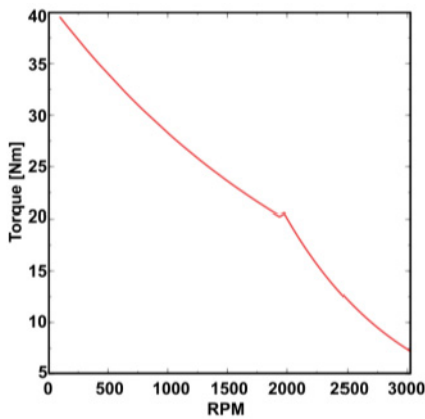


Fig. 4 A torque-RPM graph considering rolling resistance and air resistance

$$WheelRPM * TireR * \frac{2\pi}{60} = v \quad (2)$$

$$v dt = a \quad (3)$$

$$\frac{a * TireR * W}{\geq arRatio} = Motor Torque \quad (4)$$

$$R_a = \mu_a A v^2 \quad (5)$$

$$R_r = \mu_r A v^2 \quad (6)$$

3.1.2 새시 다이내모를 통한 모터 토크 그래프

새시 다이내모 실험은 페달값에 따른 토크-RPM 그래프 Fig. 4 및 Fig. 5 와 같이 기어비와 약계자 파라미터를 선정하기 위한 것이었다. 1:3.9와 1:3.6의 두 가지 기어비를 비교하고, 약계자 제어 범위를 50에서 90까지 나누어 실험을 수행했다. 실험 결과, 기어비

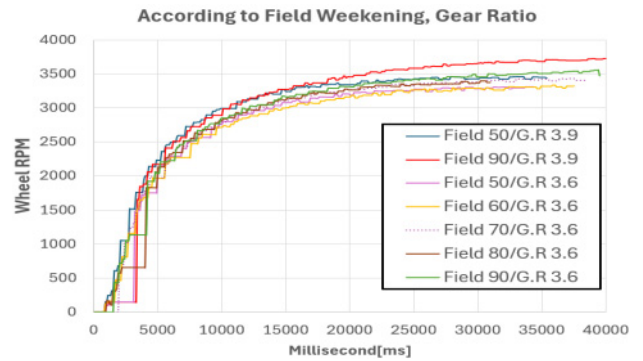


Fig. 5 Speed graph based on gear ratio and field-weakening parameter values

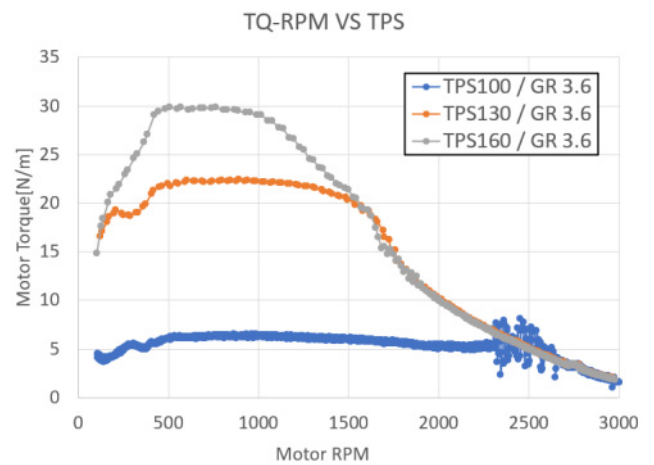


Fig. 6 Torque-RPM graph corresponding to throttle values (100, 130, 160)

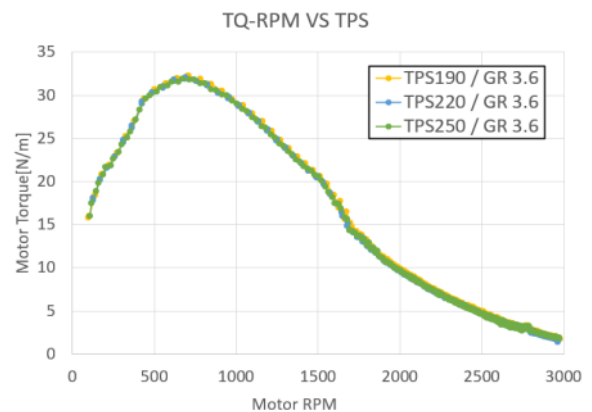


Fig. 7 Torque-RPM graph corresponding to throttle values (190, 220, 250)

를 3.6으로 낮추는 것이 최고속도를 높이는 데 효과적이며, 모터의 부하도 견딜 수 있는 범위를 확인했다. 또한 기어비 3.6에서 스톱값에 따른 모터의 토크-RPM 그래프를 실험을 통해 그렸다. Fig. 6의 경우 스톱값 100, 130, 160일 때, Fig. 7의 경우 스톱값 190, 220, 250에 대한 그래프이다.

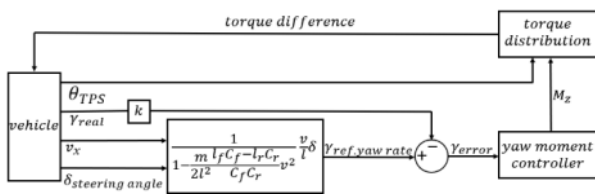


Fig. 8 Block diagram of torque vectoring controller

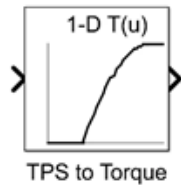


Fig. 9 Matlab 1D lookup table

3.2 토크분배 알고리즘

토크 벡터링 제어를 위해 타이어 선회 강성 계수 값^[4]을 이용하여 목표 요 각속도를 계산해 이를 추종하도록 제어기를 구성하였다.

Fig. 8은 제안된 토크 벡터링 제어기의 전체 블록 다이어그램을 나타낸다. 운전자의 가속페달 입력과 차량 동역학 데이터를 기반으로 목표 요속도를 산출하고, 이를 좌우 모터에 적절히 분배하여 제어하는 구조로 설계되었다.

3.2.1 토크벡터링 제어를 위한 기준 토크값

인버터 신호선 전압에 따른 휠 토크를 계산하여 기준 총 토크량을 계산하였다.

Fig. 9는 Matlab에서 구현된 1D Lookup Table로, 인버터 입력 전압을 바탕으로 휠에 전달할 기준 토크를 산출하는 데 활용된다.

3.2.2 운전자 가속페달 입력값에 따른 토크분배 알고리즘

운전자의 가속페달 입력값에 따라서 양쪽 구동축 합산 휠 토크가 결정되고, 목표 요 속도^[5-6](reference yaw rate) 식 (7)을 추종하도록 목표 요 속도에 비례 증폭값(proportional gain)을 곱해 요구 모멘트 양이 결정된다. 이를 통해 양쪽 구동축에 토크를 조절한다.

$$\gamma_{ref} = \frac{1}{1 - \frac{m}{2l^2} \frac{l_f C_f - l_r C_r}{C_f C_r} v^2} \frac{v}{l} \delta \quad (7)$$

3.2.3 토크성능저하 방지 알고리즘(e-LD)

5 kW급 저출력 모터를 이용하여 토크를 조절하기 때문에, 고속에서는 모터의 특성에 의해 토크가 저하된다. 제한된 최대토크를 고려하지 않고 토크 분배를 하면 가속력이 저하된다. 이를 방지하

기 위해 운전자의 가속페달 양에 따라 K_{LD} 값을 바꾸고, 이를 통해 가속력 또는 선회력 위주의 토크 분배를 식 (8)과 같이 하도록 알고리즘을 구성하였다.

$$T_{ref} = K_{LD} * T_{LD} + (1 - K_{LD}) * T_{TV} \quad (8)$$

4. 실차 실험 및 시뮬레이션 해석 결과

본 연구의 시뮬레이션은 차량 동역학 해석이 가능한 상용 수준의 시뮬레이터 플랫폼을 기반으로 구성되었다. 해당 플랫폼은 차량 제원 및 제어 알고리즘을 연동할 수 있도록 설정되었으며, ISO3888-2 규격에 기반한 이중차선변경 및 슬라럼 등 주행 시나리오를 구현하였다. 이를 통해 실제 차량과 유사한 동적 반응을 모사하고, 제어기 적용 전후의 성능을 정량적으로 비교할 수 있었다.

토크벡터링 제어 성능을 평가하기 위해 ISO 규정을 참조하여 주행시험 시나리오 및 평가방법과 시험 항목별 정량적 성능지수를 정의하였다. 본 논문에서는 토크벡터링을 적용했을 때 차량의 선회 성능이 얼마나 향상되었는지에 대한 평가를 하였다. 모든 결과 그래프에서 토크벡터링을 하지 않았을 때를 LD, 토크벡터링 제어는 TV로 나타내었다.

4.1 시뮬레이션 이중차선변경 해석 결과 비교

이중차선변경(double lane change)^[7-9]은 ISO3888-2^[10] 기준에 따른 차량의 핸들링 성능과 안정성을 평가하기 위해 설계된 표준 시험으로, 테스트의 핵심 목적은 급격한 조향 입력에 따른 반응을 분석하는 것이다. 차량의 코스 진입속도는 70 km/h로 가속페달을 밟지 않은 조건이며, 주행코스를 유지하기 위한 핸들 각을 입력하는 조건으로 시뮬레이션을 하였다.

토크벡터링을 적용했을 때, 요 각속도 root mean square (RMS) 값, 횡가속도 RMS 값, 조향각과 횡가속도 피크 대 피크(peak to peak)값이 감소하였다. 이를 통해서 급격한 선회시 제어를 통해 차량이 더 안정적으로 거동한다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 시뮬레이션 시나리오에서 시간에 따른 조향각 변화를 나타낸다. 제어기 적용 전후 비교를 통해 조향 반응 특성의 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 11은 시간에 따른 요속도 추이를 보여주며, 제어기 적용 시 안정적인 선회 반응을 유지함을 나타낸다.

Fig. 12는 횡가속도의 시간 변화 추이를 나타내며, 제어기 적용 시 피크 값이 낮아져 안정성이 향상되었음을 보여준다.

4.2 실차 슬라럼 주행 테스트 결과 비교

슬라럼^[11] 주행 코스는 6 m와 8 m 간격의 트래픽 콘 6개를 왕복

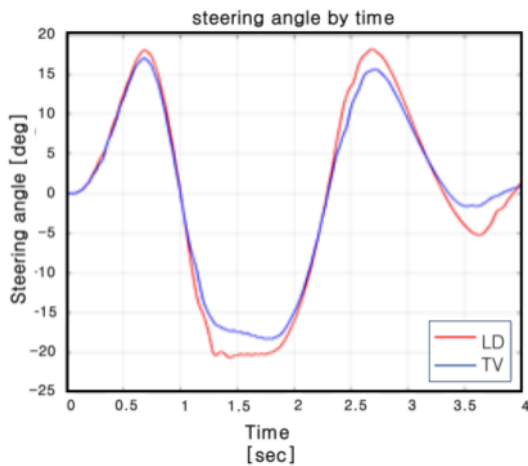


Fig. 10 Steering angle by time

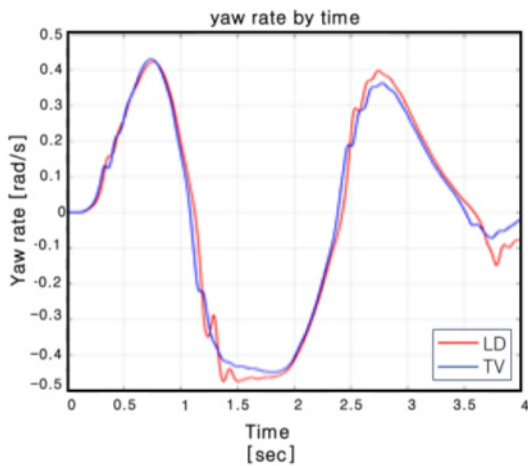


Fig. 11 Yaw rate by time

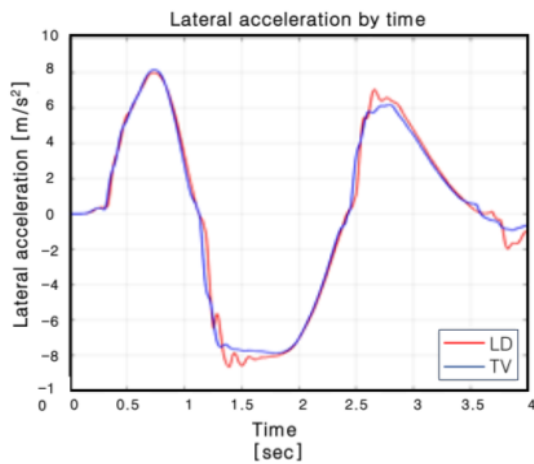


Fig. 12 Lateral acceleration by time

하는 코스로 구성하였다.

토크벡터링을 적용했을 때와 적용하지 않았을 때 각각 6회 실험을 진행한 결과, 가장 랩타임이 우수한 데이터를 비교하였다.

동일 슬라럼 코스를 주행할 때 요구 조향각은 평균 6.7% 감소하

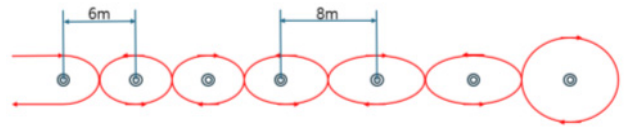


Fig. 13 Slalom test track

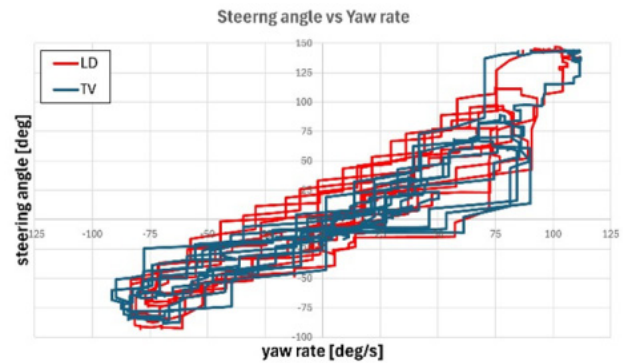


Fig. 14 Steering angle vs yaw rate

고 랩타임은 1.4% 향상되었다. 요 레이트는 증가되거나 유지되는 것을 보아, 적은 조향각으로 더 큰 선회력을 만들어낼 수 있음을 확인하였다.

Fig. 13은 슬라럼 실험에 사용된 주행 트랙 구성으로, 각 콘 사이 간격은 6m 또는 8m로 설정되었다. 동일 조건의 반복 실험을 위한 레이아웃을 시각화한 것이다.

Fig. 14는 조향각과 요속도 간의 관계를 비교한 그래프이다. 토크 벡터링 제어 적용 시 동일한 조향 입력으로 더 큰 요속도를 얻을 수 있어 선회 성능 향상 효과가 나타난다.

5. 결론

본 연구에서는 후륜 독립구동식 동력축을 장착한 차량의 선회 성능 향상을 위해 실험을 통해 모터 특성그래프를 얻고 토크벡터링 제어로직을 가상환경과 실제 환경에 적용하였다. 이를 통해 선회 성능 향상을 확인하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 모터 토크제어를 할 수 있도록 실험을 통해 맵을 작성하였다.

(2) 운전자가 제어로 인해 토크의 부족함을 느끼지 않도록 조절하여 제어로 인한 성능저하를 최소화하였다.

(3) 실제 차량 슬라럼 실험 진행 결과, 제어를 적용하지 않았을 때와 비교하여 조향각이 6.7% 감소, 슬라럼 랩타임이 1.4% 증가해 선회 성능이 향상되었음을 확인하였다.

본 연구에서는 시뮬레이션 환경에서 토크벡터링 시스템을 사전 캘리브레이션 하고 실제 차량에 시스템을 적용한 결과 차량의 선회 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 실제 차

량에 토크벡터링 시스템을 적용하면 차량의 선회성능 뿐만 아니라 안정성도 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

6. Nomenclature and Subscript Definitions

Nomenclature

$MotorRpm$	Motor rotational speed
$WheelRpm$	Wheel rotational speed
T	Motor output torque
r	Tire radius
η	Mechanical efficiency
v	Vehicle velocity
a	Vehicle acceleration
R_a	Aerodynamic drag force
μ_a	Air density or aerodynamic coefficient
A	Frontal area of vehicle
R_r	Rolling resistance force
μ_r	Rolling resistance coefficient
C_f	Front cornering stiffness
C_r	Rear cornering stiffness
l_f	Distance from C.G. to front axle
l_r	Distance from C.G. to rear axle
m	Vehicle mass
δ	Steering angle
γ_{ef}	Reference yaw rate
K_{LD}	Weighting coefficient for e-LD control
T_{LD}	Torque calculated by LD logic

Subscripts

ref	Reference value
a	Aerodynamic
r	Rear (or right, context-dependent)
f	Front
L	Left
R	Right
TV	Torque Vectoring control
$motor$	Motor-related value
$wheel$	Wheel-related value

References

- [1] Fricano, A., 2019, Design of Torque Vectoring System for Formula SAE Electric Vehicle, Doctoral Dissertation, Politecnico di Torino, Italia.
- [2] Brown, L., 2013, Improving Performance Using Torque Vectoring on an Electric All-Wheel-Drive Formula SAE Race Car, BE thesis, University of Western Australia, Australia.
- [3] Pawar, V. T. T., 2016, Active Torque Vectoring for All Wheel Drive FSAE Electric Car, Master thesis, University of Texas, US.
- [4] Jambukolam, S. S., Jain, K., Pal, A., 2022, Finding Optimum Ackermann Geometry for a Car Undergoing Steady State Cornering Using Tire Data, Materials Today: Proceedings, 56:6 3627-3635, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.276>.
- [5] Kim, D. G., Choi, S. R., 2018, A Dynamic Simulation for Handling Characteristic Analysis of Torque Vectoring Application in In-Wheel System-ed Vehicle, KSAE Spring Conference Proceedings, 426-435.
- [6] Xuanhao, C., Kai, H., Yufeng, L., Yantao, T., 2018, Direct Yaw Moment Control of Electric Vehicle for Improving The Vehicle Lateral Stability, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 1520-1525, <https://doi.org/10.1109/ICMA.2018.8484674>.
- [7] Park, J. Y., Lee, J. W., Heo, S. J., 2019, Study on Control Algorithm Development of Front Wheel Driven Dual Motor Torque Vectoring System and Handling Performance Evaluation, Transactions of KSAE, 27:4 301-308, <https://doi.org/10.7467/KSAE.2019.27.4.301>.
- [8] The MathWorks, inc., n.d., viewed 30 Jun. 2025, Double-Lane Change Maneuver <<https://kr.mathworks.com/help/vdynblks/ug/double-lane-change-maneuver.html>>.
- [9] Angelis, S., Tidlund, M., Leledakis, A., Lidberg, M., Nybacka, M., Katzourakis, D., 2014, Optimal Steering for Double-Lane Change Entry Speed Maximization, Proceedings of ACEV'14 International symposium on advanced vehicle control, 22-26.
- [10] ISO, 2011, Passenger Cars — Test Track for a Severe Lane-change Manoeuvre — Part 2: Obstacle Avoidance, ISO 3888-2, International Organization for Standardization, Switzerland.
- [11] Baek, I. S., Lim, W. S., 2024, A Study on the Torque Vectoring Control Logic of Twin Clutch Axle to Improve Vehicle Cornering Performance, Transactions of KSAE, 32:2 227-232, <https://doi.org/10.7467/KSAE.2024.32.2.227>.



Jong Yun Kim

Doctoral student in the Department of Mechanical Design and Robot Engineering, SeoulTech. His research interests include machine dynamics.

E-mail: lkio0416@gmail.com



Seong Jun Kim

Bachelor's degree in Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul Tech. His research interests include machine dynamics.

E-mail: lnamsea@gmail.com



Seohee Park

Bachelor's degree in Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul Tech. Her research interests include machine dynamics.

E-mail: sh5ya@naver.com



Seong Keol Kim

Professor in Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul Tech. His research interests include machine dynamics.

E-mail: rhett@seoultech.ac.kr