

<응용논문>

선회 상황 및 타이어 종슬립을 고려한 4륜 독립구동 전기차의 최적 토크 분배

허승희¹⁾ · 조완기¹⁾ · 유승한^{*1,2)}한국기술교육대학교 기계공학부¹⁾ · 한국기술교육대학교 기계공학과 미래융합공학전공²⁾

Optimal Torque Distribution for Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicles Considering Both Cornering Situations and Tire Longitudinal Slip

Seunghoe Heo¹⁾ · Wanki Cho¹⁾ · Seung-Han You^{*1,2)}¹⁾School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea²⁾Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 31253, Korea

(Received 2 August 2024 / Revised 26 August 2024 / Accepted 28 August 2024)

Abstract : As global carbon emission regulations tighten and the market for eco-friendly vehicles expands, research focuses on improving energy efficiency. This study proposes a real-time torque distribution method for four-wheel independent drive electric vehicles, considering cornering situations and tire longitudinal slip ratios. The optimal torque distribution aims to minimize the error between the actual and offline cost functions by estimating each wheel's speed based on vehicle speed, required torque, and yaw rate. Four approaches were compared: uniform torque distribution; conventional optimization, considering vehicle speed and required torque; optimization, including deceleration and acceleration during turns; and optimization accounting for cornering and tire slip. CarMaker and Matlab/Simulink were used for the simulation verification of the torque distribution method. The results showed that the proposed method significantly improved energy efficiency.

Key words : Estimation(추정), Optimization(최적화), Torque distribution(토크 분배), Yawrate(요레이트), Longitudinal slip(종방향 슬립)

Nomenclature

p	: front wheel distribution ratio	L	: wheelbase length, m
T	: total torque required by driver, Nm	h	: C.G height, m
T_d	: driving torque, Nm	T	: tread length, m
T_b	: regen braking torque, Nm	l_f	: distance from the C.G to front axle, m
n	: motor speed, rpm	l_r	: distance from the C.G to rear axle, m
η	: motor efficiency	V_x	: longitudinal vehicle speed, m/s
β	: side slip angle in vehicle body, rad	V_y	: lateral vehicle speed, m/s
γ	: yaw rate in vehicle in body, rad/s	a_x	: longitudinal acceleration, m/s ²
δ_f	: front wheel steering angle, rad	a_y	: lateral acceleration, m/s ²
C_f	: cornering stiffness at front tire, N/rad	g	: acceleration of gravity, m/s ²
C_r	: cornering stiffness at rear tire, N/rad	M_t	: total vehicle mass, kg
ω	: wheel speed, rad/s	F_x	: longitudinal tire force, N
r_{eff}	: effective tire radius, m	F_z	: vertical tire force, N
		s_d	: longitudinal driving slip ratio
		s_b	: longitudinal braking slip ratio

*Corresponding author, shyoo@koreatech.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.

- I_z : moment of inertia about Z-axis, kg/m^2
- θ : gradient, deg
- R_r : rolling resistance, N
- R_a : aerodynamic resistance, N
- F, R, all : front, rear, all
- FL, FR, RL, RR : front left, front right, rear left, rear right

1. 서론

전 세계적으로 탄소 배출 규제가 강화되면서 하이브리드 차량과 전기차의 수요가 증가하고 있다. 뿐만 아니라 목적 기반 차량과 코너 모듈과 같은 새로운 차량 플랫폼 개념이 향후 중요한 역할을 할 것으로 예상되면서 4륜 독립 구동시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 각 바퀴의 독립적 토크 제어를 통해 주행 성능, 에너지 효율성, 그리고 승차감까지 향상시키는 4륜 독립구동 전기차의 토크 분배 방법 관련 연구들이 진행중에 있다.¹⁻⁵⁾ 그 중 에너지 효율을 높이고자 4륜 구동 모터의 토크를 최적으로 분배하는 다양한 연구¹⁻⁴⁾들이 진행되고 있으며, 이는 아직도 4륜 독립 구동 전기차의 주행거리를 향상할 수 있는 충분한 여지가 남아 있음을 보여주고 있다.

현재 4륜 독립 구동 전기차의 에너지 효율 최적화를 위한 토크 분배 방법론으로 동적프로그래밍, 강화학습 기반의 연구^{6,7)}들이 활발히 이루어지고 있지만, 이 방식의 연구는 노면과 도로 상황 등 외부 상황에 관한 정보를 사전에 알고 있다고 가정하거나 주행 상황이 변경될 경우 강건하지 못한 측면이 있으며, 계산된 최적의 방식은 차량용 제어기에 적용하기에 계산 비용이 크다는 한계들이 존재한다. 그 때문에 외부의 주행 정보에 의존하지 않고 매 순간마다 최적의 토크를 실시간 분배하는 전략이 필요하다. 기존 국내 연구에서는 6륜의 토크 분배 전략, 타이어의 특성을 고려한 토크 분배 전략 등 오프라인에서 매 순간 토크를 분배하는 연구가 존재하였으나 선회상황을 고려하지 않은 연구¹⁻³⁾가 대다수였다. 반면 해외 연구에서는 선회상황을 고려한 연구가 존재하였지만, 타이어 슬립 특성을 고려하지 않았다는 점, 제동을 고려하지 않고 구동 상황만을 고려하는 단순 소모 전력을 최적화했다는 점에서 실제 차량의 전력 소모량을 정확히 반영하지 못한다는 한계가 있었다.⁸⁻¹¹⁾ 뿐만 아니라 모터의 정확한 속도를 예측하지 못하였기 때문에 실제 주행 상황의 최적 토크 분배비와 큰 오차를 발생시킬 수 있다는 문제점 또한 존재하였다. 즉 현재까지 국내외에서 선회상황과 타이어 슬립을 모두 고려한 연구는 크게 부족하였으며 본 연구에서는 이를 모두 고려한 전/후륜 토크 분배 전략을 수립하는 것을 목표로 하였다.

본 연구는 4륜 독립 구동 시스템에서 좌/우 모터의 회전 속도가 달라지는 선회상황과 타이어의 슬립/마찰 특성을 모두 고려하여 전륜과 후륜에 최적의 토크를 분배하는 방식을 제안한다. 한편, 좌/우 구동 모터의 토크는 동일하게 분배한다고 가정한다. 본 연구에서 최적의 토크 분배 비율을 결정하는 방식은 차량의 속도, 운전자의 요구 토크, 현재 요레이트를 통해 4륜의 휠 속도와 슬립율을 예측하여 오프라인에서 계산된다. 최적화는 모터의 구동에 의한 배터리 소모 전력과 회생 제동으로 얻는 충전 전력으로부터 계산되었다. 각 바퀴의 휠 속도에 따라 모터의 효율이 달라지며 비용함수가 다르게 도출되기 때문에 정확한 휠 속도를 추정할 필요가 있다. 실제로 요레이트를 고려할 경우 횡 속도(V_y), 사이드 슬립 각(β), 전륜 조향각(δ_f)에 의해 좌우 휠 속도가 달라지며, 슬립을 고려할 경우 각 휠에 발생하는 구동력과 차량 하중에 따라 전, 후륜의 휠 속도가 달라진다. 이에 따라 배터리 전력 소비를 최소화 하는 토크 분배비에도 차이를 보인다. 토크 분배비는 차속과 전체 요구 토크를 기반으로 최적화하는 방식, 요레이트를 추가적으로 고려하는 방식, 요레이트와 휠 슬립을 모두 추가적으로 고려하는 방식 간에 비교되며 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 주행시나리오는 차량 속도 프로파일을 UDSS(Urban Dynamometer Driving Schedule)로 선정하였고, 이 속도 프로파일의 선회반경 150 m의 선회 주행으로 가정하였다. 횡 가속도는 0.5 g 미만의 영역이었으며, 해당 주행 시나리오에서 기존 방법 대비 약 2.63 %의 전비 향상을 보여주었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 4륜의 휠 속도(모터의 속도)를 예측한 방법을 다루며 최적 토크 분배비를 산출한다. 3장에서는 각 방법에 의해 산출된 토크 분배 맵들의 전비 성능을 시뮬레이션을 통해 비교 검증하고, 결과와 원인을 상세히 설명한다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

2. 에너지 효율 최적화를 위한 4륜 휠속도 예측 기반 전후 토크 분배

에너지 소비를 최소화하는 최적의 전/후 토크 분배비를 산출하기 위해서는 임의의 주행 상황(차량 속도, 전체 요구 토크)에서 각각의 휠 속도와 모터 효율에 대해 정확한 예측이 필요하다. 선회상황에서 좌/우 휠 속도는 기구학적 관계식에 의해 요레이트에 따라 좌/우 속도 차가 발생하며 한편, 가감속시 요구 토크를 전륜 100%(후륜 0%), 후륜 100%(전륜 0%)로 분배함에 따라 타이어 힘과 연계된 전후륜의 슬립율이 달라지는 것은 자명하다. 따라서 각각의 모터 속도가 모두 다른 선회 가감속 상황

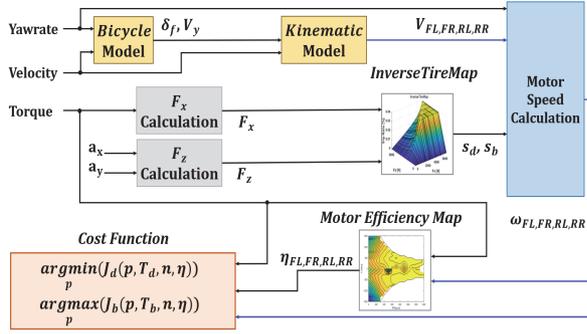


Fig. 1 Optimization process block diagram

에서 동일한 기준 속도로 4개의 모터 효율을 계산하는 기존 연구를 개선하여 본 연구에서는 선회 가감속 상황에서 4륜의 모터 속도를 요레이트, 타이어 슬립 등을 고려하여 정확히 예측한 후 이를 기반으로 산출된 모터 출력 효율을 전/후 토크 분배 최적화를 위한 비용함수에 반영하여 전/후 구동 토크 분배비를 최적화하였다.

2.1절에서는 기본적인 매 주행 순간 최적 전/후 토크 분배를 위한 비용함수를 정의하고, 2.2절에서는 선회 상황 시 요레이트를 고려하여 좌우 모터의 속도가 얼마만큼 달라질 수 있는지를 보인다. 2.3절에서는 선회 상황 시 타이어 종슬립을 고려하여 각 모터의 속도를 예측한다. 2.4절에서는 예측한 모터의 속도를 통해 최적화하는 과정을 설명하고 각 방식의 최적 분배비를 비교한다. Fig. 1은 전체 최적화 과정의 흐름을 설명하는 블록선도이다. 최적화를 위해 필요한 정보는 효율 산출을 위한 모터의 효율맵, 휠 슬립 고려를 위한 타이어 모델, 선회 시 휠 속 예측을 위한 차량 횡방향 모델이 요구된다.

2.1 에너지 최적화를 위한 비용함수 도출

구동 상황과 제동 상황에서 모터의 효율이 다소 다르기 때문에 이를 구분하여 구동 비용함수(J_d), 제동 비용함수(J_b)를 각각 도출하였다. 비용함수는 모터에서 소모되거나 충전되는 전력량으로 산출하였으며, 주행 상황에서 운전자에 의한 요구 토크와 휠 속도, 모터 효율의 관계식으로 계산하였다. 총 요구 토크($T_{all} = T_{front} + T_{rear}$) 중 전륜에 분배되는 토크(T_{front})의 비율(p)에 대해 주행 상황마다 비용함수가 최소(구동 시) 또는 최대(제동 시)가 되는 0~1 사이의 값을 찾았다. 식 (2)는 구동 상황에서 분배비에 대한 전력 소모량을 나타낸 것이며 최소가 되는 0~1 사이의 p 가 해당 주행 상황에서 최적 분배비가 된다. 식 (3)은 식 (2)와 유사하게 제동 상황에서 충전되는 전력량을 나타낸 것이며, 최대가 되는 0~1 사이의 p 가 요구 토크를 전륜에 분배하는 최적의 비가 된다.

$$p = \frac{T_{front}}{T_{all}} \quad (1)$$

$$\underset{p}{\operatorname{argmin}}(J_d(p)) = \{p | J_d(p) = \frac{pT_d^{n_{FL}}}{\eta_{FL}} + \frac{pT_d^{n_{FR}}}{\eta_{FR}} + \frac{(1-p)T_d^{n_{RL}}}{\eta_{RL}} + \frac{(1-p)T_d^{n_{RR}}}{\eta_{RR}}\} \quad (2)$$

$$\underset{p}{\operatorname{argmax}} J_b(p) = \{p | J_b(p) = pT_b^{n_{FL}}\eta_{FL} + pT_b^{n_{FR}}\eta_{FR} + (1-p)T_b^{n_{RL}}\eta_{RL} + (1-p)T_b^{n_{RR}}\eta_{RR}\} \quad (3)$$

2.2 선회 상황에서 4륜 휠 속도 예측

선회 상황에서 동일한 모터 속도로 가정하여 비용함수를 계산하는 것과 좌/우 다른 실제 모터 속도를 이용하는 경우는 최적 분배비를 도출하는 것에 있어 분명한 차이가 있다. 따라서 정확한 모터의 속도를 비용함수에 반영하기 위해서 선회 상황에 따라 달라지는 좌/우 모터 속도를 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 선회주행 상황마다 변화하는 계측 요레이트(γ)를 이용하여 좌/우 휠 속도를 예측하였다. 식 (4), (5)는 롤 각과 뱅크 각이 매우 작다는 가정하에 Bicycle model을 정리한 식이다.

$$\dot{\beta} = -\frac{2C_f + 2C_r}{M_t V_x} \beta + \left(-1 + \frac{2C_r l_r - 2C_f l_f}{M_t V_x^2}\right) \gamma + \frac{2C_f}{M_t V_x} \delta_f \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{-2C_f l_f + 2C_r l_r}{I_z} \beta - \frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{V_x I_z} \gamma + \frac{2C_f l_f}{I_z} \delta_f \quad (5)$$

위 식에서 계산한 β 를 이용해 V_x 와 $\tan \beta$ 의 곱으로 V_y 를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 차량의 절대 속도(V_x)와 조향각(δ_f)은 별도의 추정 로직에 의해 정확히 알 수 있다고 가정하였다. 차량 기하학적 파라미터와 횡 속도, 조향각, 그리고 요레이트를 사용하여 다음과 같이 4개의 휠 속도를 각각 기구학적 관계식으로 계산할 수 있다.

$$V_{FL} = V_x \cos \delta_f - \frac{T}{2} \gamma \cos \delta_f + l_f \gamma \sin \delta_f + V_y \sin \delta_f \quad (6)$$

$$V_{FR} = V_x \cos \delta_f + \frac{T}{2} \gamma \cos \delta_f + l_f \gamma \sin \delta_f + V_y \sin \delta_f \quad (7)$$

$$V_{RL} = V_x - \frac{T}{2} \gamma \quad (8)$$

$$V_{RR} = V_x + \frac{T}{2} \gamma \quad (9)$$

2.3 요레이트와 타이어 슬립을 고려한 휠 속도 예측

정확한 모터의 속도를 예측하여 최적 전/후 토크 분배비를 얻기 위해 선회 상황뿐만 아니라, 가감속 상황에서

의 휠 슬립을 추가로 고려하여 이전보다 정확한 모터의 속도를 예측하여 이를 비용함수에 반영하고자 하였다. 본 연구에서는 전/후륜 토크 분배에 따라 변화하는 전/후륜 타이어의 종방향 슬립이 휠 속도(모터 회전속도)에 미치는 영향을 반영하였다. (다시 말해 전륜으로 토크를 분배하면 후륜 대비 전륜의 슬립이 증가하여 전륜의 모터들의 회전속도가 상대적으로 증가) 타이어의 종 슬립율은 각 휠에 작용하는 수직 방향 힘 및 종방향 힘에 따라 결정되는데, 이때 타이어 역모델을 룩업테이블 방식으로 구현하여 슬립율을 추정하였다. (타이어 모델은 입력이 수직력과 슬립, 출력이 타이어 종방향 힘, 타이어 역모델은 입력이 수직력과 종방향 힘, 출력이 슬립)

2.3.1 타이어 종방향 힘과 수직하중 계산

타이어 종방향 힘(F_x)은 휠에 작용하는 구동력으로 운전자가 요구하는 토크와 토크 분배 비율에 따라 달라짐을 고려하였다.

$$F_{x,FL,FR} = \frac{p}{2} \cdot \frac{T_{all}}{r_{eff}} \tag{10}$$

$$F_{x,RL,RR} = \frac{(1-p)}{2} \cdot \frac{T_{all}}{r_{eff}} \tag{11}$$

각 휠의 수직 항력(F_z)은 다음과 같이 Nominal 하중 분배에 중/횡 가속도에 의한 하중 전이를 고려하여 산출한다. 이 식의 정확한 산출 원리 및 정확도는 기존 문헌¹²⁾에서 다뤘기 때문에 여기서는 생략한다.

$$F_{z,FL} = F_{z,FL,nominal} - \frac{M_{th}}{2L} a_x - \frac{M_{th}}{2T} a_y \tag{12}$$

$$F_{z,FR} = F_{z,FR,nominal} - \frac{M_{th}}{2L} a_x + \frac{M_{th}}{2T} a_y \tag{13}$$

$$F_{z,RL} = F_{z,RL,nominal} + \frac{M_{th}}{2L} a_x - \frac{M_{th}}{2T} a_y \tag{14}$$

$$F_{z,RR} = F_{z,RR,nominal} + \frac{M_{th}}{2L} a_x + \frac{M_{th}}{2T} a_y \tag{15}$$

2.3.2 타이어 맵을 이용한 종방향 슬립을 추정

타이어의 슬립은 위에서 계산한 F_x , F_z 을 바탕으로 타이어 역모델(Inverse tire map)을 이용하여 산출할 수 있다. 본 연구에서는 타이어 모델은 알고 있다고 가정하였으며 시뮬레이션 검증에서 사용되는 CarMaker의 맵 기반 타이어 모델(입력: 수직방향힘, 슬립율, 출력: 종방향 힘) 입출력을 변경하고 선형 보간하여 타이어 역모델(입력: 수직방향힘, 종방향힘, 출력: 슬립율)을 Fig. 2와 같이 산출하였다.

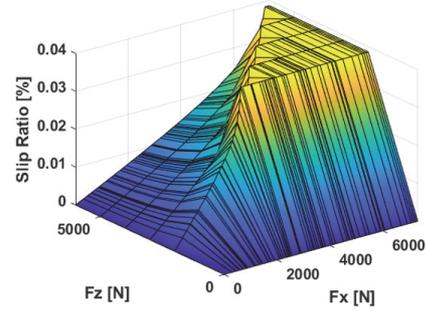


Fig. 2 Inverse tire map

위의 타이어 역모델을 이용하여 예측한 타이어의 슬립(s_d : 구동시 슬립율, s_b : 제동시 슬립율)을 바탕으로 식 (16), (17)을 통해 4륜의 회전속도(ω)를 산출할 수 있다. 따라서, 최종적으로 선회 속도에 의한 좌/우 휠 속도 차이를 고려하고, 전/후 토크 분배 및 가감속에 따른 슬립율까지 추가로 고려하여 임의의 주행 상황, 임의의 전/후 토크 분배 상황에서 전체 에너지 효율을 최적화하기 위해 4륜 각각의 휠 속도를 가급적 정확히 예측하였다.

$$s_d = \frac{r_{eff}\omega - V_x}{r_{eff}\omega} \tag{16}$$

$$s_b = \frac{V_x - r_{eff}\omega}{V_x} \tag{17}$$

위의 슬립율 수식을 이용하여 선회 상황과 타이어의 슬립을 모두 고려한 휠 속도를 계산하였다. 식 (18)~(21)은 구동 상황에서의 4륜의 휠 속도이고, 식 (22)~(25)는 제동 상황에서 4륜의 휠 속도이다. 4륜의 모터 속도는 추가적으로 휠의 유효동반경(r_{eff})과 모터 종감속비를 적용하여 산출한다.

$$\omega_{FL} = \frac{V_x \cos \delta_f - \frac{T}{2} \gamma \cos \delta_f + l_f \gamma \sin \delta_f + V_y \sin \delta_f}{(1-s_d)r_{eff}} \tag{18}$$

$$\omega_{FR} = \frac{V_x \cos \delta_f + \frac{T}{2} \gamma \cos \delta_f + l_f \gamma \sin \delta_f + V_y \sin \delta_f}{(1-s_d)r_{eff}} \tag{19}$$

$$\omega_{RL} = \frac{V_x - \frac{T}{2} \gamma}{(1-s_d)r_{eff}} \tag{20}$$

$$\omega_{RR} = \frac{V_x + \frac{T}{2} \gamma}{(1-s_d)r_{eff}} \tag{21}$$

$$\omega_{FL} = \frac{(1-s_b)(V_x \cos \delta_f - \frac{T}{2} \gamma \cos \delta_f + l_f \gamma \sin \delta_f + V_y \sin \delta_f)}{r_{eff}} \tag{22}$$

$$\omega_{FR} = \frac{(1-s_b)(V_x \cos \delta_f + \frac{T}{2} \gamma \cos \delta_f + l_f \gamma \sin \delta_f + V_y \sin \delta_f)}{r_{eff}} \tag{23}$$

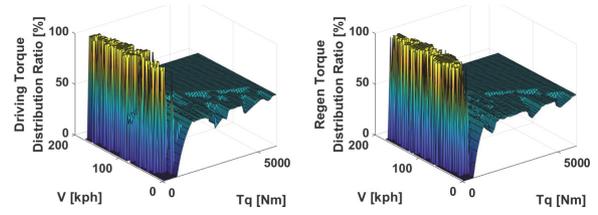
$$\omega_{RL} = \frac{(1-s_b)(V_x - \frac{T}{2}\gamma)}{r_{eff}} \quad (24)$$

$$\omega_{RR} = \frac{(1-s_b)(V_x + \frac{T}{2}\gamma)}{r_{eff}} \quad (25)$$

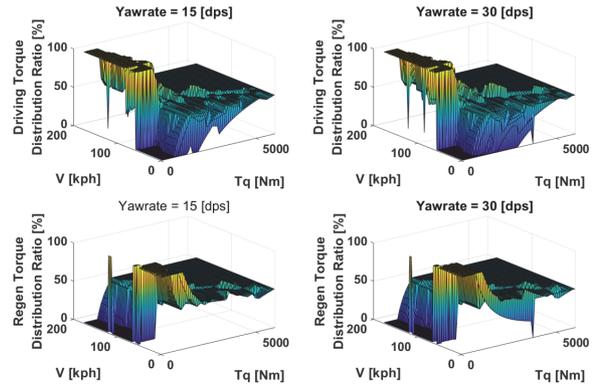
2.4 최적 분배비 비교

2.2, 2.3장에서 예측한 4륜 모터 속도로 임의의 차량 속도 및 전체 요구 토크가 주어졌을 때 최적의 전/후 토크 분배비를 산출하였다. 기존 기술에서는 차량 속도(V_x)를 4륜의 동일한 모터 속도로 간주하였지만, 본 논문에서는 선회 상황과 분배에 따른 타이어 슬립까지 고려하여 4륜의 모터 속도를 독립적으로 정확히 예측하였고, 이를 모터 효율 산출에 적용하였다. 현재 차량의 속도 0 ~ 180 kph, 운전자의 요구 토크 0 ~ 6,000 Nm 구간의 주행 상황마다 소수 둘째 자리 0.01 % 간격으로 전/후 토크 분배 비율에 따른 모든 비용함수를 오프라인에서 계산하였고, 그중 가장 에너지 효율이 좋은 최적 분배 비율해(p)를 도출하여 최적 분배맵을 구성하였다. 일반적인 선회 주행에서 요레이트는 40 deg/s을 초과하지 않기 때문에 ± 40 deg/s구간을 1[deg/s] 간격으로 계산하여 선형 보간 하였다. Fig. 3의 (a)는 기존처럼 현재 차량의 속도와 운전자의 요구 토크만을 이용하여 도출한 최적 분배맵을 구동/제동상황 나누어 나타내었다. (b)는 좌/우 모터의 속도가 달라지는 선회상황의 요레이트를 고려한 최적 분배맵으로 요레이트 15, 30 deg/s 상황에서 구동과 제동으로 나누어 예시로 나타내었으며, (c)는 선회상황과 가감속 상황의 타이어 종슬립을 모두 고려한 최적 분배맵으로 (b)와 동일한 요레이트 상황을 예시로 나타내었다.

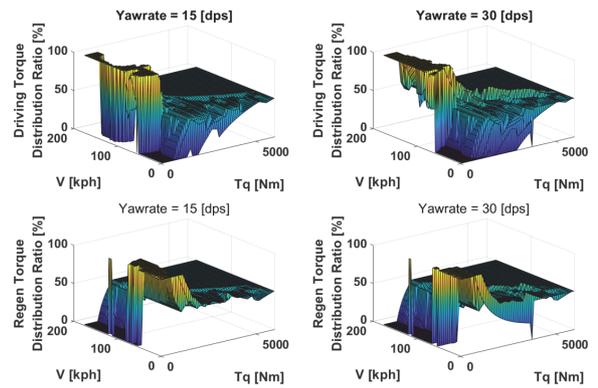
Fig. 3의 (a)와 (b)의 최적 분배 비율을 비교하면 0 ~ 180 km/h 속도 구간에서 200 Nm 미만의 저요구 토크 영역은 (a)는 전륜과 후륜의 최적 토크 분배비가 0:100인 반면에, (b)는 100:0임을 확인할 수 있다. 이것은 요구 토크 200 Nm 이하 저토크 구간에서 요레이트를 고려한 최적 분배비의 뚜렷한 차별성을 보여준다. (b)와 (c)의 요레이트 15 deg/s 상황(왼쪽 맨 위 그래프)에서 높은 요구 토크 영역의 최적 분배비를 비교해보면, 차속 100 ~ 160 km/h, 요구 토크 400 ~ 1000 Nm 구간에서 (b)는 전륜의 토크분배비가 100:0인 반면에 (c)는 0:100임을 확인할 수 있다. 이것은 100 ~ 160 km/h, 400 ~ 1000 Nm 운전 영역에서 타이어의 종방향 슬립이 전/후 최적 분배비 결정에 미치는 영향을 뚜렷하게 보여준다. 이외에도 제동, 요레이트 15 deg/s 상황(왼쪽 맨 아래 그래프), 속도 80 km/h, 요구 토크 3000 Nm 구간에서 (b)의 전륜 최적 분배비는 50:50인 반면에 (c)의 최적 분배비는 48.25:51.75임을 확



(a) Optimization results by conventional method



(b) Optimization results considering cornering only



(c) Optimization results considering both cornering and longitudinal slip

Fig. 3 Front/rear torque optimal distribution map

인하였다. 전반적으로 선회, 타이어 슬립을 고려하여 4륜의 독립적 모터 속도를 예측한 제안 연구 결과가 기존 방법론 대비 최적 전/후 분배비 산출에 영향도가 큼을 확인할 수 있다.

한편, 최적 분배비는 주로 전/후 모터 효율맵 형상에 따라 결정되는데, 특정 차량 속도와 전체 요구토크에서 분배비에 따른 전체 효율 변동이 아래로 오목한 경우와 위로 볼록한 경우가 존재하며 오목한 경우에는, 중간 비율 부근에서 최적 효율을 갖는 볼록한 경우와 달리, 최적 효율을 갖는 최적 분배비가 양단 끝(0 %와 100 %, 즉 후륜 100 %, 전륜 100 %) 부근에서 결정된다. Fig. 4는 차속

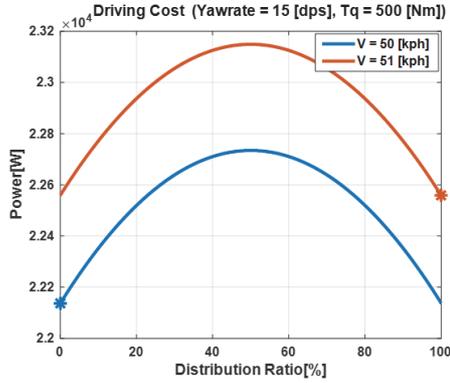


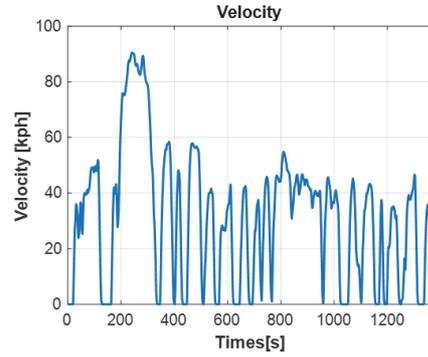
Fig. 4 Variations in power consumption according to distribution ratio

50 km/h, 요레이트 15 deg/s, 요구 토크 500 Nm 위치(선회 구동)에서 선회상황과 가감속 상황의 타이어 종슬립이 모두 고려된 최적 전/후 분배비 결정 과정을 나타낸다. 분배비가 양단 끝(0%, 100%) 부근에서 총 파워가 적게 소모되는데 차속 50 km/h에서는 후륜 100%가 최적이고 차속 51 km/h에서는 전륜 100%가 최적 분배비가 되어 속도 변화에 따라 최적 분배비가 급격히 변화하게 된다. 모터의 효율 특성은 기존 내연기관 대비 전체적으로 효율이 좋고 작동점 변화에 따른 효율 변동이 작아 최적 분배비와 그렇지 않은 점에서 차이가 아주 크게 발생하지 않는다. 따라서, 위와 같이 전체 소모 파워가 1 W 차이로 최적 분배비가 후륜 100%에서 전륜 100%로 민감 변화하는 상황에서는 51 km/h에서도 50 km/h에서와 같이 전륜 100%를 최적 분배비로 간주해도 큰 효율 차이는 없을 수 있다. 따라서, 승차감, 모터 내구성 측면에서 최적 분배비의 급격한 변동을 최소화하는 분배맵의 스무딩(Smoothing) 과정이 필요할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 선회, 슬립 고려에 따른 최적 효율 개선도를 정량적으로 확인하는 것이 주된 관심 사항이기 때문에 특별히 스무딩 과정을 반영하지 않았다.

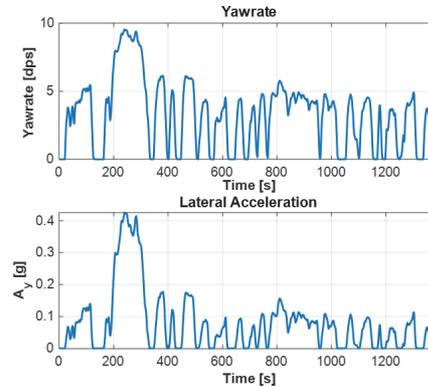
3. 시뮬레이션 검증

3.1 시나리오 선정과 전비 향상률

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 UDSS 속도 프로파일을 회전반경 150 m의 원 선회 주행으로 주행 상황을 가정하여 제안 최적 분배 성능을 검증하였다. 타이어 슬립의 영향을 보여주기 위해 상대적으로 가속과 감속이 많은 UDSS 시나리오를 선정하였으며, 요레이트가 10 deg/s 이하인 일반적인 도로의 선회 상황을 고려하기 위해 회전반경을 150 m으로 설정하였다. 본 논문에서 제안한 토크 분배 방법의 우수성을 비교하기 위해 4륜 균등 토크



(a) Vehicle speed



(b) Yawrate and lateral acceleration

Fig. 5 Vehicle motion from simulation result

Table 1 Torque distribution scenarios

Case 1	Equal distribution
Case 2	Conventional optimization (for identical motor's speed)
Case 3	Optimization considering yawrate only
Case 4	Optimization considering both yawrate and wheel slip

Table 2 Energy efficiencies for distribution methods

UDSS	Energy efficiency (km/kwh)	Improvement ratio (%)
Case 1	7.185	-
Case 2	7.306	1.68
Case 3	7.373	0.92
Case 4	7.374	0.01

분배 방식, 일반적인 최적화 분배 방식(동일 모터 속도, 슬립 미고려), 선회 상황 요레이트를 고려한 방식(좌/우륜 속도 차이 적용), 요레이트와 슬립을 모두 고려한 방식, 총 4가지 토크 분배 방법론을 기반으로 에너지 효율을 서로 비교하였다.

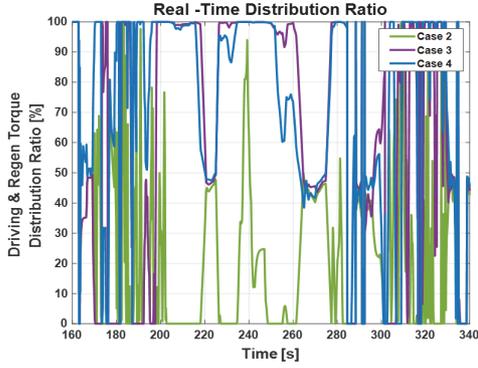


Fig. 6 Comparison of distribution ratio for Case 2 ~ 4

결과적으로, 차량 속도 0 ~ 90 km/h, 요레이트 0 ~ 10 deg/s, 횡 가속도 범위 0 ~ 0.45 g에서 주행 결과, 4가지 방법론에서 단계적인 전비 향상을 보였다. 빠른 속도로 선회할수록 요레이트가 커지고, 요레이트가 커질수록 좌/우 모터 속도 차이가 발생하여 결국, 이를 고려한 토크 분배 방식의 개선도가 더 확연하게 나타났다.

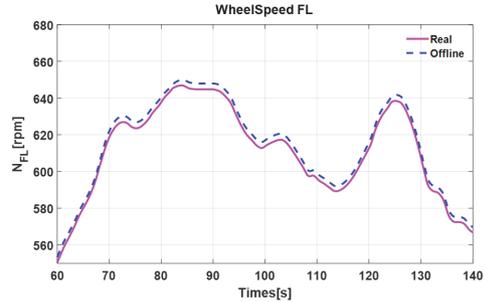
전체 UDSS 주행 시나리오에서 4륜 균등 분배 방식 대비 기존 일반적 분배 방법이 1.68 %, 요레이트를 고려한 토크 분배 방식이 요레이트를 고려하지 않은 기존 방식보다 0.92 % 전비 향상률을 보였으며 요레이트와 슬립을 모두 고려한 토크 분배 방식이 요레이트만 고려한 방식보다 추가로 0.01 % 향상율을 보였다. 다만, 요레이트만을 고려한 방법 대비 슬립까지 추가로 고려한 방식의 개선율은 비교적 속도가 높고 가감속이 큰 160 ~ 340 s 영역에서는 0.3 %로 비교적 크게 나타나, 요레이트와 타이어 슬립이 비교적 커지는 선회 가감속 상황에서 상대적으로 그 개선 효과가 두드러짐을 확인할 수 있었다.

종합하면, 제안 최적 분배 방법은 R=150 m의 선회 UDSS 시나리오에서 균등 분배 방식 대비 2.63 %, 요레이트와 슬립을 고려하지 않는 일반적 분배 방법 대비는 0.93 %의 전비 개선율을 나타냈다.

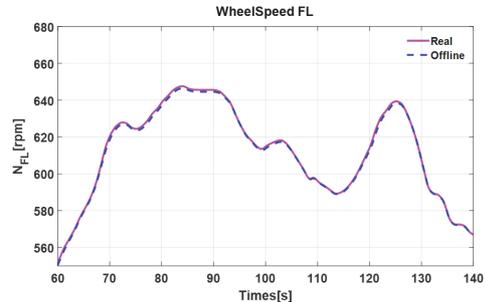
Fig. 6은 UDSS 시나리오에서 가감속이 두드러지는 160 ~ 340 s 구간의 최적 분배 비를 비교하여 나타낸 그림이다. 특히 200 ~ 220 s의 구간에서 Case 2의 전/후 토크 분배 비는 후륜 100%임을 확인할 수 있으며, Case 3,4의 전/후 토크 분배 비는 전륜 100%로 정반대임을 확인할 수 있다. 이외에도 요레이트와 횡가속도가 높게 나타나는 200 ~ 300 s구간에서 Case 2의 경우는 전반적으로 전륜보다 후륜에 더 많은 토크가 가해지는 반면에, Case 3, 4의 경우는 후륜보다 전륜에 더 많은 토크가 분배되는 것을 확인할 수 있어 주행 상황에 따라 Case 2 ~ 4의 최적 전/후 토크 분배 결과가 상당히 달라지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 휠 속도 예측 정확도 비교

제안 연구에서의 효율 개선은 결국 선회, 가감속 상황에서의 정확한 효율 예측을 위한 4륜의 정확한 모터 속도 예측이 주된 요인이다. 따라서, 여기서는 앞서 제시된 일정 주행 구간에서 기존처럼 모터 속도를 차량 속도로



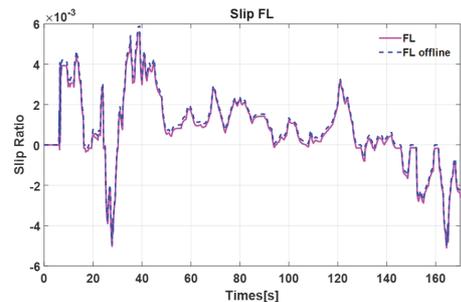
(a) Wheel speed of front left wheel for Case 2



(b) Wheel speed of front left wheel for Case 3



(c) Wheel speed of front left wheel for Case 4



(d) Slip ratio for Case 4

Fig. 7 Comparison of motor speed prediction accuracy

Table 3 Motor speed prediction accuracy by torque distribution method

	Wheel speed MAE (kph)	Slip MAE
Case 2	0.3207	9.78×10^{-4}
Case 3	0.0520	9.35×10^{-4}
Case 4	0.0139	1.53×10^{-4}

간주한 경우(Case 2), 요레이트(선회)를 고려하여 좌/우 모터 속도 차이를 보상한 경우(Case 3), 추가로 분배 토크에 의한 타이어 슬립까지 모터 속도 예측에 적용한 경우(Case 4)에 대해 모터 속도 예측 정확도(사전에 Offline에서 산출된 예측치와 실제(Real) 해석에서의 오차)를 비교해 보았다. 4륜의 경향성이 비슷하기 때문에 전륜 왼쪽륜(FL) 모터의 속도 예측 정확도만 비교한다.

Fig. 7과 Table 3은 요레이트와 슬립율을 모두 고려한 방식(Case 4)이 높은 휠 속도에서 더 높은 모터 속도 예측 정확도를 갖는 것을 보여준다. 이를 통해 보다 정확한 모터들의 효율을 예측할 수 있고, 이를 기반으로 보다 특정 순간에 정확한 최적 전/후 토크 분배 비율을 결정할 수 있다고 판단된다.

3.3 주행 상황에서의 실제 비용함수와 예측 비용함수 차이 분석

Fig. 8은 특정 주행 순간에서, 각 토크 분배 방법으로

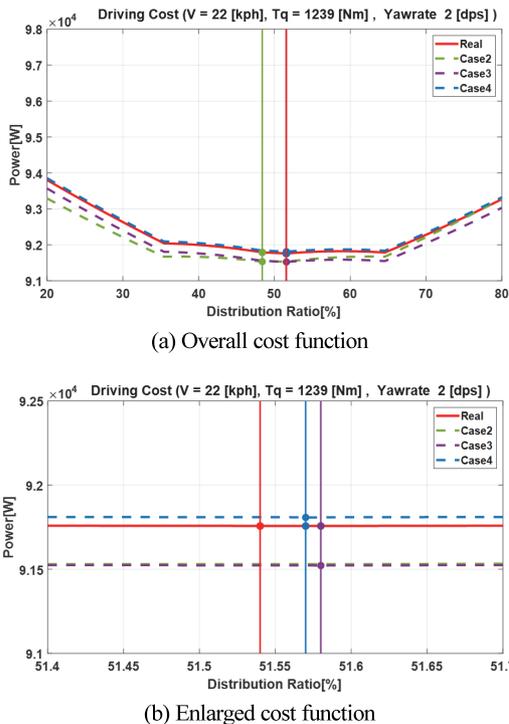


Fig. 8 Comparison of cost function

오프라인에서 예측하여 최적화된 비용함수들과 실제 주행 해석 상황에서의 실제 비용함수와 비교한 그림이다. 붉은 실선은 실제 비용함수를 의미하고, 점선은 각기 다른 모터 속도 예측 방식으로 도출된 비용함수 예측치를 의미한다. 즉 실제 비용함수와 가장 유사한 것은 요레이트와 슬립을 모두 고려한 Case 4 방식인 것을 확인할 수 있다. 각 점은 비용함수가 최소가 되는 지점이자 토크 분배가 일어나는 실제 분배 비이다. 요레이트와 슬립을 모두 고려한 토크 분배 방식, 요레이트만 고려한 토크 분배 방식, 일반 최적화 방식 순으로 실제 최적의 전륜 분배비 $p=51.54\%$ 에 순차적으로 근접한 것을 확인할 수 있다.

3.4 모터 작동점 변화

전비 개선 효과가 두드러지는 UDSS(160 ~ 340 s) 시나리오에서 각 토크 분배 방식에 따른 전륜 모터의 작동점(좌,우 모터 모두 표시)을 Fig. 9에 나타냈다. 요레이트와 휠 슬립을 모두 고려한 최적화 분배 방식(Case 4)에서 구동 모터의 작동점이 다른 분배 방식에 비해 효율이 높은 오른쪽 구간에 위치한 것을 확인할 수 있다.

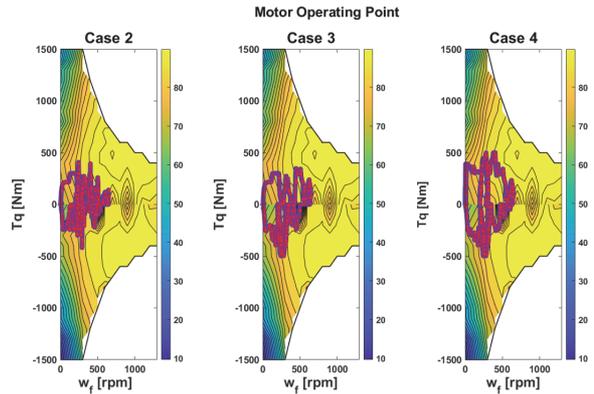


Fig. 9 Comparison of motor operating points

4. 결론

본 논문에서는 주행 상황 매 순간 최적 에너지 효율의 전/후 토크 분배비를 산출하는 연구를 수행하였다. 기존의 연구들이 주로 차량의 속도와 연계하여 동일하게 4륜의 모터 속도를 간주하였다면, 본 논문에서는 선회 시 좌/우 모터 속도가 달라지는 부분, 가감속시 타이어 슬립에 의해 차속과 모터 속도가 달라지는 부분, 그리고 전/후 토크 분배에 따라 전/후 타이어 힘이 달라져 슬립이 달라지는 부분까지 고려된 4개 모터들의 에너지 효율을 보다 정확히 예측하고 이에 근거한 최적의 전/후 토크 분배비 산출 방법을 제안하였다.

기구학적 모델을 이용하여 선회 상황에서 차량의 속

도와 휠의 속도 관계를 고려하였고, 차량 동역학 모델과 타이어 역모델맵을 이용하여 타이어 슬립까지 반영하여 선회 가감속 주행이 포함된 주행 시나리오에서 예측 휠 속도가, 기존 방법을 대비 높은 개선된 정확도를 보임을 확인하였다.

4륜 모터 속도의 예측 오차를 줄임으로써 계산된 비용 함수와 실제 비용함수 사이의 오차를 최소화할 수 있었고 이를 바탕으로 정확한 최적의 전/후 토크 분배비를 도출하였으며, 실제 해석 상의 주행 상황에서 제안 방법이 실제 최적 토크 분배 비에 가장 근접함을 증명하였다. CarMaker SW와 Matlab/Simulink가 연계된 시뮬레이션 환경을 통해 R=150 m 선회 UDSS 시나리오에서 제안 방법의 정량적 효과성을 검증하였으며, 결과적으로 제안 최적 전/후 토크 분배 방법이 선회 주행 상황에서 균등 분배 방식과 비교하여 최대 약 2.63 % 전비 향상율을 보였다.

추후에는 최적 분배맵 상에서의 작동점 변화에 따른 최적 분배비의 급격한 변동을 최소화할 수 있도록 하는 부분을 추가적으로 고려하고, 좌/우 동일 토크 분배 제약에서 벗어나 4륜 독립 구동 특성을 활용한 4륜 독립 최적 분배 방향으로 연구를 추진할 계획이다.

후 기

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과이다(2021RIS-004). 이 논문은 2024년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) H. Na, S. -H. Hwang and S. -H. You, "An Optimal Torque Distribution Strategy of an e-4WD System Considering Tire Characteristics," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.55-58, 2020.
- 2) B. J. Park, Model Predictive Control for Four Wheel Drive Electric Vehicle Power Distribution Considering Energy Efficiency and Dynamic Performance, Master's Thesis, Hanyang University, 2022.
- 3) S. Yun, K. Yi, S. Joung, J. Wang and J. Kim, "Torque Distribution Control of Six-wheeled Independent Driving Vehicles for Improved Energy Economy," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1853-1858, 2013.
- 4) A. M. Dizqah, B. Lenzo, A. Sorniotti, P. Gruber, S. Fallah and J. De Smet, "A Fast and Parametric Torque Distribution Strategy for Four-Wheel-Drive Energy-Efficient Electric Vehicles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.4367-4376, 2016.
- 5) Z. Zhang, X. Zhang, H. Pan, W. Salman, Y. Rasim, X. Liu, C. Wang, Y. Yang and X. Li, "A Novel Steering System for a Space-Saving 4WS 4WD Electric Vehicle: Design, Modeling, and Road Tests," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp.114-127, 2017.
- 6) H. Lee, N. Kim and S. W. Cha, "Model-Based Reinforcement Learning for Eco-Driving Control of Electric Vehicles," IEEE Access, pp.202886-202896, 2020.
- 7) J. Soldo, B. Škugor and J. Deur, "Model Predictive Control of a Parallel Plug-In Hybrid Electric Vehicle Relying on Dynamic Programming and Extended Backward-Looking Model," IEEE Transactions on Control Systems Technology, pp.581-594, 2024.
- 8) S. Tan, Y. Wang, X. Zheng, N. Zhang, T. Luo, B. Pan, S. Li and X. Cui, "Energy-efficient Torque Allocation Strategy for Autonomous Distributed Drive Electric Vehicle," IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024.
- 9) X. Hu, H. Chen, X. Gong, Y. Hu and P. Wang, "Embedded Model Predictive Control for Torque Distribution Optimization of Electric Vehicles," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pp.1-12, 2024.
- 10) Z. He, Q. Shi, Y. Wei, J. Zheng, B. Gao and L. He, "A Torque Demand Model Predictive Control Approach for Driving Energy Optimization of Battery Electric Vehicle," IEEE Transactions on Vehicular Technology, pp.3232-3242, 2021.
- 11) S. Zhu, B. Wei, D. Liu, H. Chen, X. Huang, Y. Zheng and W. Wei, "A Dynamics Coordinated Control System for 4WD-4WS Electric Vehicles," Electronics, 2022.
- 12) K. Choi, J. Kim, W. Cho and S. -H. You, "Tire Force Estimation Based on Vehicle Motion and Its Experimental Validation," Transactions of KSAE, pp.323-331, 2023.