

최적 타이어 힘 분배 방법을 통한 전기차의 독립 6WD/6WS 에 관한 연구

A Study on an Independent 6WD/6WS of Electric Vehicle using Optimum Tire Force Distribution

김 동 형, 김 창 준, 김 영 렬, 한 창 수*

(Dong-Hyung Kim, Chang-Jun Kim, Young-Ryul Kim, and Chang-Soo Han)

Abstract: This paper presents an optimum tire force distribution method for 6WD/6WS(6-Wheel-Drive and 6-Wheel-Steering) electric vehicles. Using an independent steering and driving system, the performance of 6WD/6WS vehicles can be improved, as, for example, with respect to their maneuverability under low speed and their stability at high speed. Therefore, there should be a control strategy for finding the optimum tire forces that satisfy the driver's command and minimize energy consumption. From the driver's commands (steering angle and accelerator/brake pedal stroke), the desired yaw moment, the desired lateral force, and the desired longitudinal force were obtained. These three values were distributed to each wheel as the torque and the steering angle, based on the optimum tire force distribution method. The optimum tire force distribution method finds the longitudinal/lateral tire forces of each wheel that minimize the cost function, which is the sum of the normalized tire forces. Next, the longitudinal/lateral tire forces of each wheel are converted into the reference torque inputs and the steering wheel angle inputs. The proposed method was tested through a simulation, and its effectiveness was verified.

Keywords: 6WD/6WS, multi-axle, 6X6 vehicle, optimum tire force distribution method

1. 서론

군사 혹은 기타 특수 목적으로 다양한 종류의 6륜 차량들이 사용되어 왔고, 이들은 탱크와 같은 궤도차량이 보유하는 제자리 선회 능력 및 험지주행 능력을 갖는다. 또한 이러한 6륜 차량은 하중을 전·후륜뿐만 아니라 중륜 에도 배분함으로써 급가속이나 급제동시의 피치각을 감소시키는 구조적 안정성을 지닌다. 이러한 차량은 다수의 휠을 구동시키므로, 한 개 또는 두 개의 휠이 failure일 시에도 차량으로서의 기본 성능을 만족하며, 보다 중요한 것은 fail-safe 관점에서 failure 발생시 그 failure에 따른 차량 제어 전략을 소프트웨어적으로 빠르게 보상 할 수 있다는 것이다.

최근 배터리 기술의 진보 및 인휠 모터의 개발로 인하여 각 휠에 인휠 모터를 탑재한 다축 전기 차량 또한 일반 4륜 전기 차량과 함께 연구되고 있으며, 이러한 전력 구동 시스템은 제어적인 측면에서 아래와 같은 이점을 갖는다[1].

(1) 가·감속 두 경우에 대하여 매우 빠르고 정확한 토크 발생이 가능하다. 내연기관 차량은 엔진 throttle를 여는 대만 200ms 이상의 응답시간이 요구되는 반면, 모터는 10ms 미만의 응답 속도를 갖는다. 따라서 이러한 모터의 특성을 활용하여 ABS (Antilock brake system) 및 TCS (Traction control system)의 성능을 향상시킬 수 있다.

(2) 휠에 생성되는 토크를 쉽게 예측할 수 있다. 내연기관 차량의 경우, 엔진 공기 유입량과 같은 제어 입력과 휠에 생성되는 토크 사이에 매우 큰 비선형성 및 불확실성이 존재한

다. 따라서 정확한 토크 값을 얻기 힘든 반면, 휠이 모터로 바로 구동될 경우에는 모터에 인가되는 전류 값으로만 구동 토크를 정확히 파악하여 이를 직접적으로 제어할 수 있다.

(3) 모터는 각각의 차륜에 탑재 될 수 있다. 따라서 좌우륜에 서로 다른 크기의 토크를 발생시킴으로써 *DYC (Direct Yaw-Moment Control)*와 같은 제어기법을 통해 차량의 선회안정성을 제어하기 용이하다.

이러한 인휠 모터를 탑재한 전기 차량은 기계적인 부품의 감소로 인하여 차량 내부 공간이 확보되므로, 각 륜에 독립 조향 시스템을 지니기 용이하며 미국의 *Striker*나 프랑스의 *MODEX* [2](그림 1)의 경우가 그 예이다. 이러한 차량은 8WD/8WS인 군용 차량으로써, *normal steering*, *skid-steering* 및 복합 조향이 가능하며 많은 자유도를 지니고 있으므로 차량 운동의 해석 및 제어가 비교적 어렵다. 이러한 이유로 4륜 차량에 비해 작은 숫자의 연구 결과를 보이며, 독립 구동 및 조향 차량 제어 시에 이슈가 되는 차량 타이어 힘 분배 방법



그림 1. 8WD/8WS 차량 MODIX.

Fig. 1. MODIX, 8WD/8WS Vehicle.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 3. 15., 수정: 2010. 4. 15., 채택확정: 2010. 4. 30.

김동형, 김창준, 한창수: 한양대학교 기계공학과

(fileman@hanyang.ac.kr/aphate@hanyang.ac.kr/cshan@hanyang.ac.kr)

김영렬: 아주대학교 시스템공학과(yrk_1234@naver.com)

※ 본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(CTIP)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

또한 많은 부분이 연구되어야 한다. [3]에서는 4WD/4WS(4-Wheel-Drive/4-Wheel-Steering) 차량을 대상으로 최적 타이어 힘 분배 방법을 사용한 차량 제어 기법을 제안하였다. 최적 타이어 힘 분배 없이 전·후륜 조향과 요 모멘트만을 사용한 차량과 비교함으로써, 제안된 방법이 보다 효율적임을 보였다. 그리고 [4]에서는 6WD(6-Wheel-Drive) 차량에 대하여 최적 타이어 힘 분배 방법을 적용한 제어 알고리즘을 소개하였으며, 차량이 주어진 경로를 추종함을 보였다. 하지만 6WD/6WS(6-Wheel-Drive/6-Wheel-Steering) 차량의 지니는 총 12개의 제어 입력, 즉 6개의 구동 토크와 6개의 타이어 조향각을 계산하는 알고리즘에 관한 부분은 다루질 않는다.

본 논문은 6WD/6WS 차량, 즉 6휠 독립 구동 및 6휠 독립 조향이 가능한 차량의 최적 타이어 힘 분배 방법을 다룬다. 단순화된 2차원 모델을 기본으로, 목표 요 모멘트 및 타이어 힘을 정의한 뒤, 운전자의 조향 입력, 가속 페달 및 브레이크 페달 입력에 따른 목표 요 모멘트, 목표 종 방향 힘 및 횡 방향 힘을 생성한다. 이때 주어진 목적 함수를 최소화 시키는 타이어 힘을 계산함으로써 6WD/6WD 차량의 각 륜의 구동 토크 및 조향각을 결정한다. 이러한 내용을 검증하기 위해 TruckSim 소프트웨어를 사용하여 차량 선회 운동을 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션은 본 논문이 제안하는 방법을 적용한 차량과 좌측 3개 륜과 우측 3개 륜이 각각 동일한 구동 토크를 갖는 차량을 비교함으로써 그 효율성을 검증하였다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. II 장에서는 6WD/6WD 차량의 목표 모델을 소개하고, III 장은 최적 타이어 힘 방법을 제안한다. IV 장은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 마지막으로, V 장은 본 논문의 결론을 보인다.

II. 6WD/6WS 차량 목표 모델

본 논문은 그림 2과 같은 2차원 평면상에서의 6WD/6WS 차량 모델을 목표 모델로 다룬다. 무게중심으로부터 전륜, 후륜까지의 거리는 각각 l_f , l_r 이다. 무게중심으로부터 중륜까지의 거리는 존재하지 않고 i 번째 타이어의 조향각 δ_i 는 작은 값인 경우, 아래와 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$mV_x(\dot{\beta} + \gamma) = \sum_{i=1}^6 F_{xi} \tag{1}$$

$$I_z \dot{\gamma} = l_f(F_{y1} + F_{y2}) - l_r(F_{y5} + F_{y6})$$

여기서 m 은 차량 질량, V_x 는 차량의 종 방향 속도, β 는 미끄럼 각, I_z 는 관성모멘트, γ 는 요 율을 나타낸다. 그리고 F_{xi} 와 F_{yi} 는 각각 i 번째 타이어에 작용하는 종 방향 및 횡 방향 힘이다.

1. 목표 요 모멘트

선회 반경 R 인 도로를 주행하기 위한 정상 상태 조향각은 아래와 같이 주어진다.

$$\delta = \frac{l_f + l_r}{R} + K_V \alpha_y \tag{2}$$

여기서 K_V 는 understeer gradient이며 아래와 같이 주어진다.

$$K_V = \frac{l_r m}{2C_{af}(l_f + l_r)} - \frac{l_f m}{2C_{ar}(l_f + l_r)} \tag{3}$$

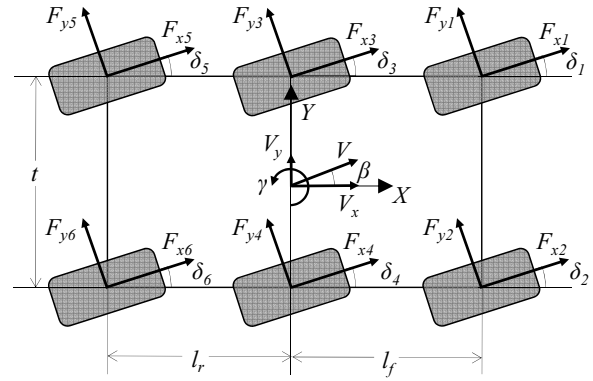


그림 2. 6WD/6WS 차량 모델.
Fig. 2. Model of 6WD/6WS Vehicle.

따라서 위 식 (3)을 식 (2)에 대입할 경우, 선회 반경은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{R} = \frac{\delta}{l_f + l_r + \frac{mV_x^2(l_r C_{ar} - l_f C_{af})}{2C_{ar}C_{af}(l_f + l_r)}} \tag{4}$$

차량의 목표 요 율은 조향각과 차량의 종 방향 속도에 의해 아래 식으로부터 결정된다.

$$\gamma_{des} = \frac{V_x}{R} = \frac{V_x}{l_f + l_r + \frac{mV_x^2(l_r C_{ar} - l_f C_{af})}{2C_{ar}C_{af}(l_f + l_r)}} \delta \tag{5}$$

본 논문은 식 (5)로 주어진 목표 요 율과 현재 차량의 요 율 간의 차이를 줄이기 위해 목표 요 모멘트 M_{zdes} 를 아래와 같이 PID 제어를 통해 생성한다.

$$M_{zdes} = K_P(\gamma_{des} - \gamma) + K_I \int (\gamma_{des} - \gamma) dt + K_D \frac{d}{dt}(\gamma_{des} - \gamma) \tag{6}$$

목표 요 모멘트는 타이어 종 방향 힘 및 횡 방향 힘에 의해 생성되므로, 아래 식을 만족시켜야 한다.

$$\frac{t}{2} \{ (F_{x2} - F_{x1}) + (F_{x4} - F_{x3}) + (F_{x6} - F_{x5}) \} + l_f(F_{y1} + F_{y2}) - l_r(F_{y5} + F_{y6}) = M_{zdes} \tag{7}$$

2. 목표 타이어 힘

목표 종 방향 가속도는 운전자의 가속 페달 및 브레이크 페달의 스트로크에 비례하여 생성되며, 이를 α_x^* 로 표기한다. 따라서 목표 종 방향 힘은 아래와 같이 정의된다.

$$F_{xdes} = m\alpha_x^* \tag{8}$$

그림 2에서 알 수 있듯이, 각 타이어에서 발생하는 종 방향 힘들의 합은 아래와 같이 목표 종 방향 힘과 같아야 하며, 이는 운전자로부터의 차량 견인 및 제동 의지를 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^6 F_{xi} = F_{xdes} \tag{9}$$

정상 상태 요 각도 오차로부터, 차량의 정상 상태 미끄럼

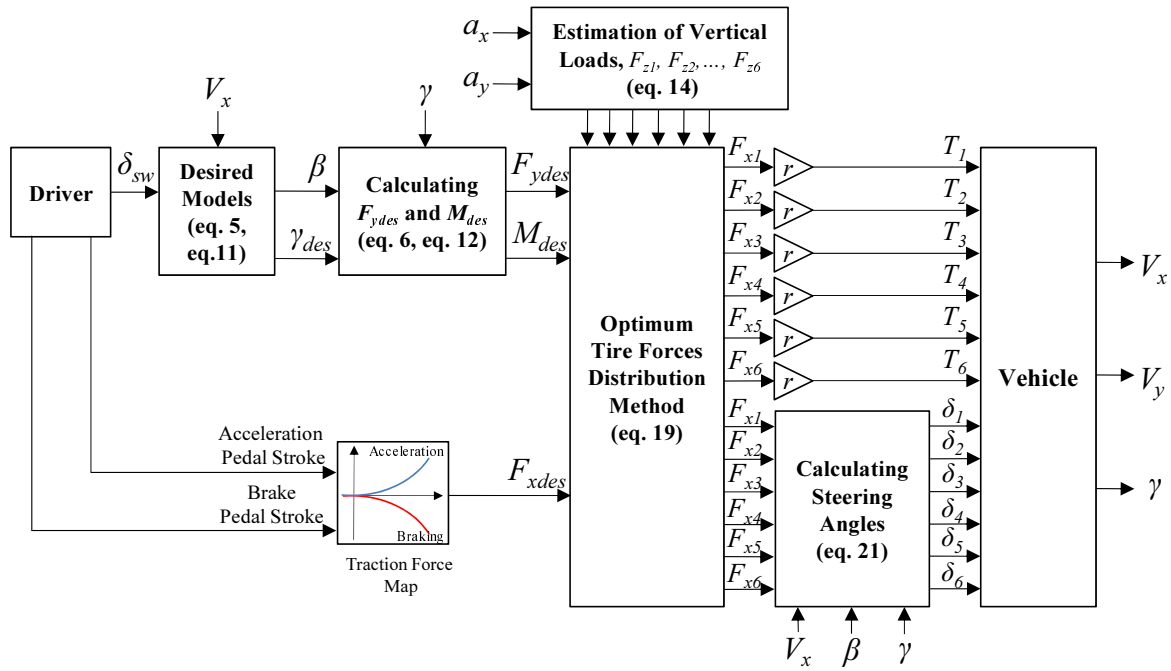


그림 3. 6WD/6WS 차량의 최적 구동 토크 및 조향각을 위한 제어 시스템.
 Fig. 3. A control system for optimum operating torques and steering angles of 6WD/6WS vehicle.

제안한다.

타이어의 반경이 r 일 때, 식 (19)로 결정된 타이어 중 방향 힘으로부터 i 번째 휠의 구동 토크는 아래 식으로 계산된다.

$$T_i = rF_{xi} \quad (20)$$

미끄럼 각이 충분히 작다고 가정할 경우, 타이어 횡력은 미끄럼 각에 비례한다. 전륜 1, 2번 휠, 중륜 3, 4번 휠 및 후륜 5, 6번 휠의 조향각은 아래 식으로부터 계산된다.

$$\delta_i = \begin{cases} \frac{F_{yi}}{C_{af}} + \beta + \frac{l_f \gamma}{V_x} & \text{for } i=1, 2 \\ \frac{F_{yi}}{C_{am}} + \beta & \text{for } i=3, 4 \\ \frac{F_{yi}}{C_{ar}} + \beta - \frac{l_r \gamma}{V_x} & \text{for } i=5, 6 \end{cases} \quad (21)$$

본 논문에서 제안하는 6WS/6WD 차량의 최적 구동 토크 및 조향각은 최적 타이어 힘 분배 방법에 근거하여 결정되며, 그림 3과 같은 제어 시스템으로 요약된다.

IV. 시뮬레이션 결과

다축 차량의 동역학 시뮬레이션에 사용되는 S/W인 TruckSim을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 차량은 6WD/6WS 차량으로 sprung mass 8000kg, wheelbase 3100mm, tread 2104mm, tire radius 500mm 와 같은 재원을 가지며, 그림 4와 같은 차속 및 조향각 profile을 따라 운동하도록 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때, 본 논문이 제안하는 최적 타이어 구동 토크 및 조향각이 적용된 차량과 비교하기 위하여, 다음과 같은 토크 분배를 갖는 차량 또한 시뮬레이션 하였다.

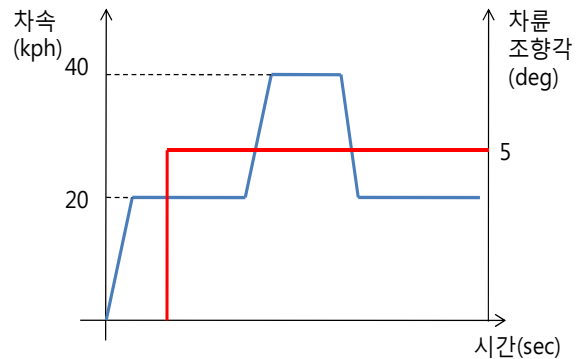


그림 4. 차속 및 조향각 profile.
 Fig. 4. Profile of vehicle velocity and steering angle.

$$F_i = \begin{cases} \frac{(t/2)F_{xdes} + M_{des}}{t}, & i=2,4,6 \\ \frac{(t/2)F_{xdes} - M_{des}}{t}, & i=1,3,5 \end{cases} \quad (22)$$

즉, 식 (6)으로 생성되는 요 모멘트를 사용하여 왼쪽 세 바퀴와 오른쪽 세 바퀴는 균등한 힘 분배를 갖는다. 이를 균등 분배 방법(equivalent distribution method)이라고 정의 하였을 때, 두 방법에 대한 차량의 궤적과 목적함수 J 는 그림 5 및 그림 6과 같다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 차량이 선회를 시작하면서 두 방법간에 J 값의 차이가 증가하였으며 최적 타이어 힘 분배 방법을 사용한 경우 더 작은 J 값을 보이고 있다. 이는 최적 타이어 힘 분배 방법이 적용된 차량의 에너지 소모량이 적음을 의미한다. 그리고 각 타이어의 구동 토크는 그림 7부터 그림 12와 같으며 조향각은 그림 13부터 그림 18과 같다.

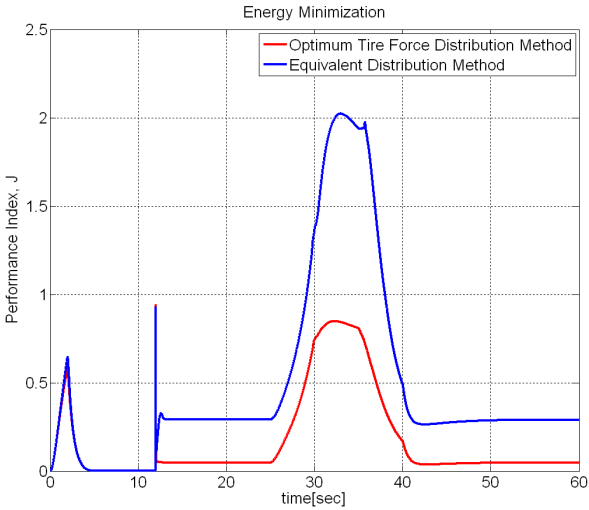


그림 5. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 J 값.
 Fig. 5. J of equivalent and optimum tire force distribution method.

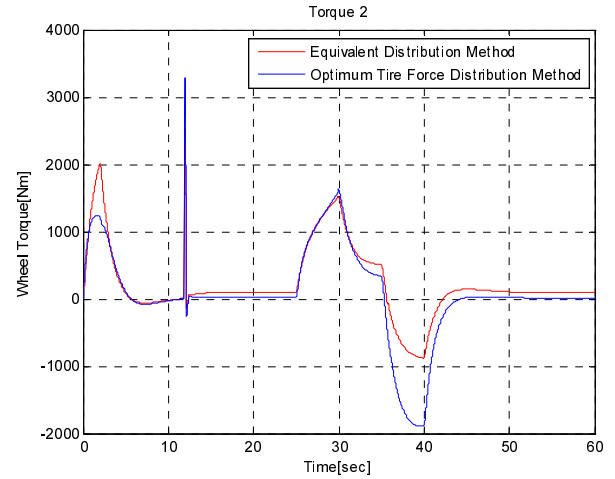


그림 8. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 T_2 값.
 Fig. 8. T_2 of equivalent and optimum tire force distribution method.

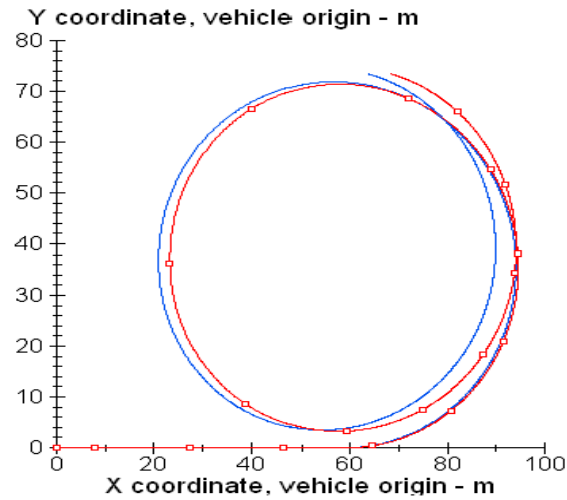


그림 6. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 차량의 궤적.
 Fig. 6. Vehicle trajectory of equivalent and optimum tire force distribution method.

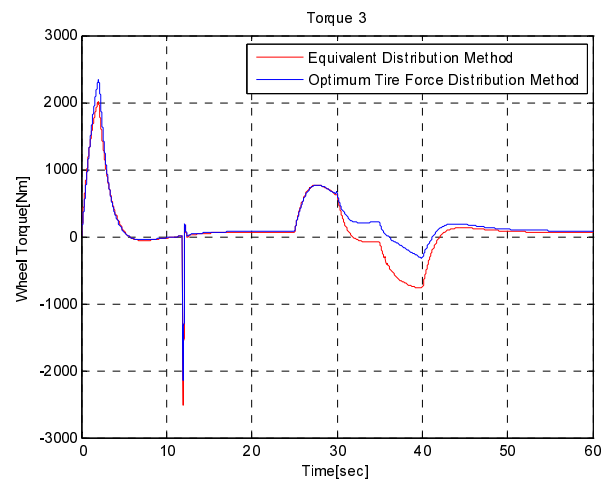


그림 9. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 T_3 값.
 Fig. 9. T_3 of equivalent and optimum tire force distribution method.

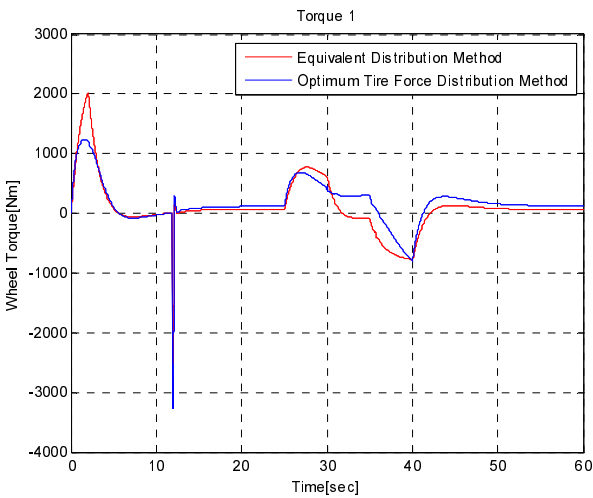


그림 7. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 T_1 값.
 Fig. 7. T_1 of equivalent and optimum tire force distribution method.

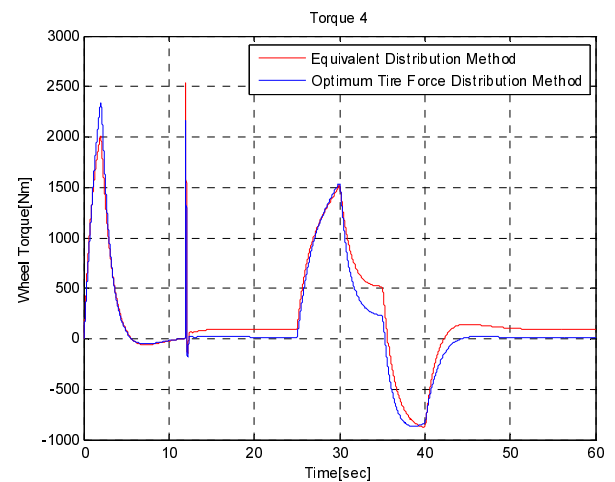


그림 10. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 T_4 값.
 Fig. 10. T_4 of equivalent and optimum tire force distribution method.

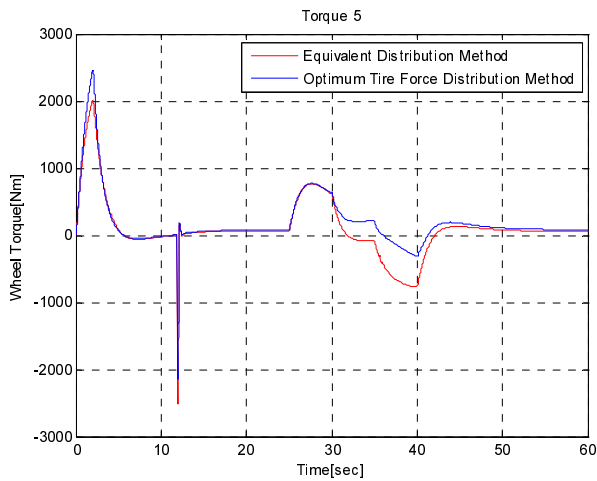


그림 11. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 T_5 값.
 Fig. 11. T_5 of equivalent and optimum tire force distribution method.

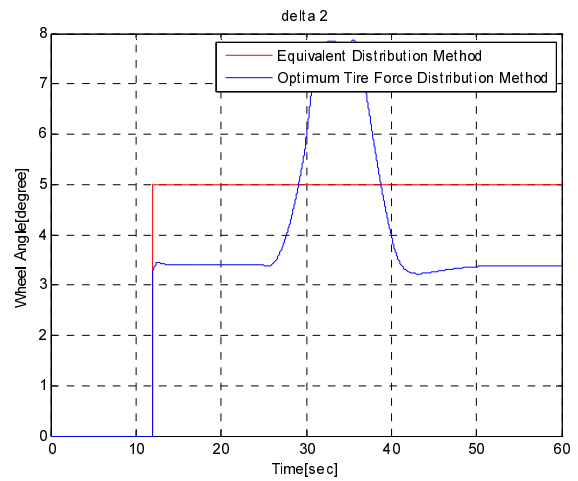


그림 14. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 δ_2 값.
 Fig. 14. δ_2 of equivalent and optimum tire force distribution method.

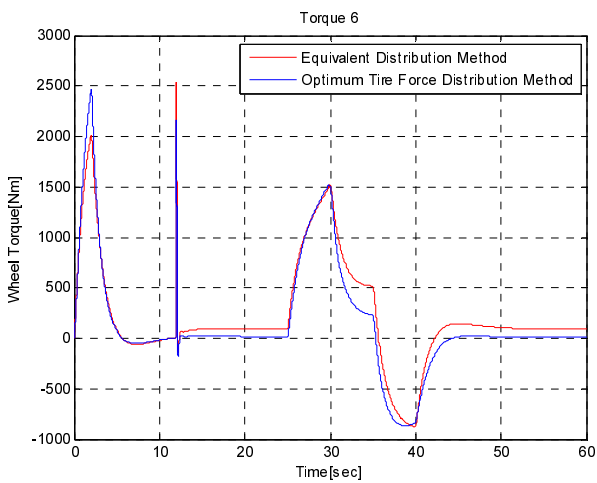


그림 12. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 T_6 값.
 Fig. 12. T_6 of equivalent and optimum tire force distribution method.

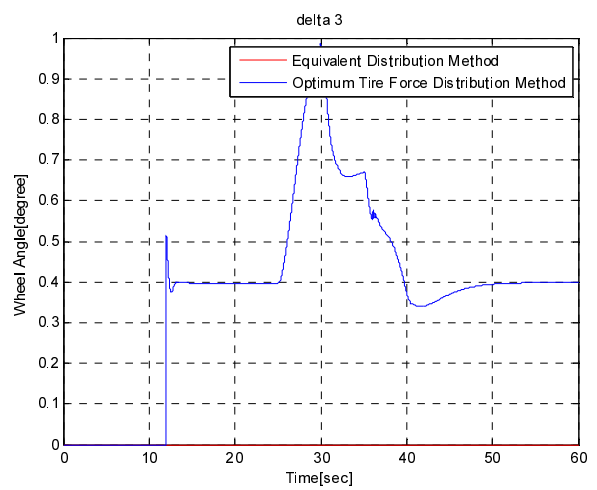


그림 15. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 δ_3 값.
 Fig. 15. δ_3 of equivalent and optimum tire force distribution method.

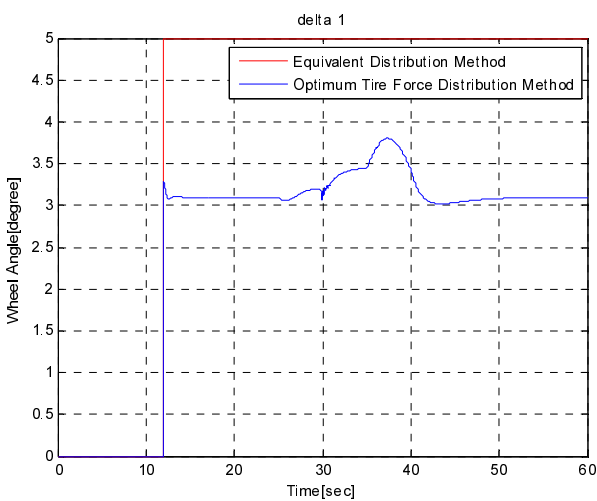


그림 13. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 δ_1 값.
 Fig. 13. δ_1 of equivalent and optimum tire force distribution method.

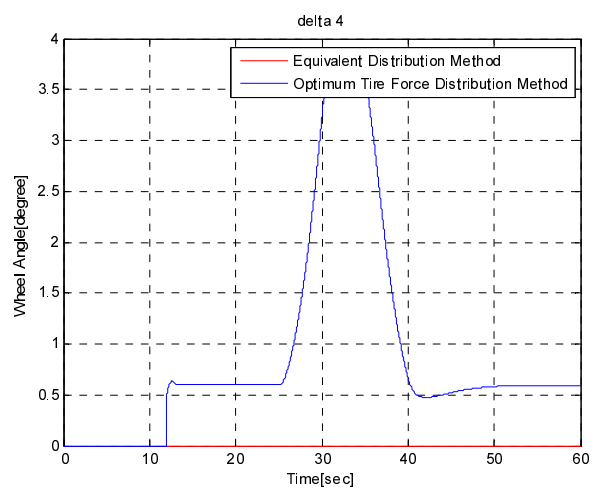


그림 16. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 δ_4 값.
 Fig. 16. δ_4 of equivalent and optimum tire force distribution method.

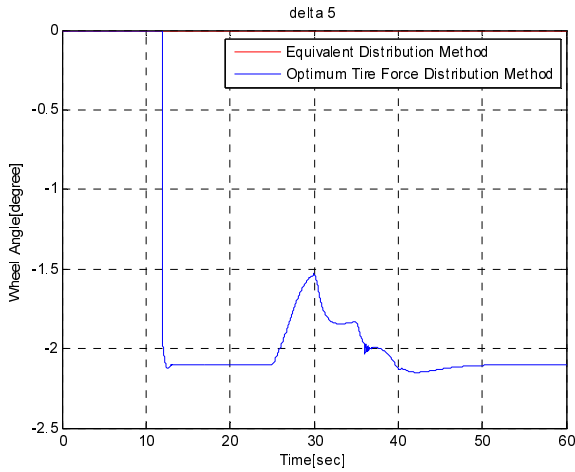


그림 17. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 δ_5 값.
Fig. 17. δ_5 of equivalent and optimum tire force distribution method.

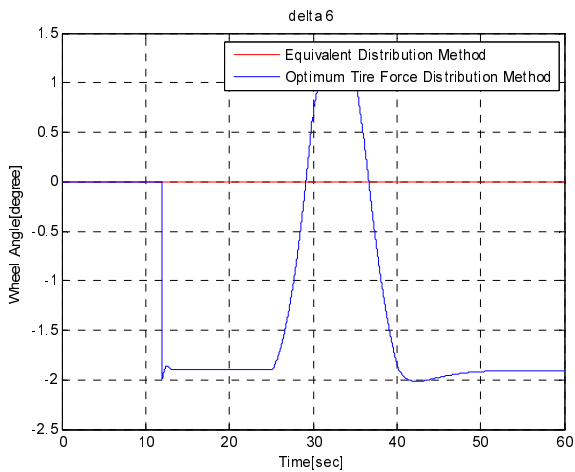


그림 18. 균등분배 및 타이어 힘 최적 분배에 따른 δ_6 값.
Fig. 18. δ_6 of equivalent and optimum tire force distribution method.

V. 결론

본 논문은 6WD/6WS 전기 차량을 위한 최적 타이어 힘 분배를 제안하였으며, 이를 통해 결국 6WD/6WS 차량 각 휠의 최적 구동 토크 및 조향각을 계산하였다. 이러한 계산 과정을 제어 시스템으로 구성하여 차량의 운동을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 최적 구동 토크 및 조향각이 적용된 차량과 균등 토크 분배가 된 차량을 비교해 봄으로써, 그 성능을 확인하였다.

참고문헌

[1] Y. Hori, Y. Toyoda, and Y. Tsuruoka, "Traction control of electric vehicle: Basic experimental results using the test EV, UOT," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 34, pp. 1131-1138, 1998.
[2] K. Watanabe, J. Yamakawa, M. Tanaka, and T. Sasaki, "Turning characteristics of multi-axle vehicles," *Journal of Terramechanics*, vol. 44, pp. 81-87, 2007.
[3] O. Mokhiamar and M. Abe, "Simultaneous optimal distribution of lateral and longitudinal tire forces for the model following control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 126, pp. 753-763, 2004.

[4] J. Kang, W. Kim, K. Yi, and S. Jung, "Skid steering based maneuvering of robotic vehicle with articulated suspension," *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 645-652, Oct. 2009.
[5] M. Young, *The Technical Writer's Handbook*, Mill Valley, Seoul, 1989.
[6] 미안 아시팍 알리, 김창준, 신현수, 장재호, 한창수, "Study on the Characteristics of Skid Steering for Six Wheel Drive Vehicle (6x6)," 한국자동차 공학회 추계 학술대회, pp. 325, 2008.
[7] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, 2009-01-0437, 2009.
[8] H. Fujimoto, T. Saito, A. Tsumasaka, and T. Noguchi, "Motion control and road condition estimation of electric vehicles with two in-wheel motors," *Proc. of IEEE Int. Conference on Control Applications*, pp. 1266-1271, 2004.
[9] N. Ando and H. Fujimoto, "Fundamental study of integrated control for active front/rear steering and driving/braking force distribution based on least square solution of electric vehicle," *Proc. of IEE of Japan*, IIC-09-139, 2008 (in Japanese).



김 동 형

2008년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2010년 한양대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2010년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 자율주행로봇, 차량 동역학 및 제어.



김 창 준

2004년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2006년 한양대학교 대학원 메카트로닉스 공학과 석사 졸업. 2006년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 능동조향, 복합조향.



김 영 렬

한양대학교 기계공학과(공학사, 공학석사). 아주대학교 시스템공학과(공학박사). 현재 한양대학교 Cim & Robotic Lab 연구교수. 관심분야는 차량 및 로봇의 파워 시스템 설계 및 제어.



한 창 수

1983년 한양대학교 기계공학과(공학사). 1985년 Texas at Austin Mechanical Engineering(공학석사). 1989년 Texas at Austin Mechanical Engineering(공학박사). 1990년~현재 한양대학교 기계정보경영학부 교수. 관심분야는 로봇 메커니즘 설계 및 해석, 차량동역학, 필드로봇, 서비스 로봇, Wearable Robot.