독립 전륜 조향 및 4륜 구동을 이용한 전기 차량의 선회 운동 향상

Improvement of the Yaw Motion for Electric Vehicle Using Independent Front Wheel Steering and Four Wheel Driving

장 재 호, 김 창 준, 김 상 호, 강 민 성, 백 성 훈, 김 영 수, 한 창 수*

(Jae-Ho Jang¹, Chang-Jun Kim², Sang-Ho Kim², Min-Sung Kang², Sung-Hoon Back², Young-Soo Kim², and Chang-Soo Han²)

¹Korea Institute of Industrial Technology

²Hanyang University

Abstract: With the recent advancement of control method and battery technology, the electric vehicle have been researched to replace the conventional vehicle with electric vehicle with the view point of the environmental concerns and energy conservation. An electric vehicle which is equipped with the independent front steering system and in-wheel motors has advantage in terms of control. For example, the different torque which generated by left and right wheels directly can make yaw moment and the independent steering using outer wheel control is able to reduce the sideslip angle. Using of independent steering and driving system, the 4 wheel electric vehicle can improve a performance better than conventional vehicle. In this paper, we consider the method for improving the cornering performance of independent front steering system and in-wheel motor used electric vehicle with the compensated outer wheel angle and direct yaw moment control. Simulation results show that the method can improve the cornering performance of 4 wheel electric vehicle. We also apply the steering motor failure to steer the vehicle turned by the torque difference without steering. This paper describes an independent front steering and driving, consist of three parts; Vehicle Model, Control Algorithm for independent steering and driving and simulation. First, vehicle model is application of TruckSim software for independent front steering and 4 wheel driving. Second, control algorithm describes the reduced sideslip and direct yaw moment method in view of cornering performance. Last is simulation and verification.

Keywords: 4X4 Vehicle, independent steering, independent driving, TruckSim, virtual steering angle, optimum tire force distribution method

I. 서론

미래 자동차의 신기술 개발은 크게 환경과 안전분야로 나눌 수 있다. 먼저 최근 환경 문제의 영향으로 선진국들은 자동차의 환경 및 연비에 관한 규제를 강화하고 있다. 이에 따라 자동차 산업에서의 친환경 기술은 필수가 되고 있고, 배터리와 각종 전자 장치 제어기술의 발전으로 하이브리드 자동차(HEV) 및 연료전지 자동차(FCEV) 등의 전기자동차가 활발하게 개발되고 있다. 안전성 분야는 운전자의 과실로 인한 사고 방지, 운전자의 편의성 및 승차감 향상 등을 목표로 다양한 기술들이 개발되고 있다. 최근 논의되고 있는 핵심 기술은 능동 안전(active safety) 및 운전자 지원 시스템(ADAS: Advanced Driver Assistance System)등을 들 수 있다[1].

대기 오염의 문제와 국제 유가 상승으로 인한 기름값 인상으로 인하여 전기 자동차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 미국은 GM의 볼트, 닛산의 리프가 양산 출시되어

사용되고 있다. 하지만 상기의 차량들은 내연기관을 모터로 대체한 차량으로 차량의 구동력 및 선회 제어 방식은 기존의 내연기관 차량과 유사하다. 하지만 독립 조향 및 구동 방식의 전기 자동차는 좌우 독립형 SBW 시스템[2] 과 구동모터를 바퀴 내부에 장착한 것으로 기존 내연기관 차량 및 하이브리드 차량에 사용되던 변속기, 축, 기어 요소들이 제거되어 이로 인한 공간을 확보할 수 있고, 효율 또한 개선된다[3].

독립조향의 경우 기존의 기계적인 시스템에서 조향 휠과 조향 기구부를 연결하는 조향 column을 제거하고 좌/우륜을 독립적으로 제어가 가능한 SBW (Steer-by-Wire) 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. M. Abe 등은 횡방향 및 종방향 타이어 힘을 최적 배분하는 연구를 4륜 차량에 적용하여 차량의 안정성을 향상시키는 연구를 진행하였다[4].

스키드 조향은 조향각에 의해서 발생하는 횡방향 힘을 사용하지 않고 좌/우 차륜의 구동력 차에 의해서 선회를 발생시키게 된다. 즉, 외륜의 휠 속도가 내륜보다 크게 발생하면서 선회를 이루게 된다. 스키드 조향의 특징은 저속에서 선회반경을 극단적으로 줄일 수 있으며, 제자리 선회를 가능하게 한다.

좌우륜의 구동력 차를 발생시키기 위해서는 TVC (Torque Vectoring Device)와 같은 기계적 메커니즘을 이용하여야 한다. 하지만 인휠 모터가 장착된 차량의 경우 기계적인 장치 없이 타이어에 장착된 모터에 의해서 각륜의 구동력 제어가 가능하다. 인휠 모터가 장착된 차량은 조향각을 발생시키지 않고

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 5. 1., 수정: 2012. 9. 17., 채택확정: 2012. 12. 1.

장재호: 한국생산기술연구원(jaeho@kitech.re.kr)

김창준: 한양대학교 첨단로봇연구실(aphate@hanyang.ac.kr)

김상호: 한양대학교 기계공학과(shkim8313@hanyang.ac.kr)

강민성, 백성훈, 김영수: 한양대학교 메카트로닉스 공학과

(wowmecha@gmail.com/airback@hyundai-rotem.co.kr/gwa6@mest.go.kr)

한창수: 한양대학교 기계공학과(cshan@hanyang.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 융복합형로봇전문인력양성사업 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2012-H1502-12-1002).

좌/우륵의 토크차를 이용하여 선회가 가능한 스키드 조향제어를 보다 쉽게 구현할 수 있으며, 저속에서는 선회반경을 작게 하여 조종성을 향상시키고, 고속에서는 선회반경을 크게 하여 안정성을 향상시킬 수 있다.

특히 좌우 독립형 SBW 시스템과 인휠 모터를 이용한 구동방식은 다음과 같은 이점을 갖는다[2,3,5].

1) 운전자의 조향입력에 대하여 전륜의 기어비를 기구부에 의존하지 않고, 소프트웨어 적으로 가변이 가능하다.

2) 랙 타입의 SBW 시스템의 경우 조타 모터가 고장이 났을 경우 운전자의 의지를 전륜에 반영하지 못하여 선회가 불가능하지만, 좌우 독립형 SBW 시스템은 한쪽 모터가 고장이 났을 경우 남은 조타 모터가 구동이 가능하기 때문에 운전자의 조향 의지를 일정부분 반영이 가능하다.

3) 선회 시 타이어에 인가되는 수직하중은 내륜에 비해 외륜에 크게 작용하므로, 좌우 독립형 SBW 시스템은 선회 시 외륜만을 능동적으로 조타하여 차량의 선회성능을 향상할 수 있다. 이는 타이어의 기본 특성인 수직하중과 선회력의 비례관계를 이용한 것이다.

4) 인휠모터는 가속 및 감속 시에 매우 빠르고 정확한 토크 발생이 가능하다. 기존의 내연기관 차량은 엔진 스로틀을 작동하는 시간만 200 ms 이상의 응답시간이 소요되는 반면 모터는 10ms 미만의 응답 속도를 가진다.

5) 구동휠에 인가되는 토크가 예측 가능하다. 내연기관 차량의 경우 구동 시 비선형적인 요소로 인하여 정확한 토크 값을 얻기 힘든 반면 인휠모터는 인가되는 전류 값으로 구동 토크를 파악하여 제어가 가능하다.

6) 인휠 모터는 각 차륜에 장착이 가능하다. 따라서 전/후, 좌/우 륵에 서로 독립적인 토크 발생이 가능하고, 토크 분배를 통하여 차량의 선회 안정성을 향상시킬 수 있다.

하지만 기존의 내연기관 차량과 독립 조향 및 구동이 가능한 전기차량의 구동방식은 하드웨어의 차이로 인하여 구동력 및 선회 제어 시 시스템에 맞는 제어 알고리즘이 필요하다.

일본에서는 이러한 하드웨어 변경에 따라서 새로운 알고리즘 개발 및 인휠 모터를 장착한 전기자동차의 성능 향상을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다[6,7].

본 연구에서는 좌우 독립형 SBW 시스템을 이용하여 전륜의 독립조향이 가능하도록 하였다. SBW 시스템의 장점인 차량의 속도에 따른 가변 기어비를 사용하고, 선회 시 차량의 옆 미끄럼각을 외륜을 제어하여 억제하도록 한다. 또한 z축 방향으로의 회전을 나타내는 요-레이트를 제어 대상으로 하여 인휠 모터 전기자동차의 선회 안정성 향상에 대한 연구를 진행한다. 독립 구동 제어알고리즘은 타이어 힘 최적화 분배 방법을 이용하여 F_x (종방향 힘), M (요모멘트), F_z (수직방향 힘)으로 정의된 목적함수를 최소화 하는 방법을 사용하였다.

독립 조향 및 구동시스템의 협조를 통하여 차량의 선회성능 향상 및 조향 모터 고장 시 독립 구동(스키드 조향)에 따른 선회성능 확보 여부를 TruckSim과 Matlab Simulink의 Co-simulation하여 검증하였다.

II. 차량모델

1. 목표 모델

독립 조향 및 구동 차량의 제어알고리즘에 사용되는 목표

그림 1. 목표 차량 모델.

Fig. 1. Desired vehicle model.

차량 옆 미끄럼각 및 요레이트를 선정하기 위하여 그림 1과 같이 2자유도 자전거 모델을 사용하였다[8].

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = 2Y_f + 2Y_r, \quad (1)$$

$$I\dot{\gamma} = 2Y_f l_f - 2Y_r l_r$$

$$Y_f = -C_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta_f \right), \quad (2)$$

$$Y_r = -C_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} \gamma \right)$$

식 (1)에서 I 는 관성모멘트이며, m 은 차량의 질량, Y_f 와 Y_r 은 각각 앞 바퀴와 뒷 바퀴에 작용하는 횡력, l_f 와 l_r 은 각각 차량의 무게중심으로부터 전륜 축과 후륜 축까지의 거리이다. 그리고 V 는 차량의 속도, δ_f 는 앞바퀴의 조향각, β 는 차량의 옆 미끄럼각, γ 는 요-레이트이다. 타이어 모델은 식 (2)와 같은 선형 모델을 사용하였다. 여기서 C_f 와 C_r 은 각각 전륜과 후륜의 코너링 강성이다[9].

2. 인휠 모터 모델

일반적으로 전기 자동차에서는 모터의 성능과 안전성의 이유로 주로 3상 AC모터를 사용한다. 하지만 본 연구에서는 모터 모델을 일차 지연 시스템으로 단순화하여 사용하였다. 그리고 모터의 한계 토크 값은 고려하지 않았다. 입력 토크와 출력토크와의 상관 관계는 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$T_m(s) = \frac{(K_t / R_m)}{1 + (L_m / R_m)s} u_m(s) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{1 + (L_m / R_m)s} T_{m,com}(s)$$

여기서 T_m 은 모터 토크, $T_{m,com}$ 은 지령 토크, K_t 는 토크 상수, R_m 은 모터의 저항, L_m 은 모터 인덕턴스, U_m 은 입력전압이다.

3. 독립 조향 모델

그림 2는 좌우 독립형 SBW 시스템을 6-bar 링케이지로 모델링 한 것을 나타낸다. 식 (4)에서 선회 시 외륜의 조타각 (δ_o)은 x, y, θ_{mi} 의 함수로 표현할 수 있다[2].

그림 2. 좌우 독립형 SBW 시스템.
Fig. 2. Tie-rod Actuating SBW System.

$$\delta_o = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \theta_{ini} \quad (4)$$

따라서 선회 시 내륜과 외륜의 관계는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. 여기서 k 는 조향 기어비, θ_{sw} 는 운전자의 조향입력이다.

$$\begin{aligned} \delta_o &= \tan^{-1}\left(\frac{L \tan \delta_i}{L + t \tan \delta_i}\right) \\ &= f(\delta_i) \\ &= f(k\theta_{sw}) \end{aligned} \quad (5)$$

4. 전체차량 모델

차량 모델용 전용 소프트웨어는 ADAMS와 CarSim [10]으로 대표되는데 ADAMS에서는 차량 모델링에 있어서 차량의 구성품을 개별적으로 모델링 해야만 되는 것으로서 S/W적으로 무겁게 되어 Co-simulation 측면에서 단점이 있다. CarSim의 경우는 차량의 거동에 대한 최종적인 K&C (Kinematic & Compliance) 데이터를 SPMD (Suspension Parameter Measurement Device) 장비로 실제 차량의 데이터를 측정하거나 ADAMS와 같은 S/W의 결과 데이터를 입력 받아 차량 운동을 모델링하기 때문에 S/W적으로 가볍고 이에 따라 Co-simulation 및 실시간 시뮬레이션에 적합하다. TruckSim [10]은 CarSim이 제공하는 4X4 뿐만 아니라 다축 구동 차량에 대한 시뮬레이션이 가능하다. 본 연구에서는 CarSim(Ver. 7) A-Class Hatchback 모델을 TruckSim에 적용하여 전체 차량 모델로 사용하였으며, 전기차량을 대상으로 하므로 파워트레인을 제외한 CarSim 데이터를 이용하여 차량모델을 선정하였다.

독립 조향 및 구동 전기차량은 표 1과 같이 sprung mass와 관련하여 무게, 휠베이스, 트레드 값을 사용하였다. 현가 장치의 경우 독립타입을 사용하였으며, Jounce 입력에 대한 타이어의 종/횡 방향 변화, 캐스터/캠버/토 변화를 테이블 형식으로 비선형 값을 차량모델에 반영하였다. 현가 장치의 compliance는 하중인가 시의 스프링과 감쇠 특성 역시 그 값을 테이블화하여 적용하였다. 조향모델은 제어 알고리즘에 의해서 전륜의 좌/우를 독립적으로 제어하기 때문에 no steering으로 설정하였다. 타이어, 브레이크, 형상은 CarSim에서 제공하는 모델을 사용하였다. 차량 형상의 경우 S/W에서 제공하는 것을 그대로 사용할 수 있지만 사용자의 의도에 따라서 디자인 툴을

표 1. 전체차량 모델 구성.

Table 1. Consist of full-vehicle model.

	Parameter or Selection
Sprung Mass	Weight 747 kg,
	wheelbase 2347mm
	tread 1416mm
Suspension	Independent type
Steering	No Steering
Tire	185/65 R14 in CarSim
Brake	Mechanical Brake
Shape	A-Class, Hatchback in CarSim

그림 3. TruckSim 차량모델의 입출력 관계.

Fig. 3. Relationship of input and output of TruckSim Model.

표 2. TruckSim 차량모델 입출력.

Table 2. Input and output of TruckSim Vehicle Model.

	정의	단위
τ_i	각륜의 구동토크 (i=1~4)	Nm
δ_i	전륜의 좌우 조타각 (i=1~2)	Degree
P_b	브레이크 압력	MPa
V_x	종방향 차량속도	Kph
β	횡미끄럼각	Degree
γ	요율	degree/sec
ω_{wi}	각륜의 각속도 (i=1~4)	RPM
F_{zi}	각륜에 인가되는 수직력 (i=1~4)	N

이용하여 형상을 설계하고 모델에 반영할 수 있다.

그림 3과 표 2는 TruckSim 차량모델의 입출력 관계를 나타낸다. 각륜의 구동력을 발생시키는 토크 4개와 전륜의 조향각 2개가 차량모델의 입력으로 들어가게 된다. 또한 출력으로는 차량의 종방향 속도, 차량 미끄럼 각, 요율, 각륜의 속도 및 수직방향 힘이 된다.

III. 제어알고리즘

인휠 구동 차량은 차량 플랫폼을 간결하게 하고 스키드 조향을 할 수 있는 장점이 있다. 보다 중요한 사항은 차량운동 성능 향상이라는 가능성을 지니고 있다는 것으로서 이러한 장점을 활용하여야 한다. 이러한 모터 구동 차량에 있어서의 차량동역학의 향상은 그림 4와 같은 모터의 특성에 기인한다[11,12].

(1) 가/감속이 매우 빠르고 정확한 토크를 발생

이것은 내연기관 차량에 비해 가장 근본적인 장점으로 종래의 내연기관 차량의 백배의 빠르기를 갖는다. 따라서 이를 완전하게 이용할 수 있다면 ABS (Antilock Brake System) 및 TCS (Traction Control System)의 통합성능을 대폭적으로 향상시킬 수 있다.

Enhance Active Safety		
Motor Torque Generation	Exact Torque Value	Independent Wheel Control
<ul style="list-style-type: none"> - Fast and accurate - Motor's torque Response Time shorter than ICV (10~100 times) 	<ul style="list-style-type: none"> - Estimate driving/braking force in real time - Know the condition of the road surface 	<ul style="list-style-type: none"> - Install in each rear and front tire - Control the traction and braking forces independently

그림 4. 모터 구동 차량의 특성.

Fig. 4. Characteristic of motor driven vehicle.

(2) 모터 토크는 쉽게 계산될 수 있다.

기존의 내연기관 및 유압식 브레이크에 반하여 모터에 의한 구동 및 제동력은 불확실성을 가지지 않는다. 그러므로 간단한 구동력 관측기는 타이어나 노면 사이의 구동/제동력을 실시간으로 관측 할 수 있게 해준다.

(3) 모터는 각각의 차륜에 탑재 할 수 있다.

좌/우륜에 서로 다른 방향의 토크를 발생시킴으로써 **DYC**를 추가할 수 있어 차량의 선회안정성을 제어할 수 있다.

1. 가상 조향각 알고리즘

가상 조향각 알고리즘은 차량의 속도에 따른 조향 기어비의 변화를 의미한다. 저속에서는 차량의 선회반경을 최소화하여 차량의 조종성을 높이고, 고속에서는 차량의 안정성을 높이기 위한 것이다. 능동조향(Active Front Steering)과 같은 개념으로 저속에서는 조향각을 크게 하여 조향입력에 대한 차량의 반응을 빠르게 하고, 고속에서는 반응을 느리게 하기 위하여 조향입력을 작게 하는 것이다.

운전자의 조향입력 δ_{sw} 는 식 (6)로부터, 타이어의 조향각 δ_w 로 계산된다. n 은 조향 기어비 이다.

$$\delta_w = \frac{\omega_\delta(V)}{n} \delta_{sw} \quad (6)$$

여기서 ω_δ 는 차량 속도에 따라 결정되는 조향각 게인 값으로 그림 5와 같이 표현되며, 그 값은 시뮬레이션을 통하여 차량성능에 따라서 값이 결정된다.

그림 5. 차량 속도에 따른 가상 조향각 Gain (ω_δ).Fig. 5. Virtual steering angle gain (ω_δ) according to vehicle velocity.

2. 독립 조향/구동 및 목표 요 모멘트

본 논문은 독립 조향 및 구동이 가능한 전기차량을 대상으로 한다. 각 타이어 힘을 발생시키기 위한 각 휠의 구동 토크 및 조향각 결정 방법이 필요하다.

타이어의 반경이 r 일 때, 타이어의 종 방향 힘으로부터 i 번째 휠의 구동토크는 식 (7)로부터 계산된다.

$$T_i = rF_{xi} \quad (7)$$

전륜의 좌/우 조타각은 식 (5)에 의해서 결정되며, 선회 시 외륜을 제어하여 목표 차량 미끄럼각을 추종하도록 한다.

본 논문에서는 목표 요 모멘트 M 을 생성하기 위해 식 (1)로 주어진 목표 요율(γ_{des})와 차량의 요율(γ) 간의 차이를 이용하여 PID 제어를 설계하였다.

$$M_{des} = K_p(\gamma_{des} - \gamma) + K_I \int (\gamma_{des} - \gamma) dt + K_D \frac{d}{dt}(\gamma_{des} - \gamma) \quad (8)$$

3. 최적 타이어 구동력 분배

타이어에 작용하는 힘의 크기는 수직 하중에 비례한다. 따라서 타이어에 작용하는 종 방향 힘 F_{xi} , 횡 방향 힘 F_{yi} 및 수직하중 F_{zi} 는 아래와 같은 관계를 갖는다[4].

$$F_{xi}^2 + F_{yi}^2 = (\mu_i F_{zi})^2 \quad (9)$$

식 (9)와 같은 마찰 원(friction circle)의 개념으로부터, 각 타이어에 작용하는 일반화된 힘(normalized force)의 제곱의 합을 목적 함수(cost function)로 사용한다.

$$J = \sum_{i=1}^4 \mu_i^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{F_{xi}^2 + (F_{yi}^2 = 0)}{F_{zi}^2} \quad (10)$$

최적화 방법을 통해 목표 종 방향 힘 F_{xdes} , 횡 방향 힘 F_{ydes} 및 요 모멘트 M_{des} 를 입력 받아 식 (10)으로 주어진 목적함수 J 를 최소화시키는 각 타이어의 힘을 계산하게 된다. 하지만 본 논문에서 횡 방향 힘은 운전자의 조향 입력에 따라 선회력이 발생하므로 목표 횡 방향 힘은 목적함수에서 0이 된다.

각 타이어의 종 방향 힘 4개를 계산하기 위하여 타이어의 구속 방정식들을 행렬로 나타내면 아래와 같다[4].

$$\mathbf{Ax} = \begin{bmatrix} F_{xdes} \\ M_{des} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{t}{2} & \frac{t}{2} & -\frac{t}{2} & \frac{t}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = [F_{x1} F_{x2} F_{x3} F_{x4}]^T$$

목적함수 J 를 최소화시키기 위한 가중행렬 $\mathbf{W}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} F_{z1}^{-2} & & & \\ & F_{z2}^{-2} & & \\ & & F_{z3}^{-2} & \\ & & & F_{z4}^{-2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

위 가중행렬 $\mathbf{W}$ 가 포함된 행렬 $\mathbf{A}$ 의 pseudo inverse를 사용

그림 6. 타이어 힘 최적 분배 방법.

Fig. 6. Optimum tire force distribution method.

하여 식 (11)로 주어진 linear system의 해, 즉 최적화된 타이어 종 방향 및 횡 방향 힘을 아래 식으로부터 구한다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^T)^{-1} \begin{bmatrix} F_{xdes} \\ M_{des} \end{bmatrix} \quad (13)$$

그림 6은 타이어 힘 최적 분배 방법 (Optimum Tire Force Distribution Method: OTFDM) 을 나타낸다. 목표 종 방향 힘, 목표 요 모멘트, 각륜의 수직 방향 힘($i=1\sim4$)이 최적 분배 방법의 입력으로 사용되고, 그 결과로 각륜의 종방향 힘이 결정된다. 타이어 힘 분배 방법에 의해 결정된 종 방향 힘은 식 (7)로부터 TruckSim 차량모델의 Shaft Torque 입력으로 들어가게 된다. 본 연구에서 수직방향 힘은 그림 3과 같이 TruckSim 모델에서 직접 피드백 하여 타이어 힘 최적 분배 방법에 사용한다. 향후 실차 적용을 위해서 수직방향 힘의 추정에 대한 연구가 진행되어야 한다.

4. 균등 구동력 분배

타이어 구동력 최적 분배 방법을 검증하기 위하여 균등 타

구동력 분배(ETFDM: Equivalent Tire Force Distribution Method) 방법은 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다[7].

$$F_R = \frac{(l_1/2)F_{xdes} + M_{des}}{l_1} \quad (14)$$

$$F_L = \frac{(l_1/2)F_{xdes} - M_{des}}{l_1} \quad (15)$$

여기서 F_R 은 오른쪽 휠의 종 방향 힘이고, F_L 은 왼쪽 휠의 종 방향 힘이 된다. l_1 는 좌/우륜 사이의 거리 트레드(tread)이다.

5. 독립 전륜 조향

그림 7은 독립 전륜 조향 제어 알고리즘을 나타낸다. 운전자의 조향입력이 가상 조향각의 입력으로 들어가서 전륜 조향각이 결정되며, 그 값은 식 (5)와 같이 선회 시 내륜을 의미하게 된다. 따라서 내륜과 외륜과의 관계에 의해서 외륜이 결정된다. 전륜 조향각과 전체차량 모델에서 제공하는 차량 속도를 목표 차량모델에 입력하면, 목표 차량의 미끄럼 각이 결정되고, 그 값을 전체차량 모델의 미끄럼각과 비교하여 에러를 최소화 하는 외륜 조향각을 생성하게 된다.

본 논문에서는 가상 조향각을 이용하여 속도에 따라 조향 기어비가 결정되는 알고리즘과 선회 시 목표 차량 미끄럼각을 비교하여 외륜을 제어하는 알고리즘을 사용하였다.

IV. 시뮬레이션 및 검증

그림 8은 타이어 힘 최적분배 방법과 차량 미끄럼각 제어 방법을 이용한 전륜 독립 조향 및 4륜 구동 전기차량의 전체

그림 7. 독립 전륜 조향 제어 블록선도.

Fig. 7. Block diagram of independent front steering control.

그림 8. 독립 조향 및 구동 제어 알고리즘 블록 선도.

Fig. 8. Block diagram of independent steering and Driving.

블록 선도를 나타낸다. 목표 속도와 차량의 속도를 비교하여 식 (16)과 같이 목표 종 방향 힘 F_x 를 구할 수 있다.

$$F_x = K_p (V_{xdes} - V_a) + K_I \int (V_{xdes} - V_a) dt + K_D \frac{d}{dt} (V_{xdes} - V_a) \quad (16)$$

운전자의 조향입력과 차량의 속도가 가상 조향각의 입력으로 들어가면 전륜의 조향각이 결정된다. 목표 차량모델에 가상조향각의 출력과 차량의 속도가 입력으로 들어가서 목표 요-레이트와 차량 미끄럼각을 출력하게 된다. 최적타이어 힘분배 방법에 필요한 입력은 식 (16)의 결과인 목표 종방향 힘과 목표 요레이트와 차량의 요레이트를 비교하여 생성된 요 모멘트가 된다. 또한, 차량 모델에서 제공하고 있는 타이어의 수직방향 힘이 최적분배 블록 선도를 통하여 각륜의 구동토크를 결정한다. 목표 차량 미끄럼각과 차량의 미끄럼각을 비교하여 외륜의 조향각을 생성하게 된다.

1. 독립 전륜 조향 제어

좌우 독립 전륜 제어알고리즘의 효과를 검증하기 위하여 구동륜에 토크를 생성시키는 균등타이어 힘분배 방법을 사용하고, 목표 차량미끄럼 각과 차량의 미끄럼 각을 비교하여 선회 시 외륜을 제어하였다. 독립 전륜 조향제어의 효과를 검증하기 위하여 시뮬레이션 환경은 드라이 아스팔트이고, 그림 9와 같이 차량의 속도는 50 kph, 10초에 45도의 조향입력을 하였다.

그림 10과 11은 좌우 독립조향 유무에 따른 차량 미끄럼각과 요-레이트를 나타낸다. 좌우 독립조향의 효과만을 사용한

그림 9. 차량 속도 및 조향입력.

Fig. 9. Vehicle velocity and steering input.

그림 10. 차량 미끄럼각 비교.

Fig. 10. Comparison of sideslip angle.

차량은 목표 미끄럼각을 추종하지만 요-레이트에서는 줄어드는 것을 나타낸다. 독립 조향 제어를 통하여 차량 미끄럼각을 작게 하지만 그 결과 요레이트를 작게 하여 선회반경이 더 커지는 것을 예측할 수 있다. 그림 12는 전륜 좌우의 조타각 변화를 나타낸다. 외륜 제어를 통하여 목표 미끄럼각을 추종하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11. 차량 요-레이트 비교.

Fig. 11. Comparison of yaw rate.

(a) Inner wheel angle.

(b) Outer wheel angle.

그림 12. 내륜과 외륜의 조타각.

Fig. 12. Steering angle of inner and outer wheel.

2. 4륜 독립 구동 제어

4륜 독립구동 제어 알고리즘 검증을 위하여 균등타이어 힘분배 방법과 최적타이어 힘분배 방법을 비교하였다. 균등타이어 힘분배 방법은 좌우 각륜에 동일한 토크를 입력하게 되고, 최적 타이어 힘분배 방법은 타이어에 인가되는 수직방향 힘에 따라서 최적의 토크를 생성하게 된다. 시뮬레이션 은 독립 전륜조향 제어 환경과 동일하다. 드라이 아스팔트에서 50 kph 가속 후 10초에서 J턴 조향입력을 하였다. 여기서 조향입력은 독립 조향입력을 사용하지 않았다. 그림 13과 같이 요레이트를 비교하게 되면 최적타이어 힘분배 방법이 균등타이어

그림 13. 요레이트 비교.

Fig. 13. Comparison of yaw rate.

(a) Front left wheel torque.

(b) Front right wheel torque.

(c) Rear left wheel torque.

(d) Rear right wheel torque.

그림 14. 각륜의 구동토크.

Fig. 14. Driving torque of each wheel.

힘분배 방법보다 큰 것을 확인할 수 있다. 목표 요-레이트를 추종하기 위하여 각륜의 구동 토크를 그림 14와 같이 독립적으로 최적 분배하여 차량의 요레이트를 제어하게 된다.

3. 독립 전륜 조향 및 4륜 구동 제어

독립 전륜 조향 제어 및 구동제어 알고리즘을 검증하기 위하여 전륜의 외륜을 제어를 하지 않고 최적타이어 힘분배 방법만을 사용한 차량과 선회 시 목표 차량 미끄럼각을 추종하는 외륜 조향제어와 목표 요-레이트를 추종하는 최적타이어

그림 15. 독립 조향 및 구동차량의 미끄럼각.

Fig. 15. Sideslip angle of independent steering & driving.

그림 16. 독립 조향 및 구동차량의 요-레이트.

Fig. 16. Yaw rate of independent steering & driving.

(d) Rear right wheel torque.

그림 17. 각륜의 구동토크.

Fig. 17. Driving torque of each wheel.

(a) Front left wheel torque.

(a) Inner wheel angle.

(b) Front right wheel torque.

(b) Outer wheel angle.

(c) Rear left wheel torque.

그림 18. 내륜과 외륜의 조타각.

Fig. 18. Steering angle of inner and outer wheel.

힘분배 방법을 적용한 차량을 비교하였다. 그림 15, 16과 같이 독립 조향 및 최적타이어 힘분배 방법을 적용한 차량은 목표 미끄럼각 및 요-레이트를 추종하는 것을 확인할 수 있다. 선회 시 요-레이트와 차량 미끄럼각은 비례관계에 있으므로 동일한 요-레이트 발생에 대한 미끄럼각을 비교하면 독립 조향 및 최적타이어 힘분배를 적용한 차량의 선회성능이 향상된 것을 확인할 수 있다. 그림 17과 18은 제어 방법에 따른 차량의 구동 토크 및 전륜의 조타각이다.

4. 조향모터 고장 시 4륜 독립 구동력 제어에 의한 선회

능동 조향 및 독립 구동제어를 구현하기 위해서는 모터의 사용이 필수적이다. 모터 사용에 따른 차량의 운동성능을 향상시킬 수 있는 자유도가 높아질수록 모터 고장에 대한 백업 시스템이 필요하게 된다. 본 논문에서는 독립 전륜 조향을 위하여 조향 모터를 사용하고, 독립 구동을 가능하게 하기 위해 각륜에 인휠모터를 장착하여 차량의 선회성능을 향상

여부를 확인하였다. 운전자의 조향입력으로 차량의 선회가 시작되므로 조향모터 고장 시 선회가 가능한 시스템이 준비되어야 한다. 차량이 선회 중 조향모터에 고장이 발생하여 운전자의 조향 의지가 전륜에 반영되지 않을 경우 구동륜의 토크차를 이용하여 선회 가능여부를 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 환경은 드라이 아스팔트에서 이중 차선변경(double lane change)시 8초에 조향 모터 고장으로 전륜의 좌우 조타각도가 고정되었다고 가정하였다.

(a) Inner wheel angle.

(b) Outer wheel angle.

그림 19. 내륜과 외륜의 조타각.

Fig. 19. Steering angle of inner and outer wheel.

그림 20. 조향모터 고장 시 독립구동에 의한 요레이트.

Fig. 20. Yaw rate using independent driving under steering motor failure.

그림 21. 조향모터 고장 시 독립구동에 의한 궤적.

Fig. 21. Trajectory using independent driving under steering motor failure.

(a) Front left wheel torque.

(b) Front right wheel torque.

(c) Rear left wheel torque.

(d) Rear right wheel torque.

그림 22. 조향모터 고장 시 구동 토크.

Fig. 22. Driving torque under steering motor failure.

그림 22는 조향모터 고장 시 선회가 가능하도록 구동 토크를 독립적으로 제어하는 것을 나타낸다. 조향모터 고장으로 인해 좌우륜의 조타각도가 일정하게 유지되어 외란으로 작용하지만 구동력 제어를 통하여 이중 차선변경이 가능하도록 하였다.

V. 시뮬레이션 결과

능동 조향 및 구동력 제어가 가능한 4륜 전기차량의 선회 성능 향상에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

(1) 독립 전륜 조향제어가 가능하도록 좌우 독립형 SBW 시스템을 사용하고, 선회 시 차량 속도에 따라 가변기어비가 기본적으로 적용이 되도록 하였다. 또한, 외륜에 인가되는 수직하중이 내륜보다 외륜에 크게 작용하므로 외륜의 조타각을 제어하여 목표 차량 미끄럼각을 추종하도록 하였다.

(2) 인휠 모터가 장착된 차량은 각 륜의 구동력을 독립적으로 제어가 가능하므로 구동륜의 토크가 독립적으로 입력이 가능하도록 차량모델을 설정하였다. 타이어의 구동력과 수직방향 힘의 비례관계를 이용한 최적 타이어 힘분배 방법을 이용하여 각륜의 구동 토크를 제어하여 목표 요레이트를 추종하도록 하였다.

(3) 그림 10, 11과 같이 선회 시 외륜을 제어하여 차량 미끄럼각을 추종하는 경우 요레이트가 감소하게 되어 차량의 선

회성능 향상여부를 판단할 수 없다. 또한 그림 13, 14는 구동력 배분 방법에 따른 차량의 요레이트 추종여부를 확인할 수 있다.

(4) 독립 전륜 조향과 4륜 구동력 제어를 적용한 그림 15와 16은 차량 선회 시 외륜을 제어하여 목표 차량 미끄럼각을 추종하고, 최적 타이어 힘분배 방법을 이용하여 목표 요레이트를 추종하도록 하면 요레이트 증가에 따른 차량 미끄럼각의 증가 비를 작게 하여 차량의 선회성능을 향상시킬 수 있다.

(5) 조향입력은 차량의 선회와 가장 밀접한 관계를 가지고 있으므로 조향 모터 고장 시 선회가 가능하도록 하여야 한다. 구동륜의 토크차를 이용하여 요레이트를 제어할 수 있으므로 조향모터 고장 시 이중 차선변경 가능여부를 시뮬레이션 하였다. 그림 20과 21을 통해 조향 모터 고장 시 구동력 제어를 통하여 차량이 안전하게 이중 차선 변경이 가능하였다.

VI. 결론

본 논문은 4륜 전기차량의 선회성능을 향상시키기 위하여 독립 전륜 조향이 가능한 좌우 독립형 SBW시스템과 각륜에 인휠 모터를 장착하였다고 가정하였다. 제어 알고리즘 검증에 위한 사용한 차량모델은 TruckSim 모델이다. 차량 모델은 CarSim(Ver. 7)의 A-Class, Hatchback 차량의 파라미터를 사용하였다. TruckSim 차량모델과 Matlab Simulink를 이용하여 본 논문에서 사용한 제어 알고리즘을 시뮬레이션 하고 검증하였다. 전륜의 좌우 독립 조향 및 4륜의 독립 구동토크 제어를 이용하여 차량의 선회 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 SBW 시스템의 단점인 조향 모터 고장 시 구동륜의 독립 제어를 이용하여 차량이 안전하게 선회가 가능한지 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 이중차선 변경이 가능하였다. 하지만, 시뮬레이션에서는 구동 토크 한계 값을 적용하지 않고 제어 알고리즘을 적용하였다.

향후 연구에서는 차량의 속도, 미끄럼 각, 요레이트, 각륜에 인가되는 수직방향 힘 등을 추정하여 실차 적용이 가능하도록 하고, TCS와 같은 구동력을 최적으로 제어가 가능하도록 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 능동 제어의 단점인 모터 고장에 따른 fail-safe를 고려한 redundancy 상황에서의 차량 구동 알고리즘에 대한 연구가 병행되어야 한다.

참고문헌

- [1] M. Choi, C. Kim, D. Kim, S. Kim, J. Choi, and C. Han, "A study on improving stability of in-wheel motored FR electric vehicle in cornering using independent drive control," *KSAE (in Korean)*, KSAE11-B0217, pp. 1142-1146, 2011.
- [2] C.-J. Kim, J.-H. Jang, S.-N. Yu, S.-H. Lee, C.-S. Han, and J. K. Hedrick, "Development of a control algorithm for a tie-rod-actuating steer-by-wire system," *IMEchE PartD: Journal of Automobile Engineering*, vol. 222, no. 9, pp. 1543-1557, 2008.
- [3] J. Lee, S. Suh, W. Shon, C. Kim, and C. Han, "System modeling and simulation for an in-wheel drive type 6×6 vehicle," *Transaction of KSAE (in Korean)*, vol. 19, no. 2, pp. 1-11, 2011.
- [4] 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.

- [5] C.-J. Kim, J.-H. Jang, S.-K. Oh, J.-Y. Lee, C.-S. Han, and J. K. Hedrick, "Development of a control algorithm for a rack-actuating steer-by-wire system using road information feedback," *IMechE PartD: Journal of Automobile Engineering*, vol. 222, no. 9, pp. 1559-1571, 2008.
- [6] M. Nagai, Y. Hirano, and S. Yamanaka, "Integrated control of active rear wheel steering and direct yaw moment control," *Vehicle System Dynamics*, vol. 27, pp. 357-370, 1997.
- [7] H. Fujimoto, T. Saito, A. Tsumasaka, and T. Noguchi, "Motion control and road condition estimation of electric vehicles with two in-wheel motors," *IEEE Int. Conference on Control Applications*, pp. 1266-1271, 2004.
- [8] Thomas D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, 1992.
- [9] Masato Abe and W. Manning, *Vehicle Handling Dynamics: Theory and Application*, Elsevier, 2009.
- [10] Mechanical Simulation, <http://www.carsim.com>
- [11] D.-H. Kim, C.-J. Kim, Y.-R. Kim, and C.-S. Han, "A study on an independent 6WD/6WS of electric vehicle using optimum tire force distribution," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 16, pp. 632-638, 2010.
- [12] C.-J. Kim and C.-S. Han, "A study on independent steering & driving control algorithm for 6WS/6WD vehicle," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 17, no. 4, pp. 313-320, 2011.

장재호

2001년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2003년 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 석사 졸업. 2008년 한양대학교 대학원 기계공학과 박사 졸업. 2008년~현재 한국생산기술연구원 재직중. 관심분야는 국방 및 재활 서비스 로봇.

김창준

2004년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2006년 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 석사 졸업. 2012년 한양대학교 대학원 기계공학과 박사 졸업. 2012년~현재 한양대학교 CnR Lab 박사후 과정. 관심분야는 차륜형 로봇, 전기 자동차, 차량동역학(독립 구동, 능동조향, 복합조향).

김상호

2010년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2010년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 석박사 통합과정 재학중. 관심분야는 차륜형 로봇, 전기자동차, 차량동역학(독립구동, 능동조향, 복합조향).

강민성

2000년 홍익대학교 기계공학과 졸업. 2002년 홍익대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2008년~현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 건설자동화, 인간로봇 협업, 무인 굴삭시스템, 재활로봇.

백성훈

1996년 건국대학교 항공우주공학과 졸업. 1998년 건국대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2011년~현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 무인차량 주행제어, 다중센서 기반 자율주행.

김영수

1997년 숭실대학교 기계공학과 졸업. 2005년 고려대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2007년~현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 다축차량 구동 및 제어, 센서기반 운동계획.

한창수

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