



6륜 독립구동 인휠 전기구동차량 주행제어 실험

이지석*, 이정엽
(주)현대로템

1. 머리말

독립구동전기차량(IDEV : independent motor drive electric vehicle)는 미래형자동차의 새로운 구동개념이다. IDEV는 향상된 동력효율을 제공할 수 있고, 기존 차량의 트랜스미션이나 트랜스퍼케이스 등과 같은 동력전달요소를 제거하여 차량내부의 공간을 효율적으로 활용할 수 있다. 특히, 휠에 내장된 모터를 사용하는 IDEV는 각 구동 휠의 토크를 독립적으로 제어할 수 있어서 차량의 횡방향(lateral) 동적 특성 개선에 유용하다⁽¹⁾.

이 글에서는 구동제어로직의 결정적인 역할이라 할 수 있는 차량의 동역학적 모델링으로 횡방향 동적 회전 모멘트 제어방법을 시뮬레이션 구현으로 검증하였던 연구를 바탕으로 실제차량의 구동 및 주행시험을 통해 획득한 데이터를 분석하고자 한다.

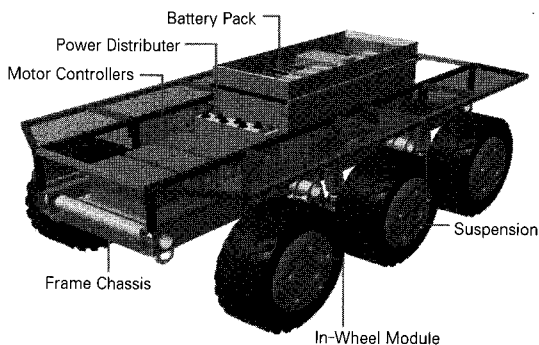


그림 1 6륜 독립구동전기차량

2. 동역학 모델링 및 시뮬레이션

2.1 6륜 인휠 독립구동전기차량 모델링

차량 주행의 물리학적 동역학 모델 설계를 통한 개발은 차량 구동뿐만 아니라 차량 항법과 제어시스템 설계의 필수 과정이라 할 수 있다.

차량의 동역학 모델링은 지면에서의 미끄럼현상과 추진 등의 물리학적, 동역학적 특성을 반영하여 수학적 모델을 통하여 타이어와 지면간의 추진조건을 예측하는 이론적 시뮬레이션 모델링이다. 현가장치의 변형에 의한 효과는 무시한다.

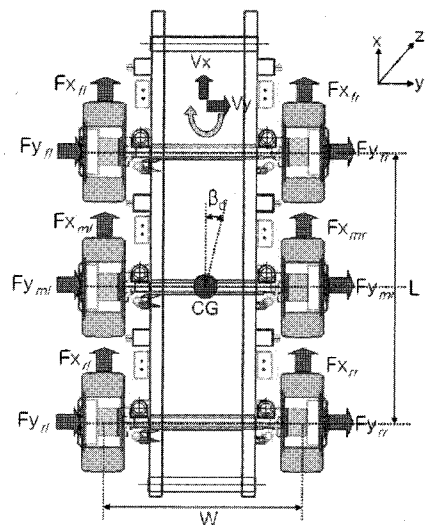


그림 2 6륜 독립구동전기차량 동역학 모델

* E-mail : Mr.LEE@hyundai-rotem.co.kr / (011) 9950-5632

(1) 차량 모델링

실험에 사용될 인휠 전기구동차량(IWEV: in-wheel IDEV)은 그림 1과 같이 6개의 각 휠에 내장된 모터가 있어서, 별도의 조향장치 없이 양쪽바퀴의 토크출력 차이로 주행방향을 회전시키는 스키드 조향(skid-steer)방식으로 조향한다. 조향시에 차량동역학은 타이어의 슬립과 타이어에 작용하는 횡력에 의해 영향을 받고, 추진력은 일반적으로 타이어의 비선형특성에 따르게 된다. 따라서, IWEV의 동역학 특성을 표현하기 위해서는 정확한 차량 모델링이 필요하다²⁾.

그림 2와 같이 모터 및 타이어와 6개의 바퀴의 회전과 3방향(x: 종방향, y: 횡방향, z: 수직방향)의 운동(9DOF)을 모델링하였고, 검증된 ADAMS 차량모델기반 타이어와 차량 새시의 동역학 모델링으로 종방향 속도, 횡방향 속도, 요레이트, 롤각, 피치각, 횡경사각, 종방향, 횡방향 변위 등을 정확히 구할 수 있었다.

(2) 인휠 모터 모델링

모터는 식 (1)과 같은 1차시스템으로 모델링하였다.

$$\frac{T_{output}}{T_{target}} = \frac{1}{1 + \tau_{MOTOR}S} \quad (1)$$

여기서 τ_{MOTOR} 는 인휠 모터의 시상수이다. 인휠 모터는 3,500 rpm 구간까지 최고 토크 24 Nm의 정토크 구간을 가지며, 최고회전속도는 4,200 rpm이다.

(3) 타이어 모델

차량 선회 특성은 타이어에서의 횡방향 접지력에 따라 달라진다. 실제 타이어의 특성은 타이어 미끄럼각이 증가함에 따라 타이어의 횡력이 선형적으로 증가하다가 일정 미끄럼각 이상에서는 횡력의 포화현상으로 인하여 비선형적으로 변화한다. 이 글에서는 타이어에 작용하는 구동력의 영향을 고려하여 다음과 같은 비선형 타이어 모델을 사용하였다.

$$F_{yi} = K_{xi} \left[-\frac{2}{\pi} \mu(N_i + \Delta N_i) \tan^{-1} \left[\frac{\pi C_i \beta_i}{2\mu(N_i + \Delta N_i)} \right] \right] \quad (2)$$

$$K_{xi} = \sqrt{1 - \left[\frac{F_{xi}}{\mu(N_i + \Delta N_i)} \right]^2}$$

여기서 C_i 는 타이어 코너링 강성, β_i 는 타이어 미끄럼각, K_{xi} 는 제동에 의한 직진방향 작용력 감소로 인한 횡력의 증가를 나타내는 지수이다.

2.2 6륜 인휠 독립구동전기차량 운동방정식

복잡한 차량 운동의 수학적 모델을 보다 간단하게 위해 차량은 저속으로 수평이동을 하고, 종방향의 미끄럼 현상은 무시하였다. 또한 타이어의 횡방향 힘은 수직하중(m)에 비례하고, 양쪽 바퀴의 동작은 종방향 슬립감소와 동일하고 시계방향으로 회전하는 것으로 가정하였다.

(1) 휠 회전운동방정식

그림 3는 좌측전륜 바퀴의 회전운동을 도식화한 것이다. 이에 따른 휠의 회전운동방정식은 식 (3)으로 표현된다.

$$N_g T_{motor_fl} = (N_g^2 J_{motor} + J_{wheel}) \dot{\omega}_{fl} + F_{fl} R \quad (3)$$

N_g 는 모터 감속기의 감속비, T_{motor_fl} 은 전륜 좌측 휠에 작용하는 모터 토크, J_{motor} 는 모터 관성, J_{wheel} 은 휠 관성, ω_{fl} 은 좌측전륜 회전속도, F_{fl} 은 좌측전륜에서 발생하는 구동력, R 은 바퀴 반경, N_{fl} 은 바퀴에 작용하는 수직 항력이다.

여기서 F_{fl} 은 휠의 미끄럼 비율을 나타내는 식 (4)의 슬립율(s)에 따라 노면 종류별 마찰계수와 슬립율의 관계를 나타내는 곡선(그림 5)의 마찰계수(μ)에 의하여 식 (5)와 같은 값을 갖는다.

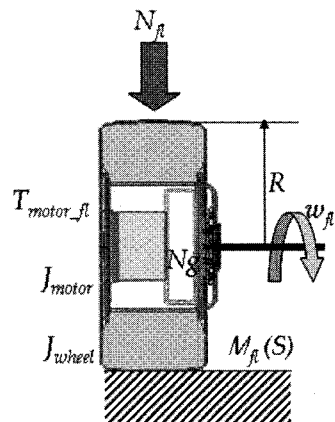


그림 3 좌측전방 휠 운동모델

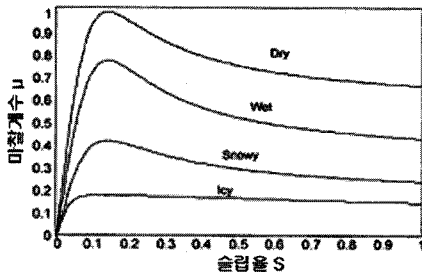


그림 4 노면슬립과 마찰 관계

$$s = \frac{V - R\omega}{V} \quad (\text{제동시}) \quad (4)$$

$$s = \frac{R\omega - V}{R\omega} \quad (\text{구동시})$$

$$F_{fl} = \min(N_{fl} \times \mu_{fl}, T_{motor-fl}) \quad (5)$$

이와 같은 방법으로 6개 바퀴의 회전운동방정식과 각 바퀴에서 발생하는 구동력을 구하여 힘의 평형과 모멘트 평형을 이용하여 횡방향, 종방향의 구동력과 회전관성모멘트를 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} ma_x &= \sum F_x = F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xml} \\ &\quad + F_{xmr} + F_{xrl} + F_{xrr} \\ ma_y &= \sum F_y = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yml} \\ &\quad + F_{ymr} + F_{yrl} + F_{yrr} \\ I\Theta'' &= \sum M = (F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xml} \\ &\quad - F_{xmr} - F_{xrl} - F_{xrr}) \frac{W}{2} \\ &\quad + (F_{yfl} + F_{yfr})L_f - (F_{yrl} + F_{yrr})L_r \end{aligned} \quad (6)$$

차량이 저속으로 주행하는 경우 바퀴의 Coulumb마찰력을 고려하여 횡방향 회전저항력은 무시할 수 있고, 종방향 저항력 (R_x)은 고려하여야 한다. 이때 타이어와 지면의 접촉면을 직사각형으로 표현하여 수직방향 압력은 접촉면에 균등하게 분산되는 것으로 가정하여 식(7)과 같이 구할 수 있고, 따라서 운동방정식을 식(8)과 같이 나타낸다.

$$R_x = f_r \sum F_z = mgf_r (\sum F_x) \quad (7)$$

여기서 f_r 은 회전저항계수를 나타내는 것으로 속도에 무관하다.

$$\begin{aligned} ma_x &= \sum F_x - R_x \\ ma_y &= \sum F_y \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 조향 운동방정식

최초 차량이 (x,y)의 위치에서 (X,Y)의 위치로 t시간동안 θ 만큼 회전 이동하였다면 그 위치 변환식 $R(\theta)$ 은 식(9)와 같이 표현되고

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

현재 차량의 속도와 가속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} &= R(\theta) \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \end{bmatrix} &= R(\theta) \begin{bmatrix} x'' + y'\theta' \\ y'' - x'\theta' \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

좌우 바퀴의 추진력은 동일하고 추진방향을 반대로 하면 차량은 차량 무게중심을 기준으로 제자리 회전을 하게 된다. 반시계방향으로 제자리회전하는 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x'_{fl} &= x'_{ml} = x'_{rl} = x' - t\theta' \\ x'_{fr} &= x'_{mr} = x'_{rr} = x' + t\theta' \\ y'_{fl} &= y'_{fr} = y' + r_f\theta' \\ y'_{ml} &= -y'_{mr} = y' + r_m\theta' \\ y'_{rl} &= -y'_{rr} = y' - r_r\theta' \\ F_{xfl} &= F_{xml} = F_{xrl} \\ F_{xfr} &= F_{xmr} = F_{xrr} \end{aligned} \quad (11)$$

$$ma_x = 3F_{xfl} + 3F_{xfr} - R_x$$

$$ma_y = -F_y$$

$$I\Theta'' = L(F_{xfl} - F_{xfr}) - M_r$$

$$R_x = \sum F_z \operatorname{sgn}(x') = f_r mg (\operatorname{sgn}(x'_{fl}) + \operatorname{sgn}(x'_{fr}))$$

$$F_y = \sum \mu F_z \operatorname{sgn}(y'_i) = \mu mg (\operatorname{sgn}(y'_{fl}) + \operatorname{sgn}(y'_{fr}))$$

$$M_r = \frac{2}{3} r_f \mu mg (\operatorname{sgn}(y'_{rr}) - \operatorname{sgn}(y'_{fl}))$$

$$+ \frac{1}{3} r_m \mu mg (\operatorname{sgn}(y'_{mr}) - \operatorname{sgn}(y'_{ml}))$$

$$+ \frac{2}{3} L f_r (mg (\operatorname{sgn}(x'_1) - \operatorname{sgn}(x'_2)))$$

r_f 는 무게중심(CG)에서 전륜까지의 거리, r_m 은 중륜까지의 거리, r_r 은 후륜까지의 거리를 나타낸다.

2.3 인휠 전기구동차량 주행제어 알고리즘 시뮬레이션

제안된 그림 5와 같은 PD적응제어알고리즘은 요레이트에러 γ_{error} 를 보상하는 토크변이 ΔT 로 생성되는 DYM(direct yaw moment)으로 차량의 각각의 모터에 DTM(direct torque moment)를 적용하여 조향안정화를 유지하고자 하였다. 이때, 요레이트기대치 γ_d 는

$$\gamma_d = \beta_d V_x / L \quad (12)$$

와 같이 정의하였다. 이때 V_x 는 종방향 속도, L 은 축간거리, β_d 는 조향장치가 없는 차량의 가상의 조향각을 표시하고자 조향각기대치를 나타낸다.

조향시 종방향속도 대비 이상적인 요레이트 게인곡선(그림 6)을 도입하여 차량 주행속도별 조향안정성을

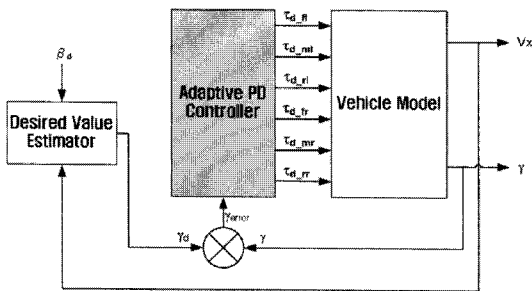


그림 5 6륜 인휠 전기구동차량 모터제어 알고리즘

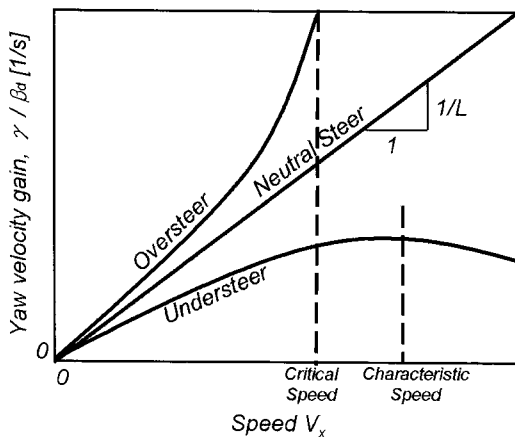


그림 6 종방향 속도대비 요각속도 게인

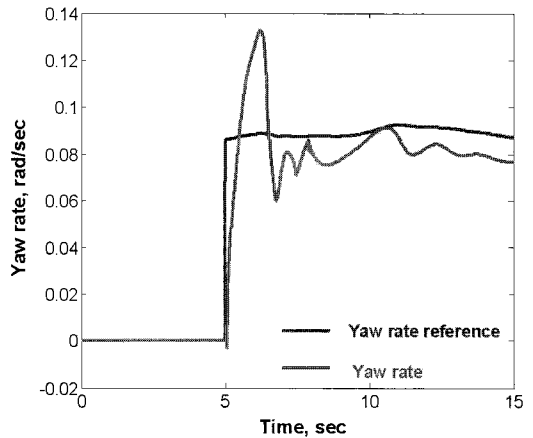


그림 7 PD적응제어 시 요레이트

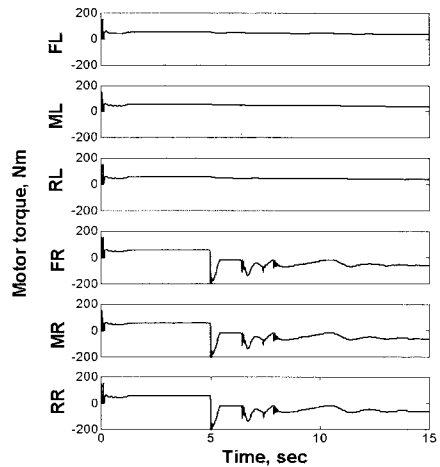


그림 8 PD적응제어 시 모터토크

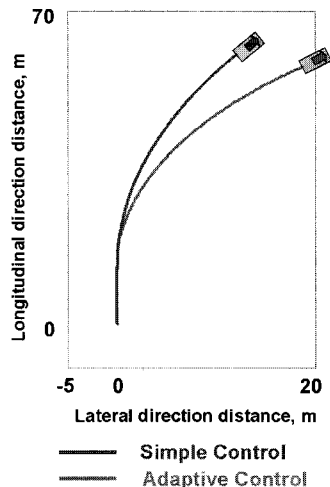


그림 9 차량 조향성능 비교

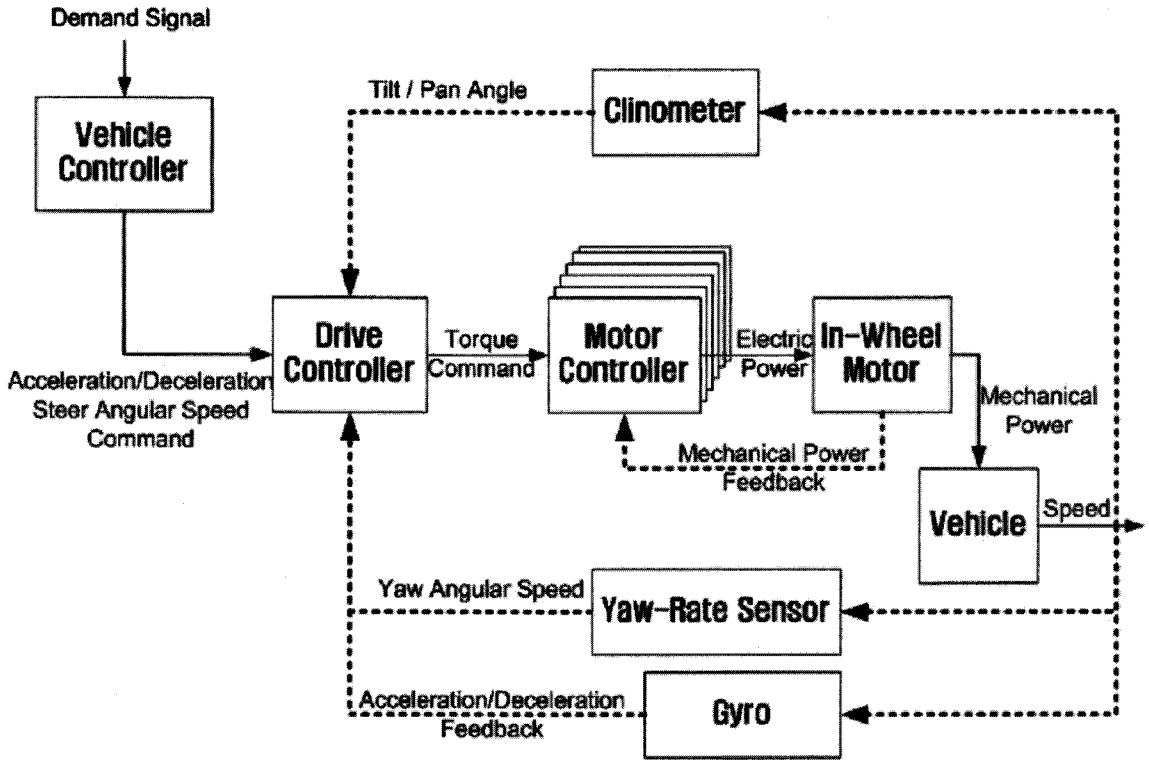


그림 10 구동제어시스템 구성도

유지토록 하였다.

ADAMS와 MATLAB Simulink로 구성된 co-simulator 시물레이션을 통해 DYM PD적용제어가 단순 P제어보다 6륜 독립제어를 통한 주행 및 조향 안정화를 개선하게 됨을 보여준다. 그림 7, 8, 9는 조향각 β_d 를 5° , 지면마찰계수 μ 인 얼음판 주행조건으로 실시한 결과이다⁽²⁾.

3. 실차 시험

3.1 인휠 전기구동차량 동력 사양 선정

차량 총중량 1.5톤, 적재중량 1.5톤을 기준으로 총 3톤의 중량부하와 지면과의 마찰력, 제자리회전 및 조향시의 횡력극복 토크, 차량의 속도와 등판능력 등을 고려하여 사양을 선정하여 제작하였다. 주요 동력장치인 모터는 각 바퀴에 삽입되는 인휠형식으로 정격 24 Nm, 3,500 rpm 특성의 8kW BLDC모터 6개를 사용하고 감속비는 29:1 싸이클로이드 형식을 채택한다.

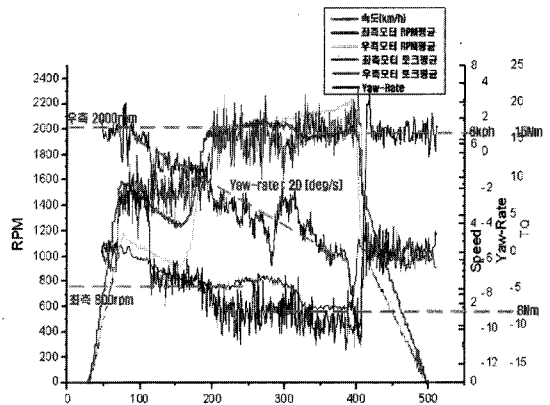


그림 11 완만한 좌회전 시 모터회전수, 모터토크, 요레이트

3.2 인휠 전기구동차량 구동제어시스템 구성

차량모델링과 제어알고리즘으로 제시하였던 DYM PD적용제어를 위한 시스템을 그림 10과 같이 구성한다. 운전자의 운전명령을 차량제어기(vehicle controller)에서 처리하고 구동제어기(drive controller)가 각 모터제

특집: 제17권 제6호 로보틱스

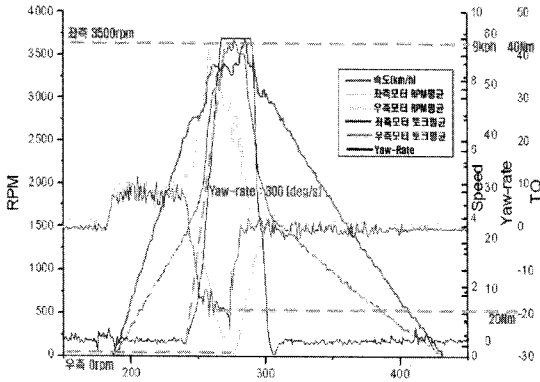


그림 12 급한 우회전 시 모터회전수, 모터토크, 요레이트

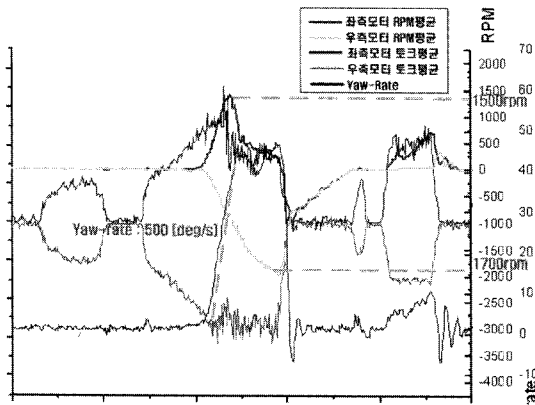


그림 13 제자리회전

여기에 토크기대치를 계산하여 지령한다. 차량의 구동 상태는 가속센서에 의한 속도검출, 자동차용 G센서로부터 요레이트를 검출한다.

3.3 시험 결과

좌륜과 우륜간의 토크, 회전수 차이에 의해 조향이 되는 스키드 조향방식을 요레이트 귀환값을 PD적응제어 알고리즘을 적용하여 실차시험을 하여, 수집된 데이터를 분석 연구한다.

그림 11은 6 kph의 차량속도에서 약 20%의 각속도로 좌회전 주행시의 모터의 회전수와 토크를 나타낸다. 우측 모터는 약 15 Nm, 좌측 모터는 약 8 Nm의 토크 차이

로 회전이 이루어진다.

그림 12는 주행속도 약 9 kph의 속도로 300%/s의 회전 각속도 우회전시의 그래프이다. 이때는 우측 모터의 회전수가 0 rpm으로 우측바퀴가 회전축이 되어 급조향을 한다.

스키드 조향방식의 장점은 제자리회전(pivot turning)이 가능하여 회전반경을 최소화 할 수 있다는 것이다. 그림 13은 약 500%/s의 회전각속도로 제자리회전시의 그래프이다.

4. 맺음말

시뮬레이션으로 제안하였던 인휠 전기차량의 독립 구동제어방식으로 PD적응제어알고리즘을 채택하여 실제 제작한 차량으로 시험한 연구내용과 같이 조향장치가 없는 차량의 skid-steer조향 운전과 제자리회전의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 제자리회전시 정확한 회전위치제어기법에 대한 연구를 계속 진행하고자 한다. ▣

후기

이 연구는 산업자원부 성장동력사업 지능형로봇과제의 실외화재진압로봇기술개발 과제로 연구하였습니다.

참고문헌

- (1) Okano, T., Hwa, T. C., Inoue, T., Uchida, T., Sakai, S. and Hori, Y., 2002, "Ehicle stability Improvement Based on MFC Independently Installed on 4 Wheels-basic Experiments Using UOT Electric March II", PCC-Osaka, Vol. 2, pp. 582~587.
- (2) Kim, J. M., Lee, R. U., Lee, J. S., Lee, J. Y. and Kim, H. S., 2006, "Motor Control Algorithm for a 6-Wheel Independent Drive Electric Vehicle", SICE-ICASE 2006 International Joint Conference, BEXCO, Busan, Korea, pp. 2416~2419.