

<논 문> SAE NO. 96370042

4WD/4WS 전기 구동 차량의 동역학적 성능 해석

Dynamic Performance Analysis for 4WD/4WS Electric-driven Vehicles

김 준 영,⁺ 계 경 태,[°] 박 건 선,^{*} 허 건 수,^{**} 장 경 영,^{**} 오 재 응^{***}
J. Y. Kim, K. G. Kye, K. S. Park, K. S. Huh, K. Y. Chang, J. E. Oh

ABSTRACT

In this paper, dynamic performance of 4WD/4WS Electric-driven vehicles is investigated. A coupled dynamic model is introduced for longitudinal, lateral and yawing motion of 4WD/4WS vehicles. Based on the coupled model, dynamic performance is analyzed for steady-state steering, acceleration steering and brake steering, respectively. These non steady-state cornering analysis is important for non-paved road maneuvering, trajectory projection for armored vehicle and future AVCS(Advanced Vehicle Control System) technology. Simulation results are obtained based on a simulink module for the introduced model.

주요기술용어 : Electric-driven(전기구동), 4WD(4륜구동), 4WS(4륜조향), Side Slip Angle(횡미끄럼각), AVCS(차세대차량제어시스템), Non Steady State(비정상상태), Cornering Stiffness(코너링강성)

1. 서 론

전기자동차의 개발은 전세계적으로 자동차 대수의 급증에 따라 도심지역의 공해가 날로 심각해지고 있는 환경적 측면 뿐만 아니라 석유자원

의 고갈을 대비한 에너지원의 다양화 및 에너지 효율의 증가라는 측면에서 필요성이 증대하고 있다. 전기자동차의 구조는 석유를 엔진 내부에서 연소시켜 얻은 동력으로 바퀴를 구동하는 내연기관 자동차와 달리 전기에너지로 전동기를 회전시켜 얻은 동력으로 바퀴를 구동하게 된다.

4WD(Four Wheel Drive) 방식은 전륜과 후륜에 동력을 공급하는 방식으로 미끄러운 노면이나 이면도로에서 구동성, 주행안정성, 제동성을 향상시키며, 4WS(Four Wheel Steering) 방식은 자동차 선회시 무게중심의 횡미끄럼각(Side

* 정회원, 한양대 정밀기계공학과 대학원
° 대우자동차
* 기아자동차
** 정회원, 한양대 정밀기계공학과
*** 정회원, 한양대 자동차공학과

Slip Angle)을 최소로 하기 위해 전륜과 후륜을 동시에 조향할 수 있는 방식으로 고속 주행시 차선변경과 선회에 대한 조종안정성을 높이고, 저속시의 선회나 주차시 회전반경을 감소 시킴으로써 조종성능을 향상시킨다.

본 연구에서 고려하는 4WD 전기구동차량의 구조는 일반 4WD 내연기관 차량과 전체적인 구조는 유사하나 동력원인 모터가 4개의 축에 직접 연결되어 동력을 공급하는 차이점이 있다. 또한 같이 고려되는 4WS 방식은 정속주행을 주로 하는 승용차용은 물론 뛰어난 구동성과 조향성, 그리고 험지주행성등을 요구하는 특수차량의 용도로도 사용하고자 한다.

본 논문에서는 4WD/4WS 전기구동차량의 동역학적 성능을 해석하는데 그 목적을 두고 있으며 특히, 차량의 선회시 가속과 감속을 고려한 비정상상태(Non Steady-State)의 해석을 수행하고자 한다. 이 전기구동차량의 초기설계단계에서는 5ton 중량 차량의 4WD 구동용으로 적절한 구동모터를 선정한 후 그 가속성능, 동판성능, 최고속도등의 기초 시뮬레이션 검증을 수행하였다. 다음 단계로서 종방향(Longitudinal), 횡방향(Lateral) 그리고 요우잉방향(Yawing)의 연계(Coupled)된 차량동역학적 모델을 이용하여 정속조향, 가속조향 및 감속조향 특성을 연구하였다. 이 연구는 전기구동차량의 조향시 그 궤적을 정확히 예측하기 위함이며, 이는 특히 차세대 차량제어시스템(AVCS) 등에서 차량의 투영궤적(Projected Route)을 필요로 하는 자동주행 모니터링(Monitoring) 장치(K.Huh et al.)¹⁷⁾에도 적용될 수 있다. 이를 위하여 Simulation Tool을 이용한 종합 성능예측 시뮬레이션 프로그램의 모듈화 토대를 구축하고 실차주행 시험을 위하여 모델을 제작하는데 필요한 최적의 파라미터를 제공하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 4WD/4WS에 관련된 국내외 연구동향을 분석하였고, 3절에서는 본 연구에서 사용된 차량 동역학적 모델을 제시하고 있다. 4절에서는 3절에서 제시된 동역학적 모델을 Simulation Tool로 구축하여 여러 조건에서의 시뮬레이션을 수행하였

고, 마지막 5절에서 결론을 맺고자 한다.

2. 배 경

최근의 전기전자공학의 눈부신 발달로 인해 전기자동차는 실용화 단계에 와있으며 지금까지의 연구결과 배터리, 추진시스템, Hybrid화에 관한 연구는 어느 정도 만족할 만한 수준에 와있으나 전기자동차와 관련된 동역학적 해석에 관한 연구는 충분히 되어있지 않다. 최근의 연구동향으로 N. Matsumoto와 M. Tomizuka¹⁾는 4개의 구동모터와 4개의 조향모터가 장착된 전기자동차의 횡방향 운동 및 요우잉방향 운동의 선형화된 2자유도 모델을 이용하여 정상상태 회전시의 거동을 검토하였으며 아울러 직진방향 속도와 코너링 강성(Cornering Stiffness)이 시간에 따라 변하는 파라미터일때 원하는 응답특성이 나오도록 전후 조향각을 제어하는 연구를 수행하였다. H. Higasa등²⁾은 전기자동차의 롤운동을 포함시킨 3자유도 모델을 이용하여 정상상태 회전시 차량의 횡미끄럼각을 영으로 감소시키거나 혹은 차가 Neutral Steer 특성을 갖도록 하는 능동 제어기법에 관하여 연구하였다.

내연기관 차량의 4WD/4WS 방식 연구로는 J. Marezke와 B. Richter³⁾가 내연기관 차량의 다양한 구동 조건하에서 여러 거동을 연구하였는데 주행안정성 측면에서 보면 전륜구동 방식 및 4륜구동 방식은 우수한 성능을 보여주는 반면에 후륜구동 방식은 미끄러운 노면일수록 외란에 대해 급격한 불안정성을 가지고 있음을 보여 주었다. 또한 비정상상태 회전시 4륜구동 방식이 2륜구동 방식보다 미끄럼각이 훨씬 작으며 요우잉각 에러 또한 훨씬 작음을 보여주었다. Y. Matsuo등⁴⁾은 4WD 차량의 구동조건에 따라 전후륜의 구동력을 최적으로 분배해주기 위해 요우잉속도 추종 제어이론을 이용하여 그 결과로 선회성능과 안전성의 균형을 맞추어 주었다.

4륜조향 시스템에 관한 연구는 보다 나은 성능을 요구함으로써 활발하게 되었는데 S. Sano 등⁵⁾과 H. Mourid등⁶⁾은 실험적으로 2륜조향 차량과 4륜조향 차량의 성능비교를 수행하여 고속에

서는 전, 후륜의 방향을 같게 함으로써 안정성을 향상시키고 중, 저속에서는 전, 후륜의 방향을 다르게 하여 조종성능이 향상됨을 보여주었다. 4륜조향 시스템은 Bicycle 모델을 이용한 여러 제어 기법을 적용하였는데, 차체의 회전동특성 및 안정성을 향상시키기 위하여 Y. Hirano⁷⁾은 Hoo이론을, M. Nagai⁸⁾는 피드포워드 및 피드백 보상기를 가진 모델 추종 제어이론을 M. Abe⁹⁾는 횡미끄럼각이 0이 되는 제어 알고리즘을, Y. Watanabe¹⁰⁾은 후륜조향각을 요우잉속도에 따라 최적치가 되도록 하는 모델 기준 제어알고리즘을, D. Karnoop과 D. Wuh¹¹⁾는 외란의 영향을 고려한 상태 피드백 제어 알고리즘을 제안하였다. 또한 비선형 3자유도 모델을 이용하여 후륜을 조향하기 위한 다양한 제어 방법이 제안되었다. A. G. Nalecz와 A. C. Bindemann¹²⁾은 적당한 고속에서 다양한 제어방법을 적용하여 회전 제동시의 동적거동을, 그리고 N. E. Sanchez¹³⁾는 Symbolic-Numerical Method를 이용하여 동적거동을 해석하였다. Y. Furukawa와 S. Sano¹⁴⁾는 등가 코너링강성의 개념을 이용하여 높은 횡가속도를 가지며 회전하는 경우의 차량의 비선형 동역학을 연구하였다. X. Xia와 E. H. Law¹⁵⁾는 선회시의 구동력 및 제동력이 조향성능에 미치는 영향을 연구하였고 L. D. Metz¹⁶⁾은 다양한 타이 어 모델을 이용하여 4륜조향 차량의 성능 및 특성들을 비교 검토하였다. K. Huh¹⁷⁾은 고속도로에서 노면을 이탈해 생기는 사고를 방지할 목적으로 차량의 Lane Sensor를 통해 차량의 노면을 이탈하게 되면 운전자에게 위험상태를 경고해 주고 더 나아가 자동으로 원 위치로 케환시키는 능동조향 제어시스템을 설계하였다.

한편 국내에서의 연구상황에 관하여 살펴보면 송준규와 윤용산¹⁸⁾은 관측기가 필요없는 고속도 피드백 제어식 4WS와 ARS의 통합제어를 통하여 조향안정성과 승차감의 향상을 동시에 구현하는 방법을 제시하였다. 전진홍과 김종선¹⁹⁾은 후륜을 조향하는 작동기의 동역학을 고려하고 작동기의 시간지연을 보상하는 보상기를 설계하여 4륜조향 차량의 조향특성을 향상시켰다. 이영화²⁰⁾은 운전자 모델을 고려한 bicycle 모델을 이용하

여 4륜조향 차량의 주행특성을 해석하였고 코너링강성을 변화시켜가며 코너링강성이 4륜조향 차량의 조향특성에 미치는 영향을 해석학적으로 고찰하였다.

위에서 기술되었듯이 4WD/4WS 차량의 조향 제어 기법에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나, 제어기 설계에 앞서서 4WD/4WS 차량의 비정상상태의 동특성 해석은 충분히 되어 있지 않다. 본 연구에서는 종방향, 횡방향 및 요우잉방향 운동의 서로 연계된 동역학 모델을 토대로 동적 성능 해석을 하고자 하며 특히, 비정상상태에서의 조향성을 조사하고자 한다.

3. 차량동역학 모델

본 논문에서는 차량의 정상상태 및 비정상상태 회전시의 주행성능을 해석하기 위하여 앞의 2절에서 언급된 논문들에서 많이 고려되었던 횡방향 및 요우잉방향 운동에 대한 2차모델에 종방향 운동을 추가하였다. 이 3차모델에서는 구동력 및 제동력의 영향과 좌우가 다른 구동력이 걸릴때의 영향 그리고 이면 도로 주행시의 응답을 살펴보기 위해 비선형 항들을 그대로 살렸으며 소거되는 항이 없는 Full Model이 된다.

모델로 사용된 차량은 Fig.1과 같은 차량조정 좌표계를 사용하고 있으며 현가운동 및 하중의

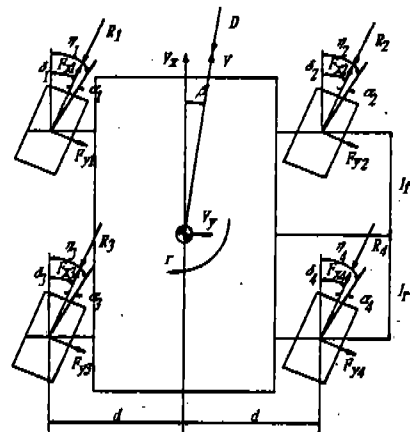


Fig.1 Coordinate System

이동에 의한 영향은 고려하지 않았다. 본 연구를 위한 전기구동차량의 동역학적 모델식의 간략화된 유도는 다음과 같다.

3.1 종방향 운동

4WD/4WS 전기구동차량의 종방향 관계식은 다음과 같다.

$$M(\dot{V}_x - V_y \cdot r) = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 - D \cos \beta \quad (1)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 \quad (2)$$

여기서 V_x 는 종방향속도, V_y 는 횡방향속도이며 V 는 차량속도, ρ 는 공기밀도, C_D 는 공기저항 계수, A 는 투영면적 그리고 M 은 차량의 질량이다. X 는 타이어에서 발생하는 차체의 길이방향 힘의 성분이고 D 는 공기저항력이며 β 는 횡미끄럼각(Side Slip Angle)을 나타낸다. 아래첨자 x , y 는 x 방향, y 방향을 뜻하며 1, 2, 3, 4는 각각 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측을 뜻한다. 여기서 조향각이 미소하다고 가정하면 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_1 &= (F_{x1} - R_1) \cos \delta_1 - F_{y1} \sin \delta_1 = F_{x1} - R_1 - F_{y1} \delta_f \\ X_2 &= (F_{x2} - R_2) \cos \delta_2 - F_{y2} \sin \delta_2 = F_{x2} - R_2 - F_{y2} \delta_f \\ X_3 &= (F_{x3} - R_3) \cos \delta_3 - F_{y3} \sin \delta_3 = F_{x3} - R_3 - F_{y3} \delta_r \\ X_4 &= (F_{x4} - R_4) \cos \delta_4 - F_{y4} \sin \delta_4 = F_{x4} - R_4 - F_{y4} \delta_r \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_i = f_n \times W, \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

여기서 F_x 는 모터에서 발생하는 구동력 또는 제동력을 포함하는 타이어 힘이며 F_y 는 타이어의 미끄럼각과 비례하는 힘을 발생시키는 단순한 타이어 모델에 근거한다. f_n 는 구름저항계수이고, R_i 는 각 타이어에 발생하는 구름저항력이며 크기는 모두 같고 그 합은 R 이라 가정한다. δ_r , δ_l 은 각각 전륜, 후륜 조향각이며 전륜조향각(δ_f)은 좌측(δ_1)과 우측(δ_2)이 같다고 가정하고, 후

륜조향각(δ_r)도 좌측(δ_3)과 우측(δ_4)이 같다고 가정한다.(일반적으로 미끄럼각이 5° 이내인 경우 그 관계는 선형적이다)

$$F_{y,i} = -C_i \alpha_i \quad (5)$$

$$\alpha_i = \eta_i - \delta_i \quad (6)$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_f, \quad \delta_3 = \delta_4 = \delta_r \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x + d \cdot r} \right) = \frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x} \\ \eta_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x - d \cdot r} \right) = \frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x} \\ \eta_3 &= \tan^{-1} \left(\frac{V_y - l_r \cdot r}{V_x + d \cdot r} \right) = \frac{V_y - l_r \cdot r}{V_x} \\ \eta_4 &= \tan^{-1} \left(\frac{V_y - l_r \cdot r}{V_x - d \cdot r} \right) = \frac{V_y - l_r \cdot r}{V_x} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 C_i 는 타이어의 코너링강성, r 은 요우잉 속도, l_f 는 무계중심에서 앞차축까지 거리, l_r 은 무계중심에서 뒤차축까지 거리, d 는 무계중심에서 바퀴중심까지의 거리이다. 그리고 α_i 는 미끄럼각(Slip Angle)이고 η_i 는 δ_i 와 α_i 의 합이다.

위에서 구해진 변수들을 식 (3)에 대입하고 미소한 횡미끄럼각을 가정하고 또는 구름저항력의 합이 R 이라 하면 아래와 같은 종방향의 운동 방정식을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= r \cdot V_y + \frac{1}{M} (F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} - D - R) \\ &+ \frac{C_1}{M} \left(\frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x} - \delta_f \right) \delta_f \\ &+ \frac{C_2}{M} \left(\frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x} - \delta_f \right) \delta_f \\ &+ \frac{C_3}{M} \left(\frac{V_y + l_r \cdot r}{V_x} - \delta_r \right) \delta_r \\ &+ \frac{C_4}{M} \left(\frac{V_y + l_r \cdot r}{V_x} - \delta_r \right) \delta_r \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 D , R 은 추가된 외력성분으로 각각 공기저항력 및 구름저항력이다.

3.2 횡방향 운동

4WD/4WS 전기구동차량의 횡방향 관계식은 다음과 같다.

$$M(\dot{V}_y + V_x r) = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 - D \sin \beta \quad (10)$$

여기서 Y 는 타이어에서 발생하는 차체의 횡방향 힘의 성분이다. 아래첨자에 대한 정의는 전과 동일하며 조향각이 미세하다고 가정하면 Y 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Y_1 &= (F_{x1} - R_1) \sin \delta_1 + F_{y1} \cos \delta_1 = (F_{x1} - R_1) \delta_f + F_{y1} \\ Y_2 &= (F_{x2} - R_2) \sin \delta_2 + F_{y2} \cos \delta_2 = (F_{x2} - R_2) \delta_f + F_{y2} \\ Y_3 &= (F_{x3} - R_3) \sin \delta_3 + F_{y3} \cos \delta_3 = (F_{x3} - R_3) \delta_r + F_{y3} \\ Y_4 &= (F_{x4} - R_4) \sin \delta_4 + F_{y4} \cos \delta_4 = (F_{x4} - R_4) \delta_r + F_{y4} \end{aligned} \quad (11)$$

위에서 정의된 변수들을 식 (10)에 대입하고 미소한 횡미끄럼각을 가정하고 정리하면 다음과 같은 횡방향의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= -r \cdot V_x - \frac{1}{M} \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4)}{V_x} \\ &\cdot V_y - \frac{1}{M} \frac{(C_1 + C_2) l_f - (C_3 + C_4) l_r}{V_x} \cdot r - \frac{D}{M} \\ &\cdot \beta + \frac{1}{M} (F_{x1} + F_{x2} + C_1 + C_2 - 0.5R) \delta_f \\ &+ \frac{1}{M} (F_{x3} + F_{x4} + C_3 + C_4 - 0.5R) \delta_r \end{aligned} \quad (12)$$

3.3 요우잉 운동

4WD/4WS 전기구동차량의 요우잉운동 관계식은 다음과 같이 된다.

$$I \dot{r} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (13)$$

여기서 I 는 질량관성 모멘트이며, N 은 타이어에서 발생하는 종방향성분힘 및 횡방향성분힘에 의해 차체의 무게중심에서 발생하는 모멘트를 의

미한다.

$$\begin{aligned} N_1 &= l_f \cdot Y_1 + d \cdot X_1, \quad N_2 = l_f \cdot Y_2 - d \cdot X_2 \\ N_3 &= -l_r \cdot Y_3 + d \cdot X_3, \quad N_4 = -l_r \cdot Y_4 - d \cdot X_4 \end{aligned} \quad (14)$$

식 (3)과 (11)의 관계식을 위 식에 대입하고 식 (13)에 다시 대입, 정리하면 다음의 요우잉운동 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{r} &= -\frac{1}{I} \frac{(C_1 + C_2) l_f - (C_3 + C_4) l_r}{V_x} \\ &\cdot V_y - \frac{1}{I} \frac{(C_1 + C_2) l_f^2 + (C_3 + C_4) l_r^2}{V_x} \cdot r \\ &+ \frac{l_f}{I} (F_{x1} + F_{x2} + C_1 + C_2 - 0.5R) \delta_f \\ &- \frac{l_r}{I} (F_{x3} + F_{x4} + C_3 + C_4 - 0.5R) \delta_r \\ &+ \frac{d}{I} (F_{x1} - F_{x2} + F_{x3} - F_{x4}) \\ &+ \frac{d}{I} (c_1 \frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x} - c_1 \delta_f) \delta_f \\ &- \frac{d}{I} (c_2 \frac{V_y + l_f \cdot r}{V_x} - c_2 \delta_f) \delta_f \\ &+ \frac{d}{I} (c_3 \frac{V_y - l_r \cdot r}{V_x} - c_3 \delta_r) \delta_r \\ &- \frac{d}{I} (c_4 \frac{V_y + l_r \cdot r}{V_x} - c_4 \delta_r) \delta_r \end{aligned} \quad (15)$$

4. 시뮬레이션

앞의 3절에서 얻어진 식 (9), (12) 그리고 (15)를 토대로 Matlab의 Simulink를 사용하여 Fig.2와 같이 각각의 입력변수들이 조향성능에 미치는 영향을 알아볼 수 있도록 모듈화 하였다. 모듈화된 Simulation Tool을 이용하여 여러가지 조건에서 차량동특성을 조사하였으며 그 결과는 Matlab의 M-file을 사용한 결과와 비교 검증하였다.

본 논문에서 모델링된 전기구동차량은 각 바퀴에 30hp 모터가 장착되었으며 선정된 모터의 파워(power)특성은 초기 기동시 20hp를 발생하고

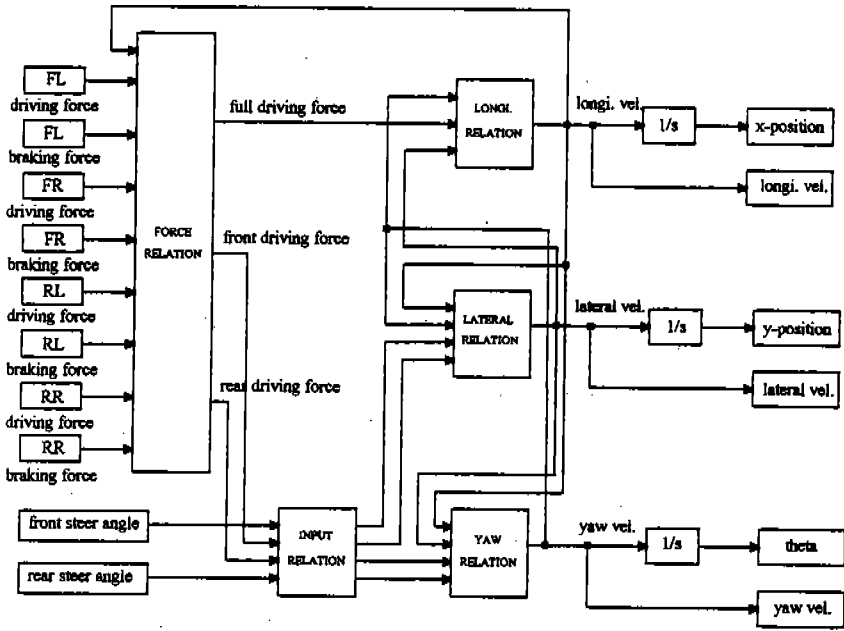


Fig.2 Block Diagram

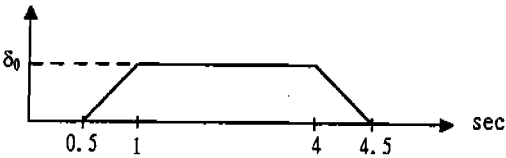


Fig.3 Steering Input 특성

Table 1 Vehicle Parameter

Wheelbase	4m
Vehicle Weight	5ton
Moment of Inertia of a Mass	18,750kgm ²
Distance Front Axle to CG	2m
Front Cornering Stiffness	318,490.7N/rad
Rear Cornering Stiffness	280,110N/rad
Motor Power	30hp×4개
Rolling Resistance Coefficient	0.01

1500rpm(78.5m/s)에서 30hp를 발생하는 일차 함수로 설계하였다. 지금까지 제안되어온 4륜조향 시스템에서는 전륜조향각, 차량 무게 중심에서의 주행속도 그리고 요우잉속도의 함수로서 후

륜조향각을 표현하는 알고리즘이 가장 일반화 되어있다. 본 논문에서는 전후조향각을 독립적으로 주어서 후륜의 다양한 조향입력이 전체 조향성능에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 수치계산에 필요한 차량 파라미터는 Table 1에 나타냈고 작동된 전륜 및 후륜조향각 입력은 Fig.3과 같이 가정하였다. 본 논문에서는 좌, 우조향각은 같다고 가정하였고 제시하는 시뮬레이션 결과는 등속회전시, 가속회전시, 감속회전시의 횡가속도, 요우잉속도, 횡미끄럼각에 대해서 특성을 비교하였다. 마지막으로 전후륜 조향각이 전혀 없이 좌, 우 구동모터의 구동력 차이로 인한 차량 조향가능성도 검토하고자 한다.

4.1 등속회전시 차량 동특성

후륜조향이 전체 조향성능에 따라 미치는 영향을 알아보기 위해 25.79m/s(92.84km/h)의 속도로 등속회전시 전륜 0.5° 후륜 0°, 전륜 0.5° 후륜 -0.5°, 전륜 0.5° 후륜 0.25°의 세가지 경우에 대하여 시뮬레이션이 수행되었다. 이때는 속도변화가 거의없어 직진속도(V_x)가 상수가 되므로 식 (9)는 대수 방정식이되고 식 (12)와 식

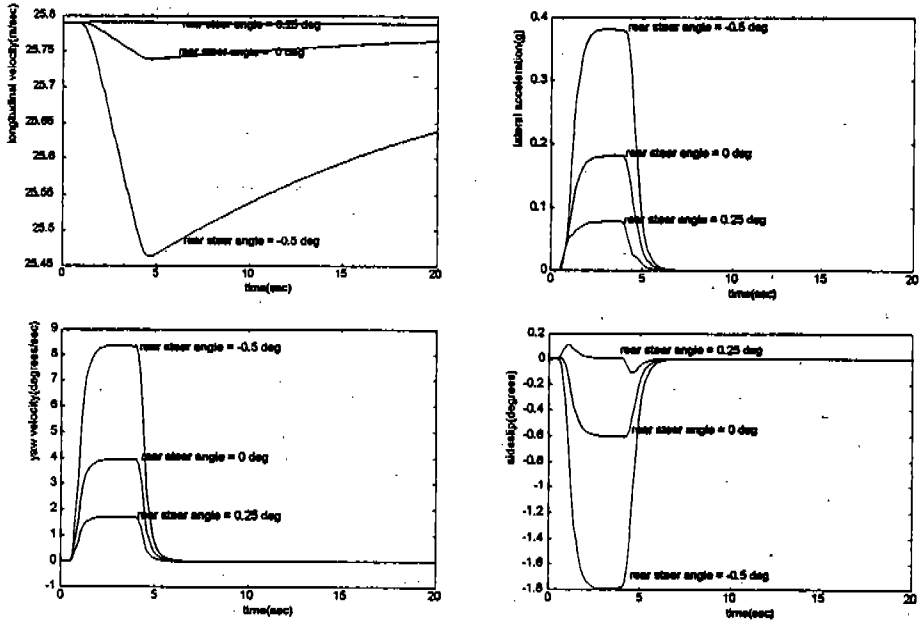


Fig.4 등속 회전의 경우(전륜 : 0.5deg, 후륜 : -0.5, 0, 0.25deg, 초기속도 : 25.79m/s)

(15)는 비연계된 2차 선형모델이 된다. Fig.4에서 보듯이 후륜조향각이 0° 인 경우(2WS)와 비교하면, 후륜조향각이 반대인 경우에는 진행속도는 약간 감소하나 횡가속도와 요우잉속도가 증가함을 볼 수 있으며 후륜조향각이 같은 방향인 경우에는 진행속도 그대로 유지하면서 횡미끄럼각이 거의 발생하지 않았다. 이때 차량의 조향궤적이 Fig.8(a)에 보이는데 4WD/4WS 차량의 고속주행시 후륜조향각을 전륜과 반대로 하는 경우 안정성이 허용하는 한 급격한 조향성능을 얻을 수 있고, 후륜조향각이 전륜과 같은 방향의 경우 안전성에 큰 상관없이 신속한 진행궤도 수정을 얻을 수 있다.

4.2 가속회전시 차량 동특성

여기서는 차량이 가속이 되면서 조향이 이루어지는 경우 그 동특성을 해석하고자 한다. 초기속도 10m/s에서 4WD 구동모터가 가속이 되는 경우이며 선정된 모터의 구동특성 곡선을 토대로 전륜은 0.5° 후륜은 각각 -0.5° , 0° , 0.5° 로 조향되는 경우에 대한 횡가속도, 요우잉속도 등을

검토하고 이에 따른 궤적을 조사하였다. Fig.5에서 보듯이 후륜조향각과 상관없이 진행속도는 거의 일정하고 요우잉속도의 경우 후륜조향각을 반대로 주었을 경우가 가장 빠른 응답성을 보인다. 이때의 진행속도가 아직은 작으므로 횡가속도는 $0.1g$ 정도에 불과하며 따라서 안정성에 문제없이 보다 큰 조향각을 소화할 수 있게 된다. 따라서 4WS차량에서 후륜조향각을 전륜과 반대로 하는 이 가속조향 특성은 특수 상황시 급가속에 따른 궤적예측(Fig.8(b) 참조) 및 차량안정성 측면에서 매우 중요하며 여러가지 환경조건 하에서 검토 되어야 한다. 여기서 또 한가지 특이한 것은 가속조향시 후륜조향각이 전륜조향각과 같은 방향인 경우 조향성능에 큰 이득이 없을 뿐만 아니라 양의 값을 갖는 횡미끄럼각이 발생하게 되어 운전자에게 불안감을 줄 수 있다.

4.3 감속회전시 차량 동특성

여기서는 차량이 감속을 하면서 조향이 이루어지는 경우 그 특성을 해석하고자 한다. 차량이 25.79m/s(92.84km/h)의 속도로 달리다가 모터

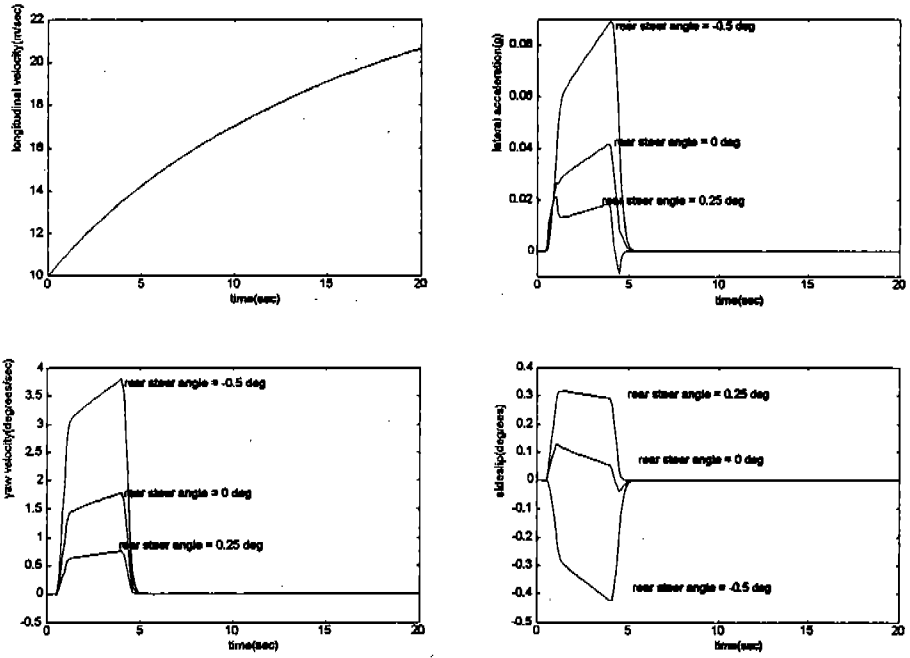


Fig.5 가속 회전의 경우(전륜 : 0.5deg, 후륜 : -0.5, 0, 0.25deg, 초기속도 : 10.0m/s)

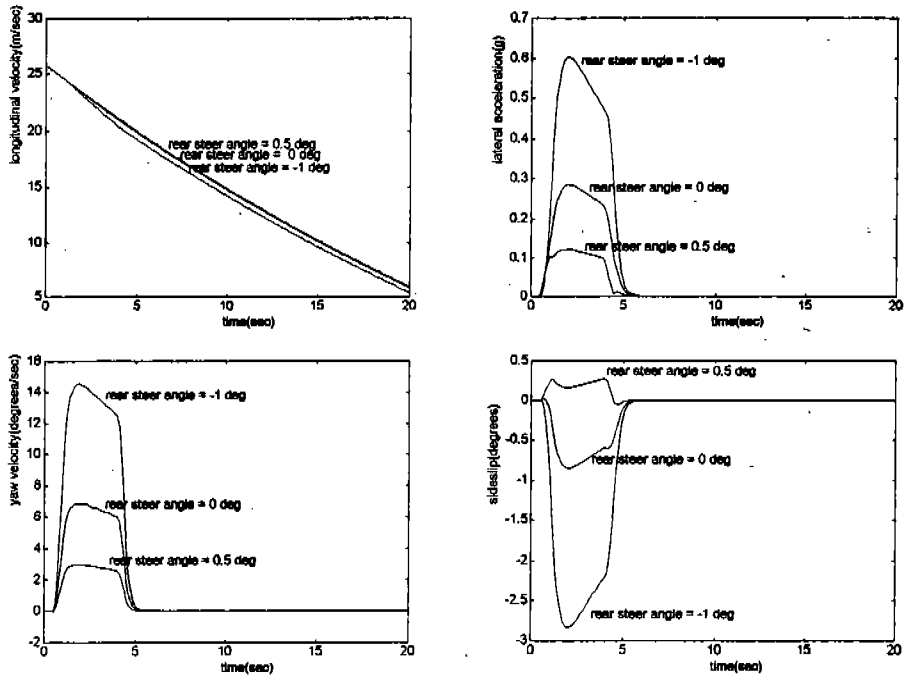


Fig.6 감속 회전의 경우(전륜 : 1deg, 후륜 : -1, 0, 0.5deg, 초기속도 : 25.79m/s)

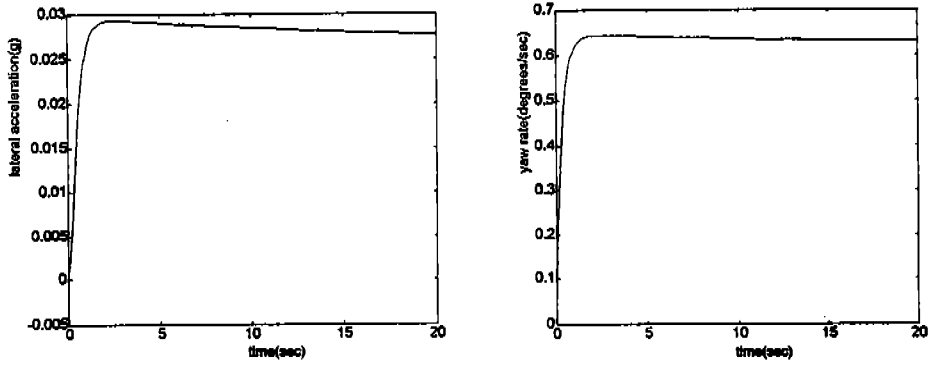
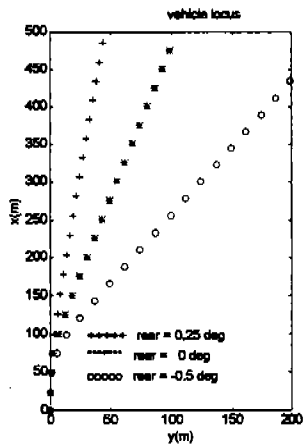
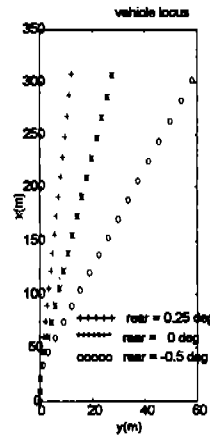


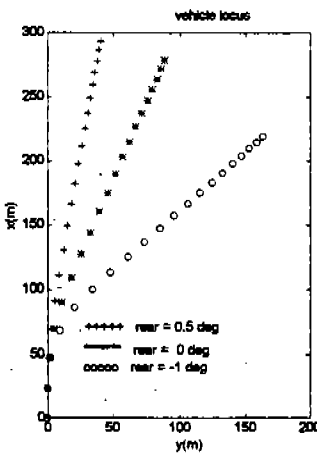
Fig.7 구동력 차이로 인한 차량의 조향특성(오른쪽 모터의 구동력이 왼쪽 모터의 70%인 경우)



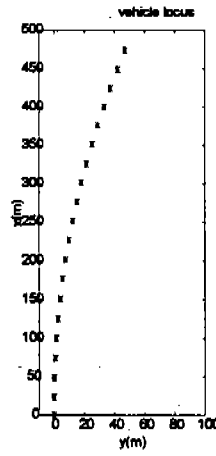
(a) 등속 회전시 차량의 궤적



(b) 가속 회전시 차량의 궤적



(c) 감속 회전시 차량의 궤적



(d) 구동력 차이로 인한 차량의 궤적

Fig.8 등속, 가속, 감속시, 구동력 차이로 인한 차량의 궤적

에서 발생하는 구동력의 공급을 끊고 각바퀴의 브레이크 시스템에 의한 제동력이 각각 1000N 식 가해진다고 가정하여 전륜을 1° 후륜을 각각 0° , -1° , 0.25° 의 세가지 경우로 조향하는 감속 회전 시뮬레이션 결과가 Fig.6에 보여 주고 있다. 주행속도는 세경우 모두 제동력이 가해진 후 20초만에 약 6m/s로 감소하였고 후륜조향각이 -1° 인 경우는 이보다 약간 더 감소하였음을 볼 수 있었다. 후륜조향각이 전륜조향각과 반대인 경우 급격한 회전은 할 수 있으나 횡방향 가속도가 롤오버(rollover)가 일어날 수 있을 정도로 크므로 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 앞의 가속조향시와 마찬가지로 감속조향 역시 특수 상황시 차량의 제도에측(Fig.8(c) 참조)에 매우 중요한 특성이며, 특히 신속하고 안정성있게 움직여야 되는 경우 감속에 따른 전륜, 후륜조향각의 적절한 조정이 뒷받침되어야 한다. 이는 본 논문의 범위를 넘으므로 차후 연과과제로 남겨둔다.

4.4 구동력 차이로 인한 조향

본 모델은 승용차뿐 아니라 특수차량으로도 적용 가능하므로 바퀴를 조향하는 대신 4WD차량의 좌우 구동력의 차이를 이용하여 차량을 조향하는 가능성을 검토하고자 한다. 초기속도 25.79m/s(92.84km/h)로 주행하는 차량에 조향각을 주지않고 좌, 우 구동모터에 다른 크기의 구동력을 주어서 그 조향성을 해석하였다. 우측모터의 구동력은 좌측모터 구동력의 70%만 발생된다고 가정하였고 그 시뮬레이션 결과가 Fig.7에 나와 있다. 횡가속도는 최대 0.029g의 값을 가지고, 요우잉속도는 0.011rad/sec(0.63deg/sec)의 정상상태값을 가지며 최대 횡미끄러짐각은 -0.14° 가 발생하였다. 이때 차량궤적은 Fig.8(d)에 주어져 있는 바와 같이 종방향으로 450m 주행하는 동안 횡방향으로 약 40m 이동 했음을 볼 수 있다. 이 결과는 4WS의 경우에 비해서 작은 횡가속도값으로 조향할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

4.5 구동력 차이와 조향각이 동시에 가해지는 경우

4.4절에서 고려된 구동력 차이(우측 구동력이 좌측 구동력의 70%만 발생)에 의한 조향성능에 4.1절에서와 같이 등속조향을 동시에 가했을 때의 조향성능을 검토하고자 한다. 전륜 0.5° , 후륜 0.25° 를 가하는 경우 횡가속도는 0.1g보다 약간 더 증가하였으나 요우잉속도는 2.5deg/sec로 증가하여 더 좋은 조향성능을 얻을 수 있음을 보였다.

5. 결 론

4WD/4WS 전기구동용 차량의 3자유도 비선형 모델을 유도하였고 그에 적합한 파라미터를 선정하였다. 구해진 모델을 해석하기 위하여 구동력, 제동력 및 전후조향각을 입력으로 하는 모듈화된 Simulation Tool을 개발하였고 여러조건 하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 예측한 대로 후륜을 반대방향으로 조향하는 경우 조종성을 증가 시킬수 있으나 횡가속도의 증가로 인한 안정성문제가 발생함을 알 수 있었고 후륜을 전륜과 같은 방향으로 조향하는 경우 그에 따른 조종성이 감소되나 안정성이 향상됨을 알 수 있었다. 감, 가속조향시 후륜조향각에 따라 횡가속도, 요우잉속도 및 궤적이 매우 민감하게 변하였는데, 이의 적절한 조정이 이루어지는 경우 특수차량의 급제도변경에 유용하게 적용될 수 있을 것이다. 그리고 좌우 구동력의 차이로 인한 조향 가능성도 검토하였다.

앞으로의 과제는 선형화된 타이어 모델을 설계 파라미터들이 고려된 보다 적합한 모델로 수정 보완 하여야 하며 현가운동을 고려하여 롤링, 피칭 및 히빙운동이 연관된 확장된 모델을 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램을 개발하는 것이다.

참 고 문 헌

1. N. Matsumoto and M. Tomizuka, "Vehicle Lateral Velocity and Yaw Rate Control with Two Independent Control Inputs",

- ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control, vol. 114, pp. 606~613, 1992.
2. H. Higasa, F. Ishikawa, H. Nasu and S. Hayashi, "Vehicle Motion Control of the Four Wheel-in Motor Drive Electric Vehicle", 자동차기술회, 921068, 1992.
 3. J. Marezke and B. Richter, "Directional Control of 4WD Passenger Cars—a Study by Computer Simulation", SAE Technical Paper Series, 861370, 1986.
 4. Y. Matsuo, A. Okada, S. Kasuga and S. Sekido, "Intelligent Four-Wheel-Drive System", SAE, 930670, 1993.
 5. S. Sano, Y. Furukawa and S. Shiraishi, "Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle", SAE Technical Paper Series, 860625, 1986.
 6. H. Mouri, J. Kuroke, F. Sugawara and M. Irie, "Handling and Stability Improvement Achieved with Four-Wheel Steering", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, October 24~25, C441/88, 1988.
 7. Y. Hirano, H. Harada, E. Ono and K. Takanami, "Development of an Integrated System of 4WS and 4WD by H ∞ Control", SAE, 930267, 1993.
 8. M. Nagai, "Active Four-Wheel-Steering System by Model Following Control", Proceedings of 11th IAVSD Symposium, Vehicle System Dynamics, Vol. 18, August 21~25, pp. 428~439, 1989.
 9. M. Abe, "Handling Characteristics of Four Wheel Active Steering Vehicles over Full Maneuvering Range of Lateral and Longitudinal Accelerations", Proceeding of 11th IAVSD Symposium, Vehicle System Dynamics, Vol. 18, August 21~25, pp. 1~14, 1989.
 10. Y. Watanabe, Y. Kusahara, N. Hataq, S. Hasegawa and S. Takahashi, "Effect of Rear-Axle Steering on Vehicle Controllability and Stability of a Medium-Duty Truck", SAE, 933007, 1993.
 11. D. Karnopp and D. Wuh, "Handling Enhancement of Ground Vehicles Using Feedback Steering Control", ASME, Advanced Automotive Technologies, vol. 13, December 10~15, pp. 99~106, 1989.
 12. A. G. Nalecz and A. C. Bindemann, "Investigation into the stability of four wheel steering vehicle", Int. J. of Vehicle Design, vol. 9, No. 2, pp. 159~178, 1988
 13. N. E. Sanchez, "Nonlinear dynamics and control of a four-wheel steering vehicle using symbolic-numerical approach", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 15, Nos. 1/2, pp. 81~98, 1994.
 14. Y. Furukawa and S. Sano, "Effects of Nonlinear Rear Steer Control on Steering Response During Higher Lateral Acceleration Cornering", Proceedings of 11th IAVSD Symposium, Vehicle System Dynamics, vol. 18, August 21~25, pp. 248~262, 1989.
 15. X. Xia and E. H. Law, "Response of Four-Wheel-Steering Vehicles to Combined Steering and Braking Inputs", ASME Advanced Automotive Technologies, vol. 13, December 10~15, pp. 107~127, 1989.
 16. L. D. Metz, "Dynamics of Four-Wheel-Steer Off-Highway Vehicles", SAE, 930765, 1993.
 17. K. Huh, T. E. Pilutti, A. G. Ulsoy, C. C. MacAdam, C. G. Lin and R. D. Ervin, "A Lane-Departure Warning and Control System", Univ. of Michigan Transportation Research Institute, IVHS Technical Report, 1993.

18. 송준규, 윤용산, “4륵조향과 룰제어를 이용한 차량의 룰합제어”, 한국자동차공학회, 추계학술대회, 943967, 1994.
19. 전진홍, 김종선, “작동기 동역학을 고려한 4륵조향 차량의 성능해석”, 한국자동차공학회, 추계학술대회, 943966, 1994.
20. 이영화, 김석일, 서명원, 김대영, 김동룡, “운전자-자동차모델을 이용한 4륵조향자동차의 주행특성해석”, 한국자동차공학회, 추계학술대회, 943964, 1994.