

## 전동 통합 샤프트를 이용한 2륜 독립구동 차량의 선회성능 향상에 관한 연구

박진현\* · 최정훈\* · 송현우\* · 황성호\*\*

\* 성균관대학교 기계공학부

### Study of Driving Stability Performance of 2-Wheeled Independently Driven Vehicle Using Electric Corner Module

Jinhyun Park\*, Jeonghun Choi\*, Hyeonwoo Song\* and Sung-Ho Hwang\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

(Received December 28, 2012 ; Revised May 4, 2013 ; Accepted May 14, 2013)

**Key Words:** In-wheel Motor(인휠모터), Electric Corner Module(전동통합샤프트모듈), Vehicle Dynamic Control System(차량자세제어시스템), Traction Control System(구동력제어시스템), Torque Vectoring(토크 벡터링)

**초록:** 독립 구동형 전동 통합 샤프트 시스템은 시스템 내구 성능 관련 신뢰성 확보, 구동 전동기 고장 시 차량 안정성 확보, 차륜 중량 증가에 따른 Ride & Handling 성능 저하 등의 문제로 실제 차량에 적용이 지연되고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제들 중 Ride & Handling 문제를 해결하기 위해 차량의 주행성능 평가가 가능한 시뮬레이터를 개발하였다. MATLAB/Simulink를 이용하여 독립구동형 전동 샤프트 시스템이 적용된 소형 전기 자동차를 모델링 하였으며, 27자유도의 차량 거동 해석이 가능한 CarSim을 이용하여 차량동역학을 모델링 하였다. 개발된 시뮬레이터를 활용하여 차량의 주행 안정성을 향상을 위한 알고리즘을 개발/검증함으로써 차량의 Ride & Handling 성능 저하 문제를 해결하고자 하였다.

**Abstract:** An independently driven electric corner module cannot be applied to an actual vehicle without some difficulty, because of vehicle safety problems in the case of malfunctions and degraded ride and handling performance owing to the increase in the unsprung mass. In this study, a simulator is developed to evaluate the vehicle driving performance in order to solve ride and handling problems. Component modeling of a small-sized electric vehicle with an independently driven electric corner module is performed using MATLAB/Simulink. The vehicle is modeled by using CarSim, which can be used to analyze the vehicle maneuvers with 27 DOFs. The control algorithm for the improvement of vehicle driving safety and ride and handling performance is validated by using the developed simulator.

- 기호설명 -

$i_\alpha$  : 배터리의 출력 전류 (I)  
 $E$  : 기전력 (V)  
 $R_i$  : 배터리의 내부 저항 ( $\Omega$ )  
 $P_{battery}$  : 배터리의 요구 동력 (W)  
 $\gamma_d$  : 요구 요레이트 (deg/s)

$V_x$  : 차량 속도 (m/s)  
 $L_f, L_r$  : 전,후륜 차축까지의 거리 (m)  
 $W_f, W_r$  : 전,후륜 차축에 걸리는 무게 (kg)  
 $C_{\alpha f}, C_{\alpha r}$  : 전,후륜 타이어 강성계수  
 $\delta_{avg}$  : 좌우 휠 조향각의 평균 (deg)

### 1. 서론

독립 구동형 전동 샤프트 시스템은 구동계 간소화에 의한 연비향상, 차륜별 독립구동에 의한 차량 주행성능 향상 및 동축 전동기, 감속기 및 디퍼렌셜 기어등의 삭제에 의한 공간 효율성 증대를 통한 차

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, hsh@me.skku.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

량 설계 자유도 및 승차 공간 확보가 가능하다는 장점이 있다. 또한 엔진에 비해 빠른 응답특성을 갖고 있는 모터를 각 차륜의 독립 구동원으로 사용하기 때문에 별도의 추가 장치 없이 ABS, TCS, VDC와 같은 기술 구현이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 이유로 세계유수의 자동차 및 부품 회사들은 독립구동형 전동 샴시 시스템의 원천기술 확보를 위해 다양한 연구를 수행하고 있으나, 시스템 내구 성능 관련 신뢰성 확보, 구동 전동기 고장 시 차량 안정성 확보, 차륜 중량 증가에 따른 Ride & Handling 성능 저하 등의 문제로 적용이 지연되고 있다.<sup>(1-5,9)</sup>

본 연구는 이러한 전동 샴시 시스템의 다양한 문제들 중 Ride & Handling 관점의 문제를 해결하기 위한 기반 기술을 확보하고자 한다. 문제 해결을 위해 먼저 차량의 주행성능 평가가 가능한 시뮬레이터를 개발하였다. MATLAB/Simulink를 이용하여 독립구동형 전동 샴시 시스템이 적용된 소형 전기 자동차를 모델링 하였으며, 27자유도의 차량 거동 해석이 가능한 CarSim을 이용하여 차량동역학을 모델링 하였다. 개발된 시뮬레이터는 다양한 조건에서 차량의 직진/선회/가속/제동시의 거동특성을 파악 할 수 있도록 도와줌으로써 독립구동형 전동 샴시 시스템의 Ride & Handling 성능 향상을 위한 기반 기술을 확보하고자 하였다.

## 2. 전동 샴시 시스템 시뮬레이터 개발

본 연구에서 목표로 하는 차량은 후륜기반의 전동부하 분산 시스템이 적용된 소형 전기자동차이다. 이러한 전동부하 분산 시스템이 적용된 차량의 경우 좌/우 차륜의 독립 구동이 가능해지기 때문에, 그에 따른 차량 안전성 확보기술은 우선적으로 해결해야할 과제라고 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전동 통합 샴시 시스템의 주행안전 제어로직 개발이 선행되어야 하는데, 대상 차량의 시스템이 완성되지 않은 시점에서 주행제어 알고리즘을 개발 및 검증하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 과제에서는 대상차량을 S/W환경에 모사하고, 차량의 거동특성을 분석할 수 있는 환경을 개발함으로써 이러한 문제 해결의 기반 기술을 확보하고자 한다.

### 2.1 배터리 모델링

배터리모델의 입·출력 신호는 Fig. 1에 나타나



Fig. 1 Battery I/O Signal

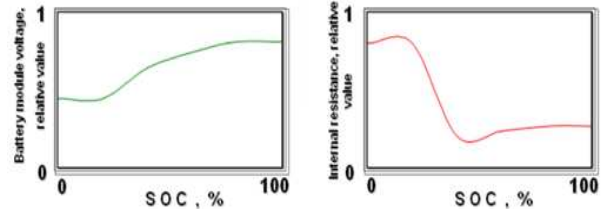


Fig. 2 Battery module voltage and internal resistance following SOC

있다. 배터리는 모터의 운전 상태에 따라 충·방전이 연속적으로 이루어지므로 배터리 SoC(State of Charge) 및 충전 특성을 고려해야 한다. 본 논문에서는 이러한 배터리의 특성을 반영한 내부저항 모델을 사용하여 배터리 입·출력 동력과 SoC를 계산하였다. 키르히호프 법칙(Kirchhoff's law)에 의한 충·방전시의 배터리 전압은 다음과 같다.<sup>(10)</sup>

$$U_a = E - i_a R_i \quad (\text{discharge}) \quad (1)$$

$$U_a = E + i_a R_i \quad (\text{charge}) \quad (2)$$

이렇게 구해진 배터리 전압과, 배터리 동력, 전류와의 관계식을 이용하여 충전과 방전시의 전류 특성을 식 (3),(4)와 같이 유도 하였다. 전류 특성 계산 시 이용되는 SoC에 따른 배터리 전압 및 내부저항 값은 OCV(Open Circuit Voltage)실험을 통해 Fig. 2와 같이 구하였다.

$$i_a = \frac{-E + \sqrt{E^2 - 4R_i P_{battery}}}{2R_i} \quad (\text{charge}) \quad (3)$$

$$i_a = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_i P_{battery}}}{2R_i} \quad (\text{discharge}) \quad (4)$$

### 2.2 모터 모델링

모터의 모델은 Fig. 3과 같이 속도, 배터리 출력, 요구 운전출력, 요구 회생제동 토크를 통하여 모터의 각속도와 토크를 출력할 수 있다. 모터의 최대 출력 토크는 모터의 각속도에 의해서 결정된다.<sup>(10)</sup>

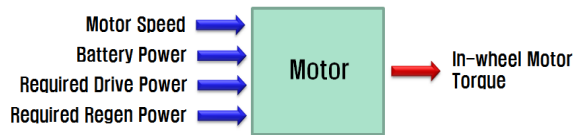


Fig. 3 Motor I/O Signal

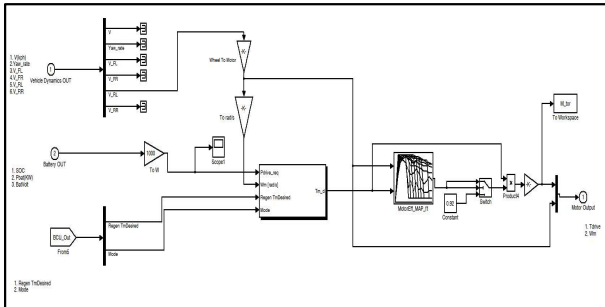


Fig. 4 Motor Modeling using MATLAB/Simulink

본 논문에서는 모터의 각속도에 따른 출력토크와 그에 따른 모터 효율 특성을 이용하여 단순 모델링을 하였으며, 모델링에 이용된 데이터는 대상 모터의 다이내모 실험을 통해 얻어진 결과이다. 최종적으로 모터 모델을 MATLAB/Simulink를 활용하여 Fig. 4와 같이 구성 하였다.

### 2.3 차량 모델링

차량의 주행 안전성 평가를 위해서는 다자유도의 차량동역학 해석 시뮬레이터를 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 다자유도의 차량동역학 해석을 위해 앞서 설명한 MATLAB/Simulink기반의 시뮬레이터와 상용의 차량 동역학 해석프로그램인 CarSim의 Co-Simulation 환경을 구축함으로써 이러한 문제를 해결하고자 하였다. Fig.5는 MATLAB/Simulink와 CarSim의 Co-Simulation 환경을 보여준다. MATLAB/Simulink에서 계산된 모터의 토크가 차량의 좌/우 후륜으로 각각 입력된다. 또한 4개의 차륜의 EMB 제동력이 카심으로 입력된다. CarSim에서는 전달받은 신호를 이용하여 차량의 속도와 각차륜의 속도 및 차량의 거동 특성을 계산하고, 계산된 차량의 속도와 차량의 요레이트 좌/우 후륜의 속도를 MATLAB/Simulink로 입력해주게 된다. 이와 같이 페루프 시뮬레이션 환경을 구축함으로써 추후 개발 될 전동통합 샤시 시스템의 주행안전 제어 로직평가를 위한 환경을 구축하였다.

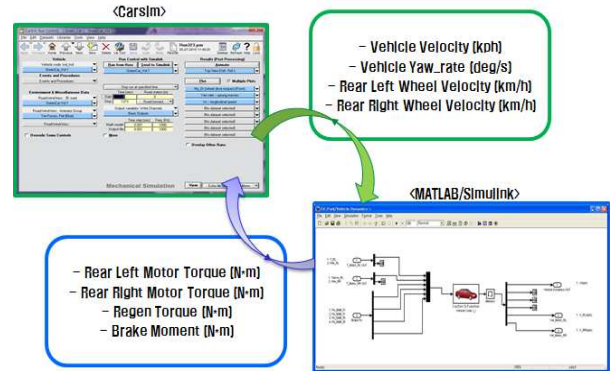


Fig. 5 CarSim-Simulink Co-Sim Environment

## 3. 전동 샤시 시스템 선회 제어 알고리즘

독립구동형 전동 샤시 시스템이 각 차륜의 독립 구동 및 독립 제동이 가능해지기 때문에, 다양한 상황에서 차량을 안정적으로 제어할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 차량 선회시나 비대칭 노면주행등과 같은 상황에서는 차량의 주행 안전성 확보를 위해 구동륜의 토크제어가 효율적으로 이루어져야 한다는 문제가 있다. 이러한 문제 해결을 위해 토크 벡터링 기법을 활용하고자 하였다.

### 3.1 토크 벡터링을 이용한 주행 제어 컨셉

토크 벡터링기법은 좌.우륜의 구동 토크 차이를 만들어서, 요모멘트를 발생시킴으로써 차량의 선회력을 향상시키는 기법이다. 기존의 내연기관 차량들의 경우 엔진에서 출력된 구동력을 좌.우에 다르게 전달하기 복잡한 형태의 디퍼렌셜 기어를 사용해야만 했다. 하지만 본 연구에서 목표로하는 차량의 경우 좌.우륜의 독립 구동이 가능하기 때문에 이러한 기구적인 문제를 쉽게 해결 가능하다는 장점이 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 토크 벡터링의 개념을 보여준다. 좌우 구동 토크를 동일하게 발생시키는 경우 선회에 의한 하중이동으로 인해 외측륜에는 횡력이 크게 발생하지만, 내측륜의 경우 횡력이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 하지만 내측륜의 구동 토크를 줄이고 외측륜의 구동 토크를 늘인 경우 외측륜의 횡력은 감소하게되지만, 내측륜의 경우 마찰원 범위보다 작은 구동력으로 인해 횡력을 발생 시키게 된다. 따라서 전체적인 횡력이 토크 분배를 하지 않은 경우보다 증가하게 됨을 확인할 수 있다.<sup>(4,6,8)</sup>

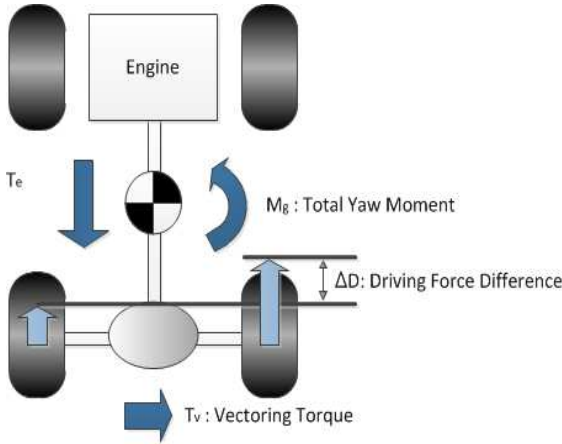


Fig. 6 Definition of right-left torque vectoring

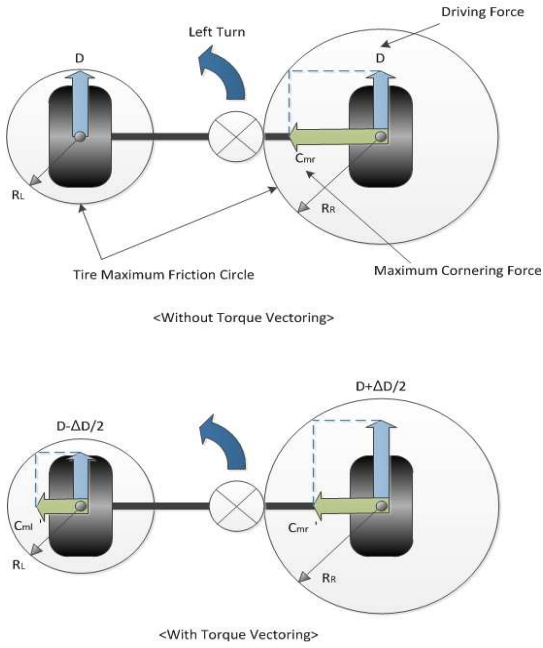


Fig. 7 Effect of Torque Vectoring

이때 차량에 요구되는 좌우 구동토크차이는 차량의 요모멘트를 통해 구해지며, 차량에 요구되는 요모멘트는 다음과 같은 식을 통해 구할 수 있다.

$$M_d = K_p(\gamma_d - \gamma) + K_i(\gamma_d - \gamma) + K_d(\dot{\gamma}_d - \dot{\gamma}) \quad (5)$$

이러한 토크 벡터링 기법을 실제 알고리즘으로 개발하기에 앞서 플로우차트 형태로 다양한 상황에 대한 대응 방안을 Fig. 8, Fig. 9와 같이 정립하였다. 제안된 플로우차트는 운전자의 엑셀레이터 페달 입력 값과 브레이크 페달 입력 값, 스티

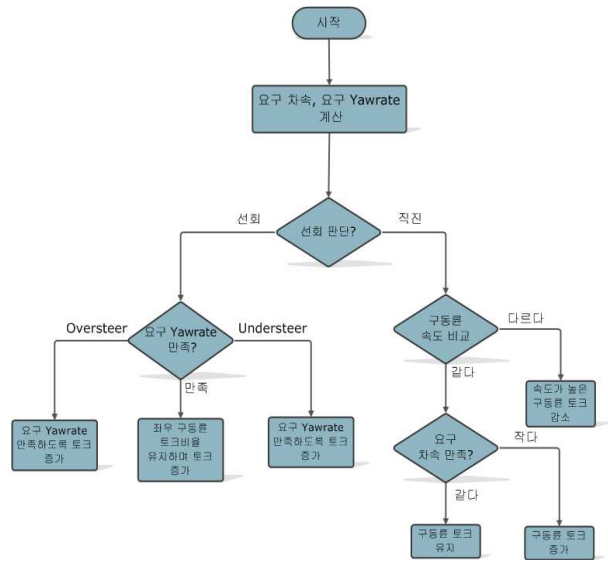


Fig. 8 Flowchart of Vehicle Control Algorithm Using Torque Vectoring(Accelerate)

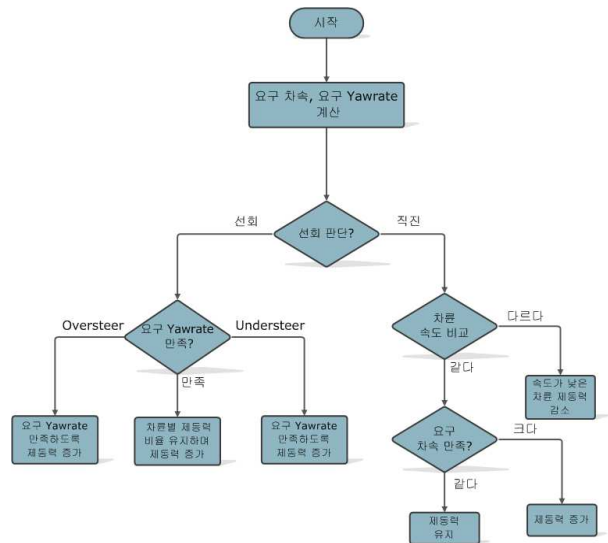


Fig. 9 Flowchart of Vehicle Control Algorithm Using Torque Vectoring(Fixed speed & Decelerate)

어링 입력값을 이용해 차량의 가속/제동/선회를 판단하며, 그에 따라 각 구동륜의 토크를 증가 혹은 감소시키도록 구성되어있다. Fig. 8은 목표 선회율을 추종 못할 경우 모터의 구동토크를 증가시켜서 선회율을 추종하도록 하는 가속시의 토크 벡터링 알고리즘, Fig. 9는 목표 선회율을 추종 못할 경우 모터의 회생제동 토크를 증가시키거나 제동력을 제어하여 목표 선회율을 추종하도록 하는 감속 및 정속 주행시의 토크 벡터링 알

고리즘의 플로우차트를 보여준다.

3.2 요구 선회량 계산 알고리즘

차량의 선회 시 독립구동형 전동 사시 시스템의 자세 제어를 위해서는 운전자의 의도에 따른 요구 선회량과 실제 차량의 선회량 비교가 필요하다.

요구 선회량 계산은 Bicycle 모델로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\gamma_d = \frac{V_x}{(L_f + L_r) + \left( \frac{W_f}{C_{af}} - \frac{W_r}{C_{ar}} \right) \frac{V_x^2}{g}} \delta_{avg} \quad (4)$$

여기서,  $\gamma_d$ 는 요구되는 요 레이트,  $V_x$ 는 차속,  $L_f, L_r$ 은 무게중심에서 전후륜 차축까지의 거리,  $W_f, W_r$ 은 전후륜 차축에 걸리는 무게,  $C_{af}, C_{ar}$ 은 전후륜 타이어 강성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\delta_{avg}$ 는 좌우 휠 조향각의 평균을 나타낸다.

요구 선회량 계산값의 유효성 검증을 위하여, 계산된 요구선회량 값(deg/s)과 실제 CarSim의 선회량 값(deg/s)을 비교하는 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 선회반경 150m를 저속으로 등속 운동하도록 설정 하였다. 이러한 주행상황에서는 차량의 미끄러짐이 작기 때문에 요구 선회량 값이 시뮬레이션을 통해 얻은 결과값을 추종할 경우 요구 선회량 계산 값의 유효성을 확보 할 수 있을 것으로 판단하였다. Fig. 10의 그래프의 실선으로 나타난 부분은 실제 Carsim을 통해 측정된 차량의 선회량을 보여주고, 점선으로 나타난 부분은 계산된 요구 선회량을 보여준다.

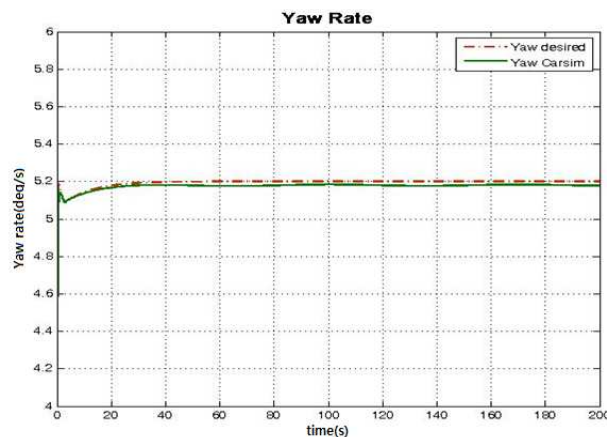


Fig. 10 Result of Desired Yaw-rate Calculate Algorithm

계산된 선회량 및 측정된 선회량이 5.2(deg/s)정도로 수렴함을 볼 수 있음을 확인할 수 있는데, 이는 일정한 선회반경을 등속 운동함에 따라 선회량이 일정한 값으로 수렴하는 결과 이다.

3.3 토크 벡터링을 이용한 주행 제어 알고리즘

지금까지 제안된 컨트롤 알고리즘의 유효성 검증을 위하여, 2장에서 개발된 전동통합사시 시뮬레이터를 활용하여 성능 검증 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이터에 탑재하기에 앞서 개발된 알고리즘을 Fig. 11과 같이 Block diagram으로 표현하였으며, Fig. 12은 MATLAB/Simulink를 이용하여 구성한 제어 알고리즘의 일부를 보여준다.

알고리즘의 성능 평가를 위하여 컨트롤 알고리즘이 탑재된 차량과 탑재되지 않은 차량의 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 13와 Fig. 14 에 나타나 있다. Fig. 13의 그래프는 동일한 속도조건에서 1rad/s의 Sine 곡선 형태의 스티어링 입력을 주었을 때 차량의 Yaw rate 응답 특성을 확인 한 결과이다. 결과를 보면 알 수 있듯이 토크 벡터링이 적용되지 않은 차량의 경우 속도가 빨라짐에 따라 차량이 오버스티어 현상을 보임을 확인할 수 있다. 하지만 토크 벡터링이 적용된 차량의 경우 오버스티어 현상이 많이 감소함을 확인할 수 있었다.

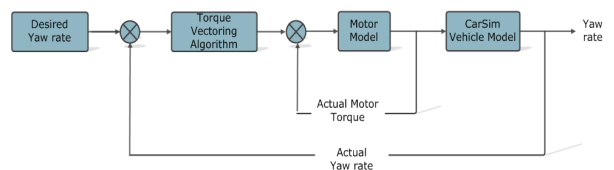


Fig. 11 Block diagram of Vehicle Control Algorithm Using Torque Vectoring

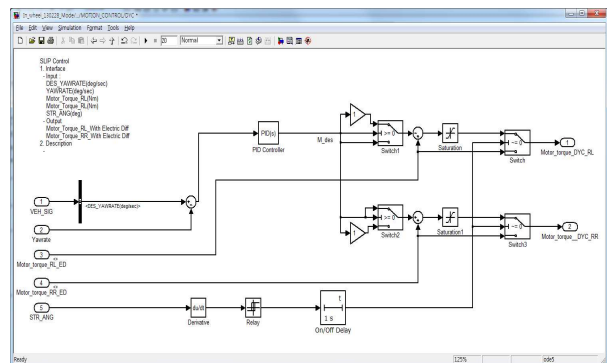


Fig. 12 Torque Vectoring Control Algorithm Using MATLAB/Simulink



Fig. 14의 그래프는 차량의 주행 안정성 성능 평가를 위해 동일한 차량속도 조건(150km/h) Double lane change 주행을 하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 그래프의 실선으로 나타난 그래프가 차량의 요구 경로이고, ★로 표시된 그래프가 토크 벡터링을 적용하지 않은 차량의 주행 경로, X로 표시된 그래프가 토크 벡터링이 적용된 차량의 주행 경로이다. 그래프를 보면 알 수 있듯이 토크 벡터링이 적용된 차량의 주행 결과가 차량의 요구 주행 경로에서 이탈이 적음을 확인할 수 있다.

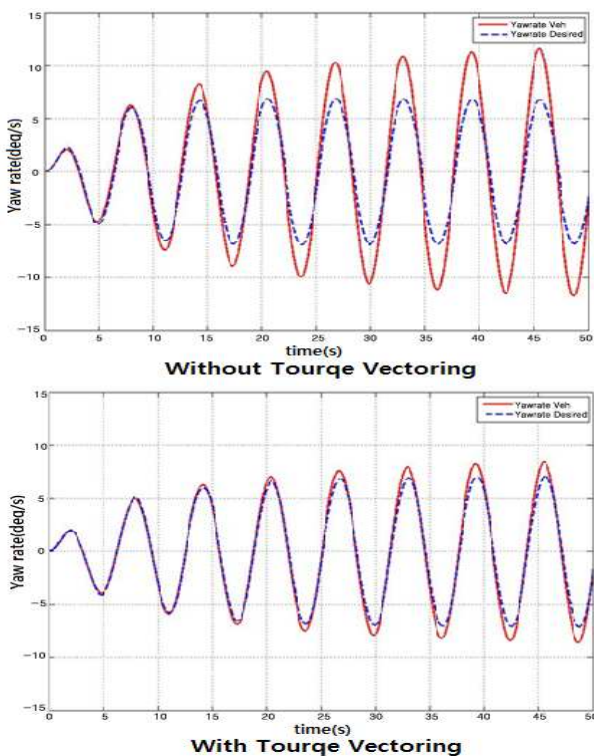


Fig. 13 Result of Torque Vectoring Simulation(Sine Wave Steering Input)

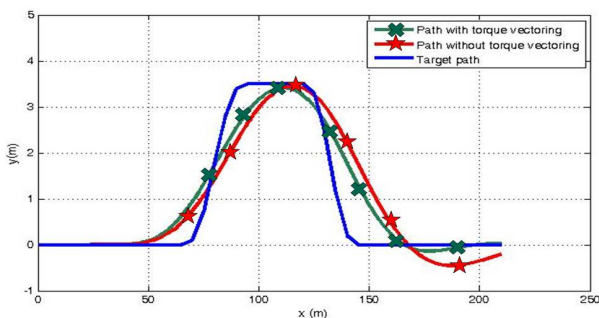


Fig. 14 Result of Torque Vectoring Simulation(Double Lane Change)

#### 4. 결 론

(1) 독립구동형 전동 사시 시스템이 적용된 소형 전기자동차의 주행 안전성 성능평가 환경 구축을 위하여 시뮬레이터를 개발하였다. 차량의 구동 성능평가를 위해 MATLAB/Simulink를 이용하여, 차량의 구동계를 모델링하였다. 또한 차량의 거동특성 파악을 위하여 CarSim을 이용하여 대상차량을 모델링하였다. 이렇게 각각 구성된 성능 평가 환경을 이용해 Co-Simulation을 수행함으로써 차량의 주행 안전성 성능 평가 기반 기술을 확보하고자 하였다.

(2) 독립구동형 전동사시 시스템이 적용된 차량의 주행안정성 성능 향상을 위하여 토크 벡터링 기법을 도입하고자 하였으며, 이를 위하여 플로우차트를 작성하였다. 또한 토크 벡터링을 기법의 활용을 위해 기본적으로 요구되는 차량의 요구 선회량 계산 알고리즘을 제안함으로써 주행 안전성 성능 향상을 위한 기반 기술을 확보하고자 하였다. 또한 제안된 요구 선회량 계산 알고리즘을 활용하여 토크 벡터링 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 알고리즘의 검증을 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행결과 토크 벡터링이 적용된 차량의 주행안정성이 크게 향상됨을 확인할 수 있었으며, 이러한 토크 벡터링 알고리즘은 추후 독립 구동형 전동 사시시스템의 주행 안전성 확보에 도움이 될 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부의 “지식경제 기술혁신 사업”의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(과제번호:10040220)

#### 참고문헌

- (1) Lee, J., Suh, S., Whon, W., Kim, C. and Han, C., 2011, "System Modeling and Simulation for an In-wheel Drive Type 6×6 Vehicle," *Transactions of KSAE*, Vol. 19, No. 2, pp.1~11.
- (2) Ko, S., Ko, J., Kim, J., Lee, S., Cheon, J. and Kim, H., 2011, "Development of Road Friction Estimation and TCS Control Algorithm for In-wheel Independent Drive Vehicle," *KSAE*

- Annual Conference*, pp. 918~923.
- (3) Hori, Y., 2004, "Future Vehicle Driven by Electricity and Control-Research on Four-Wheel-Motored 'UOT Electric march II'," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 51, No. 5, pp. 954~962.
- (4) Kim, B., Noh, K., Kim, H. and Park, K., 2009, "A Study on Torque Distribution Algorithm for a 4WD Vehicle," *KSAE Annual Conference*, pp. 1182~1186.
- (5) Kim, J., Park, C., Hwang, S., Hori, Y. and Kim, H., 2010, "Control Algorithm for an Independent Motor-Drive Vehicle," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, Vol. 59, No. 7, pp. 3213~3222.
- (6) Gillespie, T. D., 2002, *Fundamentals of vehicle dynamics*, JINSAEM, seoul, pp. 177~ 214.
- (7) Xu, P., Hou, Z., Guo, G., Xu, G., Cao, B. and Liu, Z., 2011, "Driving and Control of Torque for Direct-Wheel-Driven Electric Vehicle with Motors in Serial," *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 80~86.
- (8) Wang, J., Wang, Q., Jin, L. and Song, C., 2011, "Independent Wheel Torque Control of 4WD Electric Vehicle for Differential Drive Assisted Steering," *Mechatronics*, Vol. 21, pp. 63 ~ 76.
- (9) Kim, W., Yi, K. and Lee, J., 2011, "Drive Control Algorithm for an Independent 8 In-Wheel Motor Drive Vehicle," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 6, pp. 1573~1581.
- (10) Yang, D., Park, J. and Hwang, S., 2010, "Development of Regenerative Braking Control Algorithm for In-wheel Motor Type Fuel Cell Electric Vehicles Considering Vehicle Stability," *Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society*, Vol. 7, No. 2, pp. 7~12.