Transactions of KSAE, Vol. 24, No. 4, pp.439-446 (2016)

Copyright © 2016 KSAE / 143-09
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.4.439

후륜 구동 인휠 전기 자동차의 구동 및 현가 통합제어시스템

김 현 동 · 최 규 재*

군산대학교 기계자동차공학부

Integrated Chassis Control System of a Rear In-wheel Motor Vehicle

Hyundong Kim • Gyoojae Choi*

School of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 54150, Korea
(Received 13 January 2016 / Revised 30 April 2016 / Accepted 8 May 2016)

Abstract : An in-wheel motor vehicle is a type of car that is equipped with an electric motor for each wheel. It is possible to acquire vehicle stability through a seperate driving torque control per wheel, since it directly generates the driving torque via the wheel motors. However, the vehicle ride comfort and road holding performance worsen depending on the increase of the wheel weights. In order to compensate for the impaired performance, an integrated chassis control system of the rear in-wheel motor vehicle is proposed. The proposed integrated chassis control system is composed of a driving torque control system, a semi-active suspension system, and an ESC system. According to the vehicle dynamic simulation of an in-wheel motor vehicle equipped with the integrated chassis control system, it is found that the system can improve the driving stability, ride comfort, and driving efficiency of the in-wheel motor vehicle.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), In-wheel motor(인휠 모터), Driving torque control(구동 제어), Semi-active suspension system(반능동 현가시스템), Integrated chassis control(통합 섀시 제어)

1. 서 론

세계적인 배출가스 규제와 환경 보호정책에 따라 전기 동력 차량에 대한 정부 지원 및 공급 정책이 시행되고 있으며 리튬 이온 배터리의 기술 진보, 고효율 전기모터 개발 및 충전 인프라 확대 등으로 선진 자동차 업체는 전기 동력 차량 개발에 많은 역량을 기울이고 있다.[1] 이에 따라 차세대 전기 자동차 핵심 기술 중 하나인 인휠(in-wheel) 시스템이 주목 받고 있다. 인휠 시스템은 바퀴(wheel) 안에 구동 및 제동 장치를 일체화한 것으로 별도의 동력전달장치 없이 모터가 직접 바퀴를 구동시키므로 차량의 무게가 가벼워져 연비를 개선할 수 있고 각 휠에 독립적인 토크를 분배할 수 있기 때문에 차량의 선회 시 추가적인 장치 없이 차량의 안정성을 구현할 수 있다.[2] 하지만 바퀴가 포함된 스프링 아래 질량(unsprung mass)의 증가에 따라 승차감 및 조종안정성이 저하되는 문제점이 있어 개별 섀시시스템을 상호보완적으로 결합함으로써 성능을 극대화할 수 있는 통합제어 시스템의 개발이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 개별 섀시 제어시스템들을 효과적으로 결합, 운용하여 전체적인 차량의 동특성을 향상시킬 수 있는 섀시통합제어시스템 개발을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 후륜 구동 방식의 인휠 전기 자동차의 구동 로직과 반능동 현가시스템 로직을 CarSim과 MATLAB/Simulink의 통합 시뮬레이션(co-simulation) 환경으로 구성하고 통합제어를 통한 전체적인 성능 향상도를 분석하였다.

*A part of this paper was presented at the KSAE 2015 Annual Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: gjchoi@kunsan.ac.kr

2. 차량동역학 모델 생성 및 검증

통합 제어시스템 구현을 위해 CarSim 차량모델을 구성하고 인휠 모터를 장착한 시험 차량에서 측정한 주행시험 데이터와 비교 검증하였다.

2.1 차량 모델링

본 연구에서 사용한 차량은 국내 생산 소형 가솔린 차량을 개조하여 후륜에 인휠 모터를 장착한 모델로 기본 재원은 Table 1과 같다.

이 개조차량을 현가 시스템 파라미터 측정 장치(SPMD)를 사용하여 차량 데이터를 측정하고 CarSim 차량 모델을 구성하였다.

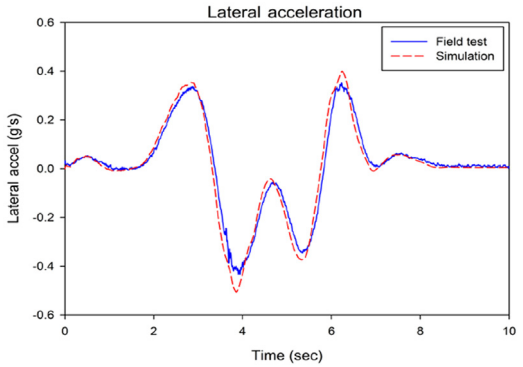
Table 1 Vehicle specification

Description	Specifications
Vehicle height	1,700 mm
Vehicle width	1,595 mm
Sprung mass	1,231.10 kg
Unsprung mass	232.5 kg
Roll inertia	505.9 kg·m^2
Pitch inertia	2,011.8 kg·m^2
Yaw inertia	2,064.5 kg·m^2
In wheel motor power	15 kW

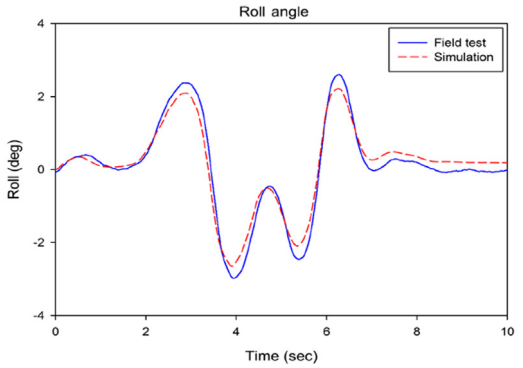
2.2 차량 모델 검증

CarSim 차량 모델의 정확도를 검증하기 위하여 인휠 모터가 장착된 시험 차량을 주행시험장에서 KS R ISO 3888-1[3] 이중차선변경시험을 수행하였다. CarSim 모델과 실제 차량 측정값을 비교하기 위하여 측정된 조향각을 CarSim의 조향 조건으로 입력하였다. 일반적으로 차량의 주행 특성 분석 시 사용하는 항목인 횡 가속도, 요 각속도, 롤 각을 CarSim 해석 값과 실차 측정값을 비교하였으며 Fig. 1에 도시하였다.

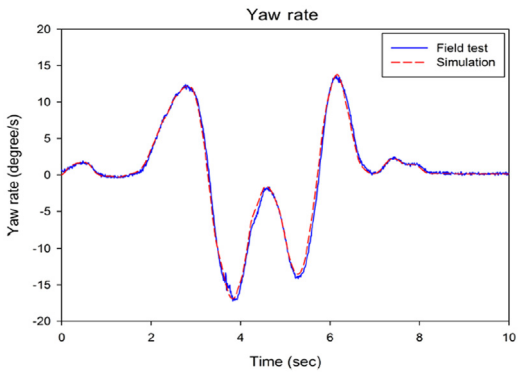
위상오차(phase error) 계산법과 크기 오차(magnitude error)계산법을 사용하여 CarSim 해석 값과 실차 측정값을 비교하였으며 Table 2에 기술하였다. 표에서 보는 바와 같이 최대 14.9 %의 오차가 발생하였으며 차량모델의 정확도는 약 85 %로 나타났다.[4]



(a) Lateral acceleration



(b) Roll angle



(c) Yaw rate

Fig. 1 Comparisons between field test and simulation results[3]

Table 2 Simulation error (Double lane change test)

	Max. Phase error (%)	Max. Magnitude error (%)
Lateral acceleration	3.1	10.7
Yaw rate	1.3	1.4
Roll angle	4.8	14.9

3. 구동 및 반능동 현가시스템 제어 알고리즘

3.1 후륜 인휠 모터 구동 알고리즘

인휠 모터 구동 알고리즘은 참고문헌[5]에서 제시하고 있는 모델을 사용하였다. 이와 같은 독립구동 방식의 장점은 선회 시 좌·우 구동 토크 분배를 통하여 부가적으로 요구되는 요 모멘트를 생성하여 선회 반경을 줄이거나 선회 안정성을 향상시킬 수 있다. 대표적인 방법으로 토크 벡터링(torque vectoring) 기법을 들 수 있으며 Fig. 2에는 토크 벡터링 기법의 개념도를 나타낸 것이다.

본 논문에서는 요 모멘트 제어기를 기반으로 토크 벡터링 시스템을 구현하였다. 차량 모델로부터 조향각과 종방향 속도를 입력신호로 사용하여 기준 요 각가속도와 실제 요 각속도를 계산하게 된다. 다음 단계에서는 기준 모델로부터 계산된 요 각속도와 실제 차량의 요 각속도를 비교하여 현재 차량의 상태, 즉, 과도/과소 조향(OS/US) 정도를 식 (1)과 같이 판단하여 구동토크를 제어한다.[6]

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{desired} > \dot{\psi}_{real} & US \\ \dot{\psi}_{desired} < \dot{\psi}_{real} & OS \end{cases} \tag{1}$$

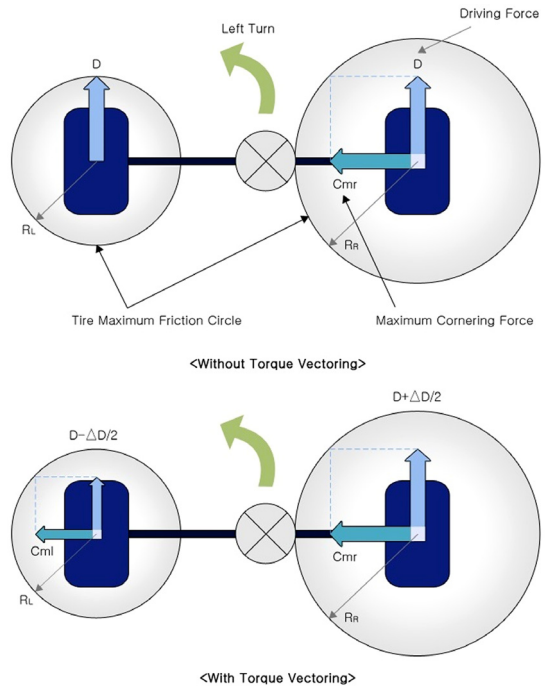


Fig. 2 Effect of torque vectoring

여기에서, $\dot{\psi}_{desired}$ 는 원하는 요 각속도, $\dot{\psi}_{real}$는 실제 차량의 요 각속도를 의미한다.

3.2 반능동 현가시스템 제어 알고리즘

3.2.1 스카이 훅 제어(Sky-hook control)

반능동 현가 시스템 제어에 많이 사용하는 스카이 훅 이론은 스프링 상부 질량(sprung mass)의 진동을 제어하기 위해 가상의 댐퍼가 추가로 달려있다고 가정하고 스프링 상부 질량의 속도에 비례하는 가상 댐퍼의 힘을 추가로 발생시켜 진동을 제어한다(Fig. 3).

스카이 훅 제어 시 추가적으로 차체 상부에 댐퍼가 장착되어 있다고 가정하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$F_{total} = C_p(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + F_d \tag{2}$$

여기에서 F_{total} 은 전체 감쇠력, C_p는 실제 댐퍼의 감쇠계수, $\dot{x}_s$, $\dot{x}_u$는 댐퍼의 상부속도와 하부속도, F_d 는 가상 댐퍼 작용력을 나타내며 스카이 훅 제어가 발생되기 위해서는 식 (3)을 만족하여야 한다.

$$F_d = \begin{cases} C_{sky}\dot{x}_s\,, & \text{for} \quad \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) > 0 \\ 0\,, & \text{for} \quad \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) < 0 \end{cases} \tag{3}$$

여기에서 C_{sky}는 가상 댐퍼의 감쇠계수를 의미한다.

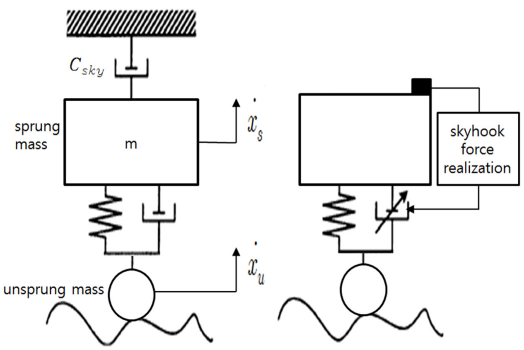


Fig. 3 Skyhook control concept

3.2.2 스카이 훅 감쇠 계수 선정

스카이 훅 제어기를 반능동 댐퍼에 적용하는 경우 제어 감쇠계수는 사용자가 임의로 선정할 수 있

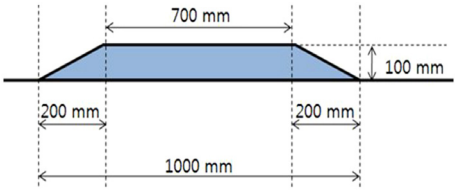
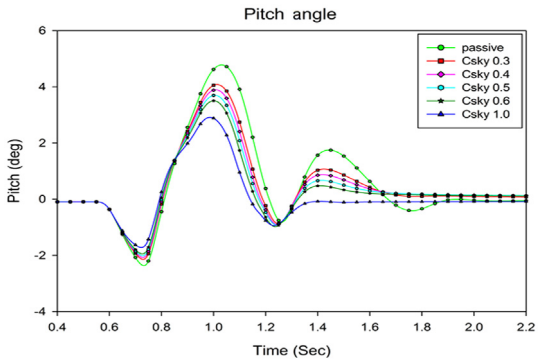
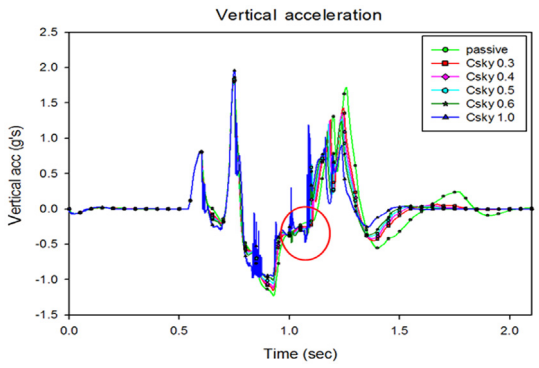


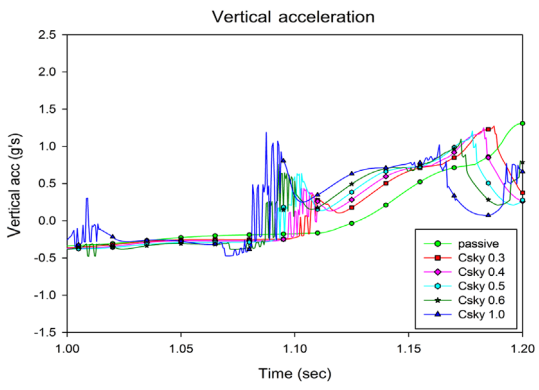
Fig. 4 Bump shape



(a) Pitch angle



(b) Vertical acceleration



(c) Zoom in Vertical acceleration

Fig. 5 Bump simulation results according to C_{sky}

Table 3 Simulation results according to C_{sky}

C_{sky}	Pitch angle (deg)	Vertical acceleration (g)
0 %	1.04	0.31
30 %	0.86	0.28
40 %	0.81	0.27
50 %	0.77	0.26
60 %	0.71	0.26
100 %	0.59	0.24

는 값으로 선정방법에는 여러가지 기법이 존재하지만 본 연구에서는 가변 댐퍼 설계 시 기존 댐퍼의 설계 범위 내에서 값이 변화하기 때문에 수동 댐퍼의 비율로 제어 감쇠계수 값을 선정하였다. 감쇠계수 선정을 위해 10 cm 범프(Fig. 4) 통과 시뮬레이션을 수행하여 Fig. 5와 Table 3과 같이 피치 각과 수직 가속도의 RMS 결과 값을 도시하였다.

제어 감쇠계수의 비율이 높을수록 피치 각과 수직 가속도의 RMS 값이 감소하는 것을 확인할 수 있지만 감쇠계수가 높을수록 수직 가속도에 고주파 진동이 발생하기 때문에 비교적 응답 효과가 큰 50 % 의 비율을 최적의 감쇠계수로 선정하여 시뮬레이션을 진행하였다.[7)]

3.2.3 차량 자세 제어(Attitude control)

차량 주행 시 스카이 훅 감쇠력을 이용하여 현가시스템을 제어할 경우 차체의 수직 방향 운동은 줄어들어 우수한 승차감을 보이지만 급제동 또는 코너링 시 차체의 하중 이동량이 커져 자세안정성이 떨어지는 단점을 갖게 된다. 따라서 별도의 제어기를 통해 승차감과 자세안정성의 상반되는 두 가지 특성을 모두 향상시킬 필요성이 있다.[8)]

Fig. 6과 같이 차량이 선회 운동을 하면 차량 무게중심에서는 선회 외측 방향의 원심력이 발생하고 이 원심력으로 인하여 롤 모멘트가 생성되며 롤 각이 만들어진다. 롤 운동 발생에 의해 차체 중심이 이동하여 좌·우륜의 수직하중 변화를 가져오게 되고 발생하는 수직하중의 차이는 타이어의 횡력 차이를 발생시킨다. 결국 전후륜의 횡력 차이는 차량에 요 모멘트를 발생시키며 차량의 고유 조향 특성에 영향을 미치게 된다. Fig. 6에서 ϕ는 롤 각, c_ϕ 와 k_ϕ는 각각 댐핑 계수, 스프링 강성계수를 나타내며, M_s는 스프링 상부 질량, a_y는 횡가속도, h는 지면에서 차

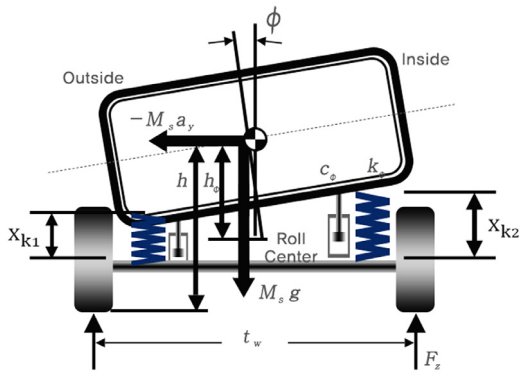


Fig. 6 Vehicle body motion of a vehicle in cornering[8)]

체 무게 중심까지의 거리, h_ϕ는 롤 중심과 차체 무게 중심까지의 거리, t_w는 윤거, x_{k1}, x_{k2}는 좌우 스프링 길이를 각각 의미한다.

일반적으로 댐퍼(shock absorber)의 감쇠력이 커지면 롤 변화율이 작아지며 조향 시 전복의 위험이 줄어들게 된다. 따라서 반능동 댐퍼의 감쇠력을 조절하여 선회 시 안정성을 향상시킬 수 있다.

따라서 좌우륜 하중 이동에 따라 반능동 댐퍼 특성을 다르게 적용하여 전후륜 횡력의 차이를 발생시킨다. 이를 이용하여 차량 선회 시 보상 요 모멘트를 발생시켜 차량의 조향 특성을 변화시킬 수 있으며 적절한 하중 배분을 유지할 수 있다.

4. 구동 및 반능동 현가시스템 통합제어

4.1 통합제어 알고리즘

본 연구에서는 개별 시스템들을 효과적으로 결합하여 차량의 전체적인 동적특성의 향상을 위해 상위 제어기(supervisory controller)인 주제어기(main controller)를 설계하여 개별 시스템이 독립적으로 운용됨에 따라 발생할 수 있는 성능 저하를 막고 최적의 성능을 구현하여 차량의 자세안정성 및 승차감 향상을 목표로 하였다.

통합제어 시스템의 구조는 Fig. 7과 같으며 선회 시 상위 제어기는 요구 요 각속도와 실제차량의 요 각속도를 비교하여 현재 차량의 상태 즉, 언더스티어와 오버스티어 정도를 판단하여 목표 거동을 결정하며 두 값의 차이인 요 각속도 오차 범위를 통해 개별 시스템의 개입시점을 결정한다.

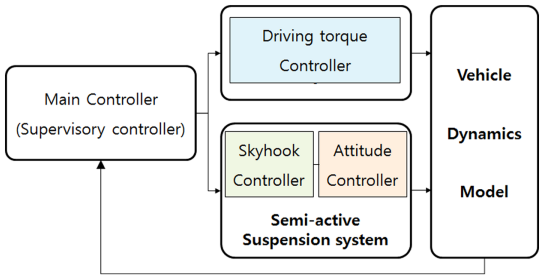


Fig. 7 Configuration of the integrated chassis control system

구동제어기(driving torque controller)에서는 부가적으로 요구되는 요 모멘트를 생성해주기 위해 좌·우륜의 구동토크 차이를 만들어 준다. 스카이 훅 제어기(sky-hook controller)를 이용하여 승차감 제어를 담당하며 롤 거동에 의해 자세 제어기(attitude controller)가 작동하게 되면 토크 제어 구동륜에 수직력을 보상해준다. 그러나 일반적인 선회 상황을 넘어서게 되면 상위 제어기에서는 토크 분배(torque vectoring system)와 댐퍼 제어(sky-hook control/attitude control)만으로는 보상 요 모멘트를 만족시킬 수 없다고 판단하게 되고 추가로 ESC(Electronic Stability Control) 시스템을 작동시켜 주행 안정성을 유지하도록 설계하였다.

Fig. 8은 이와 같은 통합제어기의 개념도를 나타낸 것이며 차량의 주행 상황을 판단하여 상위제어기에 의해 정해진 요 각속도 에러인 $\dot{\psi}_{err}$의 임계값(threshold value)에 따라 우선순위 함수를 기반으로 개별제어시스템이 작동하도록 하였다.[9)]

4.2 통합제어시스템 주행 시뮬레이션

구동제어시스템과 수동형 현가시스템을 사용한 수동형 모델(ECM_Pas), 구동제어시스템에 반능동 현가시스템이 단순 결합된 단순결합모델(ECM_SAS), 그리고 구동제어시스템과 반능동 현가시스템이 상위 제어기를 통해 통합제어가 이루어지는 통합제어모델(ECM_ICC)의 세가지 경우에 대하여 인휠 전기자동차의 구동 및 현가 통합제어 시스템의 성능평가를 실시하기 위하여 이중차선변경 시뮬레이션을 수행하였다.[10)]

이중차선변경시험을 차속 60 km/h로 수행하여 에너지 효율과 연관된 모터 토크와 차량 안정성 측

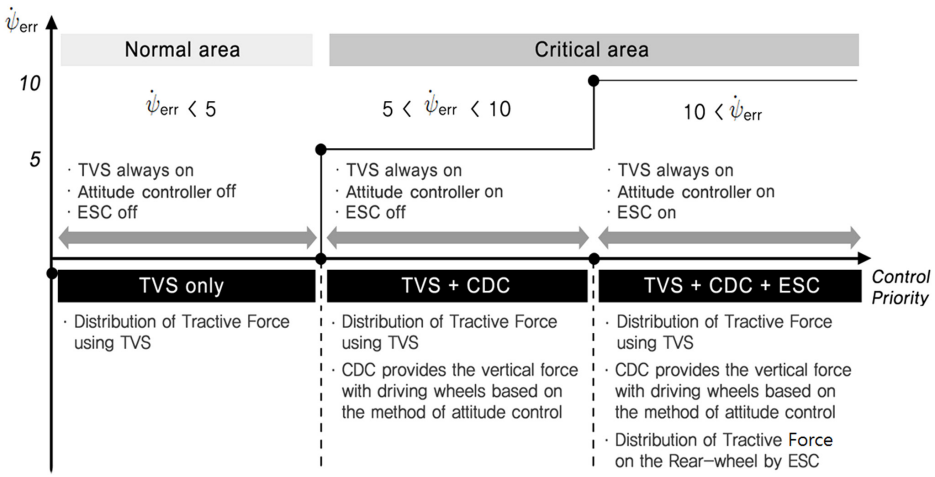


Fig. 8 Concept design of the integrated chassis control system

Table 4 Comparisons of the simulation results of passive system and integrated control system

Description		RMS	Max. reduction ratio (%)
Left wheel torque (N-m)	ECM_Pas	13.8544	11 %
	ECM_ICC	12.3617	
Right wheel torque (N-m)	ECM_Pas	13.8544	12 %
	ECM_ICC	12.0699	
Yaw rate (deg/sec)	ECM_Pas	5.5500	1.13 %
	ECM_ICC	5.5058	
Roll angle (deg)	ECM_Pas	1.0291	24.33 %
	ECM_ICC	0.8104	
Lateral acceleration (g)	ECM_Pas	0.1627	6.4 %
	ECM_ICC	0.1606	

Table 5 Comparisons of the simulation results of individual control system and integrated control system

Description		RMS	Max. reduction ratio (%)
Left wheel torque (N-m)	ECM_SAS	12.8982	4.16 %
	ECM_ICC	12.3617	
Right wheel torque (N-m)	ECM_SAS	12.6372	4.49 %
	ECM_ICC	12.0699	
Yaw rate (deg/sec)	ECM_SAS	3.5182	0.09 %
	ECM_ICC	3.4984	
Roll angle (deg)	ECM_SAS	0.8514	10 %
	ECM_ICC	0.8104	
Lateral acceleration (g)	ECM_SAS	0.1607	0.88 %
	ECM_ICC	0.1606	

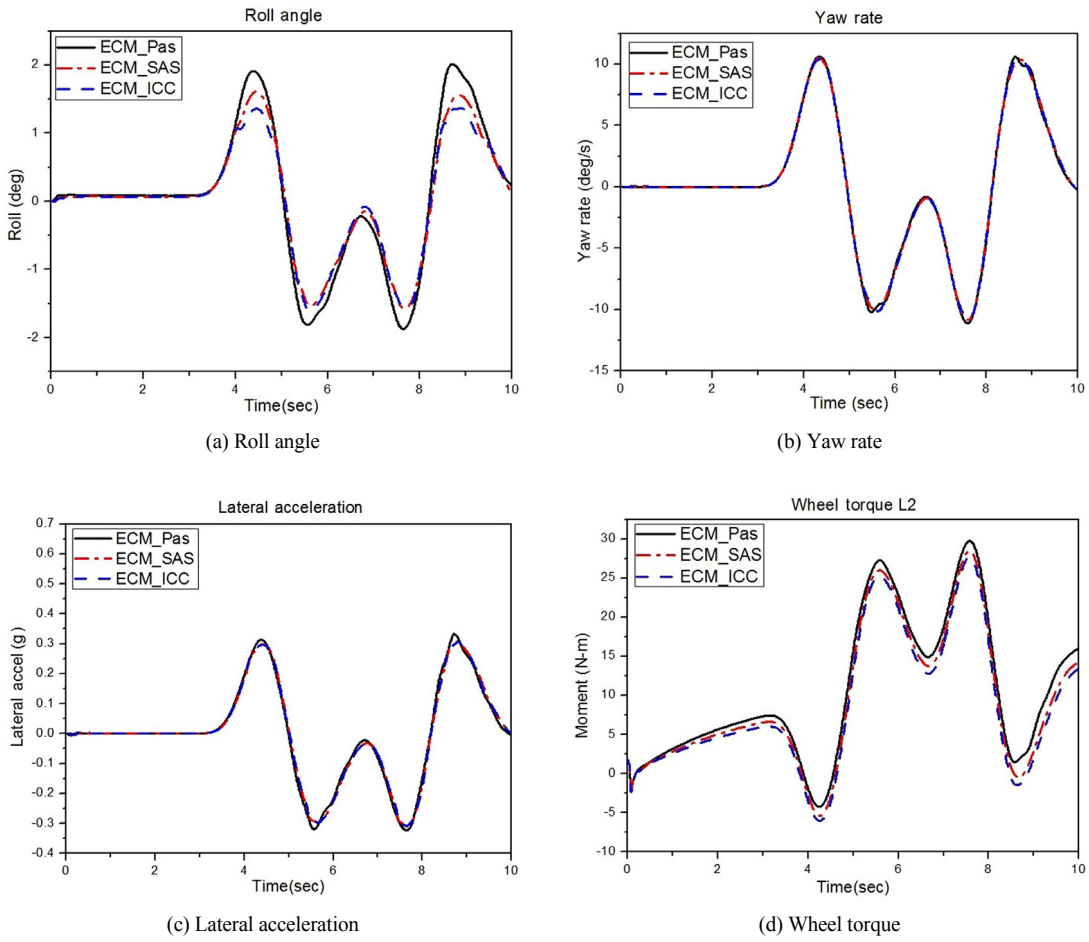
면인 롤 각, 요 각속도, 수직 가속도를 비교하였다.

결과 그래프는 Fig. 9에 도시하였으며 Table 4와 5에 세 가지 경우에 대하여 결과 값을 각각 기술하였다. Table 4에서 보는 바와 같이 수동형모델(ECM_Pas)과 통합제어모델(ECM_ICC)을 비교한 결과 후륜 좌우측에서 발생하는 모터 토크는 최대 12 % 감소하였으며 롤 각은 최대 24.33 % 감소함을 확인할 수 있다. Table 5에서 보는 바와 같이 단순결합모델(ECM_SAS)과 통합제어모델(ECM_ICC)을 비교한 결과 후륜 좌·우측에서 발생하는 모터 토크는 최대 4.49 % 감소하였으며 롤 각은 최대 10 % 감소함을 확인하였다.

따라서 통합제어 결과 구동 제어만을 사용한 수동형모델보다 성능이 크게 향상됨을 알 수 있었으며 구동제어시스템에 반능동 현가시스템을 단순결합한 단순결합모델보다 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 통해 단순 개별제어가 아닌 상위제어기를 통한 통합제어가 이루어졌을 때 차량의 전체적인 성능 향상이 이루어질 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 후륜 구동 인휠 전기자동차의 구동 및 현가 통합제어 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 토크 제어가 동작하는 상황에서 댐퍼 제어를



(a) Roll angle

(b) Yaw rate

(c) Lateral acceleration

(d) Wheel torque

Fig. 9 Simulation results according to control algorithms

통해 요 모멘트 제어와 하중이동을 줄임으로써 차량의 자세안정성과 에너지 효율 향상에 기여할 수 있었으며 연구 내용을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 실차 시험 데이터와 비교를 통해 차량모델의 정확도를 검증하였으며 MALTAB/Simulink 환경으로 구성된 후륜 구동 인휠 전기 자동차의 주행 성능에 대해 분석하였다.
2) 반능동 현가시스템은 스카이 훅 이론을 통한 승차감 향상과 차량 선회 시 토크 벡터링 구동륜에 차량의 하중이동을 고려한 감쇠력 제어를 통해 차량의 접지력을 향상시킬 수 있도록 제어 알고리즘을 구성하였다.
3) 제안한 통합제어 시스템을 이용한 시뮬레이션을 통해 모터 토크는 최대 12 %, 롤 각은 최대 24.33 % 감소하는 것을 확인하였으며 개별제어 시스템과 비교 하였을 때에도 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

이와 같은 결과를 통해 구동 및 현가시스템의 단순 개별 제어가 아닌 상호 통합제어를 이용하여 후륜 구동 인휠 전기자동차의 운동성능 향상 뿐만 아니라 구동 모터 토크를 감소시킬 수 있어 에너지 소모량을 줄일 수 있는 장점을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 통합제어 시스템을 활용하여 인휠 전기자동차의 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1) T. Nakada, S. Ishikawa and S. Oki, “Develop-

ment of an Electric Motor for a Newly Developed Electric Vehicle," SAE 2014-01-1879, 2014.
2) S. Murata, "Vehicle Dynamics Innovation with In-Wheel Motor," SAE 2011-39-7204, 2011.
3) KS R ISO 3888-1:2008, Passenger Cars -Test Track for a Severe Lane-change Manoeuvre-Part 1 : Double Lane-change, Korean Standards, 2008.
4) S. G. Shin and G. J. Choi, "Driving Performance Analysis of a Rear In-wheel Motor Vehicle with Simultaneous Control of Driving Torque and Semi-active Suspension System," Transactions of KSAE, Vol.23, No.1, pp.11-17, 2015.
5) H. W. Song, Y. K. Lee, J. J. Baek, J. H. Park and S. H. Hwang, "Driving Force Distribution Algorithm for Improved Driving Efficiency of 4-Wheel-Drive In-wheel Electric Vehicles," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1846-1850, 2013.
6) J. H. Yi, K. H. Lee, I. H. Kim, D. W. Jeong and S. J. Heo, "A Study of Torque Vectoring Application in Electric Vehicle for Driving Stability Performance Evaluation," Transactions of KSAE, Vol.22, No.3, pp.250-256, 2014.
7) Y. G. Kim, M. S. Kim, J. H. Sohn and W. S. Yoo, "Design Parameter of the Semi-active Damper of a Large Bus using Sky-hook Control," KSME Spring Conference Proceedings, pp.67-70, 2011.
8) S. H. Yoon, B. K. Koo, Y. S. Kou, J. H. Jung and D. S. Kim, "Study on the Development of Rollover Prevention System based on Simulation of Vehicle Dynamics," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.649-655, 2004.
9) T. W. Hong, A Study on Control Strategy of Steer Avoidance for Improving Performance to Emergency Steer Assist System, Ph.D Dissertation, Kookmin University, Seoul, 2013.
10) H. D. Kim, G. J. Choi, M. H. Ha, H. J. Moon and B. J. Kang, "Semi-active Chassis Integrated Control System of a Rear In-wheel Motorized Automobile," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.451-452, 2015.