

e-4WD 시스템 개발

Development of electric Four Wheel Drive System

조희영^{1*}

Hee Young Jo

Received: 10 Dec. 2015, Revised: 18 Jan. 2016, Accepted: 15 Feb. 2016

Key Words : e-4WD(전동식 4륜구동), Hybrid System(하이브리드 시스템), Motor(모터), Inverter(인버터), Speed Reducer(감속기), Clutch(클러치)

Abstract: e-4WD(Electric-4WD) system is a 4WD(4-Wheel Drive) System that can transform a car into a Hybrid System. e-4WD consists of a Motor, Inverter, Speed reducer and Clutch. The Motor, Speed reducer and Clutch are installed on the rear sub-frame as a chassis module type. The inverter is installed separately. Compared to a mechanical 4WD, the e-4WD system has many advantages. For example, the reduced number of drivetrain components makes better use of the space. Driving with a motor only at low speed improves fuel economy and reduces exhaust gas. Engine downsizing is available because the motor assists the engine. The performance of a conventional HEV(Hybrid Electric Vehicle) system can also be maintained. This paper proposes the specifications of components and the control logic for an e-4WD System. And the effect of the e-4WD system is proven using a test vehicle equipped with components under various test conditions.

기호 설명

W_r : rear working vertical load of vehicle, kg

W_{rs} : rear static vertical load of vehicle, kg

W : vertical load of vehicle, kg

a_x : longitudinal acceleration, m/s^2

h : height of mass center, m

L : wheel base, m

R_{ratio} : distribution ratio of vertical load

T_{TM} : transmission output torque, Nm

G_f : front final gear ratio

$T_{preload}$: rear driving torque for preload, Nm

e : difference between front and rear wheel speed, rad/s

K_P : proportional gain

K_I : integral gain

ψ_{error} : yaw rate error, deg/s

ψ_{desire} : desired yaw rate, deg/s

$\psi_{measure}$: measured yaw rate, deg/s

$T_{handling}$: rear driving torque for handling control, Nm

Subscripts

e-4WD : electric four Wheel Drive

HEV : Hybrid Electric Vehicle

HSG : Hybrid Starter Generator

HCU : Hybrid Control Unit

1. 서 론

지구 온난화와 같은 환경문제로 인하여 배기가스 규제가 강화됨에 따라 친환경차에 대한 니즈가 확산 되어 완성차 업체에서는 친환경 차량의 생산을 더

* Corresponding author: hyjo2003@hyundai.com

1 150, Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 18280, Korea

Copyright © 2016, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

많은 차종으로 확대하고 있다. 특히, 가장 많이 판매되고 있는 하이브리드 차량에서는 많은 경쟁차량들이 존재하기 때문에 타사와의 차별을 위해, 다양한 방식의 하이브리드 시스템이 개발되고 있다.

현재 생산되는 하이브리드 방식 중 하나인 후륜 모터 방식의 하이브리드 시스템은, 전륜은내연기관을 포함한 기존 파워트레인을 사용하고, 후륜은 대용량 구동모터를 장착하여 전륜과후륜의 독립구동이 가능한 시스템이다. 이 시스템의 장점은 하이브리드 시스템의 연비 향상과 더불어 후륜 구동모터를 이용한 전동식 4륜구동(e-4WD) 성능 구현이 가능하여 도시형 세단 뿐 아니라 SUV 등의 오프로드 성능 향상이 가능하다는 것이다.

e-4WD 시스템의 양산 적용 사례를 보면, 닛산 마치('02년), 도요타 RX450H('05년), 푸조 3008h('11년) 등이 있다.

이와 같은 e-4WD 시스템은 기계식 4WD와 HEV 차량의 조합된 형태로 볼 수 있으며, 연비개선, 배기저감, 출력증대, 주행성능 향상 등의 장점이 있다. 구체적으로는 차량이 출발해서 저속 구간에서는 모터로만 구동하고, 주행 속도가 높아지거나 가속 및 등판 시에는 HEV모드로 주행을 하며, 감속을 할 때는 회생제어가 되어 연비성능을 보다 높일 수 있다. 또한 험로 주행시에는 4WD 기능을 이용하여 주행함으로써 험로 탈출성능을 향상시킬 수 있다.(Fig. 1과 2 참조)

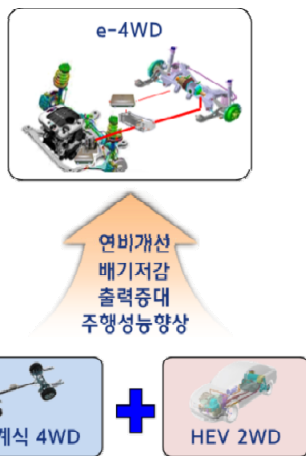


Fig. 1 e-4WD System Features



Fig. 2 Outline of e-4WD system

본 논문에서는 중소형 SUV차량에 적합한 e-4WD 시스템 구성 및 구성품의 상세 사양을 정의하고, 그 다음 e-4WD제어로직에 대해 설명하고, 최종적으로 실차를 구현하여 성능 검증한 내용까지 기술하였다.¹⁾

2. e-4WD 시스템 구성

2.1 시스템 사양

e-4WD 시스템은 하이브리드 시스템의 구성품을 모두 필요로 한다. 하지만 본 논문에서는 e-4WD 시스템의 4WD 제어 성능을 검증하는 것이 목적이기 때문에, HSG, 회생제동 등의 충전시스템은 설명에서 제외한다.

따라서 e-4WD 시스템은 구동과 직접 관련된 배터리, 인버터와 같은 전력부품과 감속기, 클러치 등과 같은 동력전달 부품으로 나누어진다. (Fig. 3 참조)

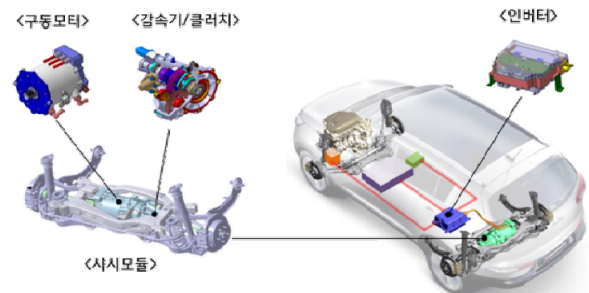


Fig. 3 System configuration

각 구성품에 대해 기술하기 전에 어떤 기준으로 모터 용량을 선정하였는지에 대해 기술한다. Fig. 4는 모터의 T-N 선도이며, 점선들은 모터 용량에 따라 그려진 선이다. 그리고 동그라미들은 기계식 4WD의 몇몇 주행성능을 T-N 선도 위에 나타낸 것이다. 결론적으로 12% 톨러 등판 이외의 대부분의 기계식 4WD의 성능을 만족할 수 있는 30KW급 모터로 선정하였다.

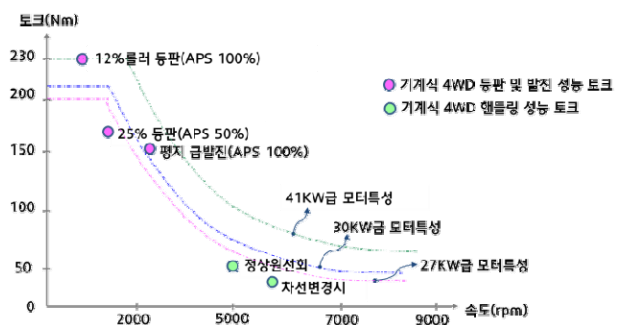
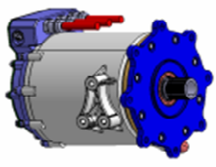


Fig. 4 Driving performance

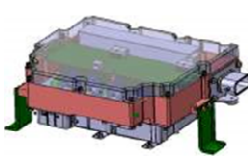
Fig. 4를 통하여 선정된 모터 등의 구성요소의 사양을 다음에 기술한다.

먼저 Fig. 5와 6은 e-4WD 용 30KW 모터 및 제어 를 위한 인버터를 나타낸 것이다.



용량 (출력)	30 [KW]
최대 토크	Max 205 [Nm]
RPM	Max 9,000
효율	94% 이상

Fig. 5 Motor

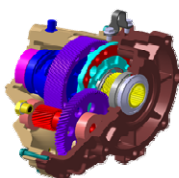


입력전압	180~310(270) [V]
입력전류 (최대/연속)	145 / 50 [A]
모터전류 (최대/연속)	221 / 57 [Arms]

Fig. 6 Inverter

모터의 최대 토크는 205Nm이고 최대 RPM은 9,000이다. 인버터의 정격 전압은 270V이며, 모터와 인버터는 수냉으로 쿨링하는 방식이다.

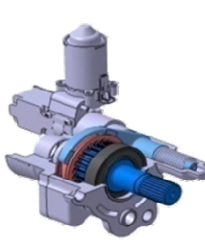
Fig. 7은 e-4WD시스템의 감속기를 나타내며, 후륜 디퍼렌셜 일체형으로 9.5:1의 감속비를 가진 것이다. 그래서 후륜 토크로 환산하면 최대 후륜 구동 토크는 약 1,950Nm이다.



토크 (Input)	Max 205 [Nm]
RPM	9,000 ↑
Type	2단 헬리컬기어
감속비	9.5:1
효율	93% 이상

Fig. 7 Speed reducer

Fig. 8은 클러치이며, 모터 보호를 위한 동력 절연용 디스크넥터로써 특정 차속을 넘어서면 드라이브 샤프트와의 연결을 끊어준다. 그리고 다시 모터의 동력을 필요로 할 때 연결해주는 역할을 한다.



Type	Fork & Sleeve
토크 (Input)	Max 974 [Nm]
RPM	950 ↑
효율	93% 이상
온도 범위	-40 ~ 120 [°C]
액츄에이터	전동식 모터 (12V)
제어 응답성	Max 600 [msec]

Fig. 8 Clutch

2.2 시스템 아키텍처

Fig. 9는 e-4WD 시스템의 개략도를 나타낸 것으로 내연기관이 전륜쪽에 위치하고 있고, e-4WD 모듈은 후륜쪽에 장착되어 있다. 그리고 모듈의 제어를 위하여 e-4WD ECU와 연결되어 있고, e-4WD ECU는 HCU와 CAN으로 연결되어 있다. 인버터(MCU)는 고전압배터리로부터의 DC전원을 3상 AC전원으로 변환하여 모터를 구동한다. 12V 전원은 각 요소부품에 필요한 전기를 공급한다. 그리고 HPCU는 회생제동과 관련된 브레이크 제어 ECU이다.

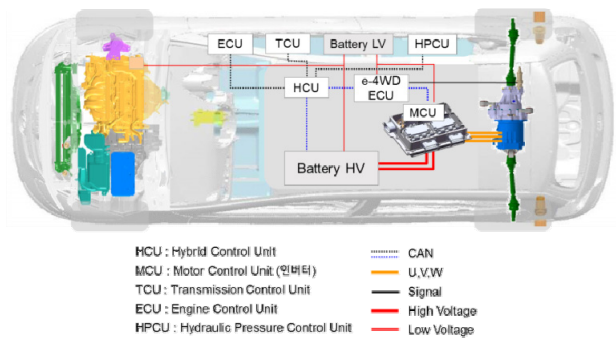


Fig. 9 System overview

Fig. 10은 e-4WD 시스템의 아키텍처를 나타낸 것으로 모터, 인버터(MCU), e-4WD ECU, HCU, CAN 네트워크 등 크게 5가지로 구성되어 있다. 운전자에 의해 입력된 드라이빙 모드 및 엑셀페달 포지션은 ECU 및 BMS 등 각각의 제어시스템에 전달되고, CAN BUS를 통해 정보가 공유된다. 인버터(MCU)는 Traction Driving SW와 Application SW와 같은 제어모듈들과 Power Conversion Driver와 같은 전력변환모듈로 나누어진다.

또한 인버터(MCU)는 e-4WD ECU로부터의 지령을 받아 제어모듈을 통해 구동준비를 하며 이와 동시에 BMS로부터 고전압을 인가받아 전력변환모듈을 통해 모터를 구동시킨다. 그리고 모터는 레졸버 신호와 온도를 인버터로 피드백한다. 인버터내의 DC-DC Converter는 고전압을 저전압으로 변환하여 Low voltage 배터리를 충전한다. 그리고 e-4WD ECU는 HCU 및 차량 CAN 정보를 통해 e-4WD시스템을 제어하고 클러치를 직접 제어한다.²⁾⁻³⁾

3. e-4WD 제어로직

후륜 독립 구동을 위한 제어로직은 하이브리드 차량의 HCU (Hybrid Control Unit) 제어로직과 같이 차

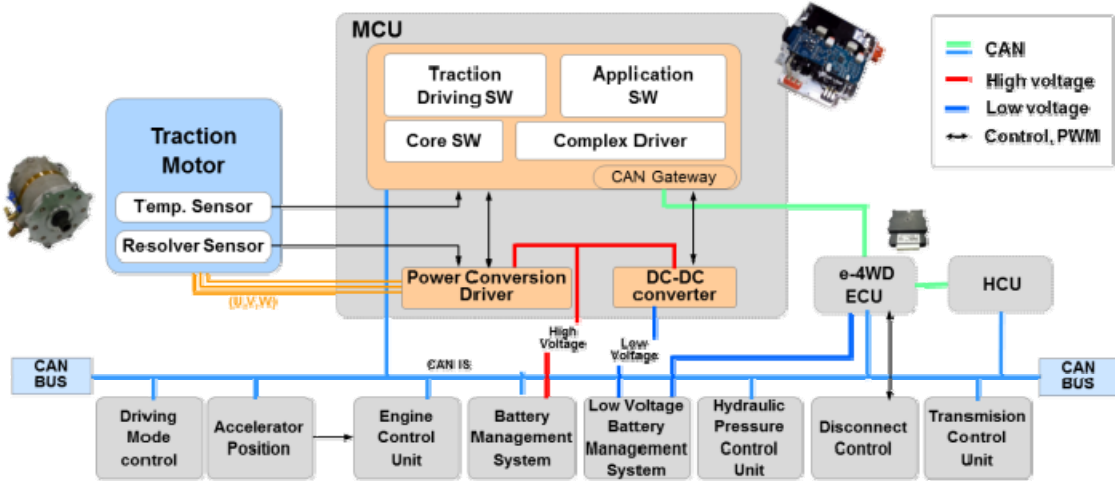


Fig. 10 System architecture

량 전반의 효율성과 안정성 등을 종합적으로 고려하여 제어해야 하지만, 본 논문에서는 후륜 구동모터를 이용한 e-4WD제어로직에 대해 기술한다.

Fig. 11은 e-4WD 시스템의 제어로직 구성도를 나타낸다. 크게 입력신호에 해당하는 부분, Fail 및 작동조건 판단, 차량 상태 추정, 4WD 로직, 제어기 명령값 출력 등 5가지로 나누어진다. 먼저 입력 신호로서는 차량 CAN으로부터 받을 수 있는 센서신호, 모터/인버터 정보, 클러치 정보가 있다. 그 다음 Fail 및 작동조건 판단은 e-4WD 시스템이 작동하기 전 차량, 통신, 전력부품(인버터, 모터)의 이상여부 확인과 모터, 인버터의 온도를 점검하여 정상작동 가능 여부를 판단하는 부분이다.

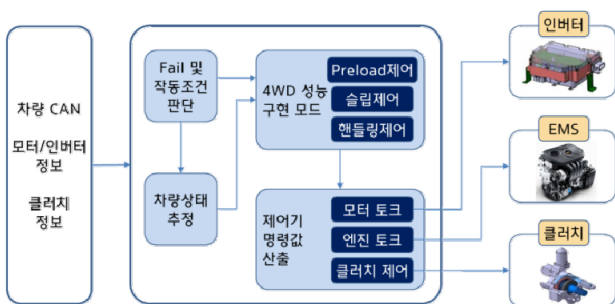


Fig. 11 e-4WD system control logic

그 다음 차량상태 추정 및 4WD 로직에 대해서는 별도로 기술하겠다.⁴⁾⁻⁶⁾

마지막의 제어기 명령값 산출 부분은 4WD 로직에서 계산된 후륜 구동토크값을 구현하기 위해 인버터, EMS(Engine Management System), 클러치 등으로 송출하는 최종 명령값을 산출하는 부분이다.

3.1 차량상태 추정

차량상태 추정 부분에서는 TPS (Throttle Position Sensor), P/T (Power Train) 정보, 휠속, 조향각 등의 신호를 통해 전후륜의 속도차, 차량의 선회반지름, 횡미끄러짐각, 변속기 출력토크, 하중분배비 등의 차량상태 값을 추정하는 부분이다.

Fig. 12는 차량상태 추정 부분의 구성도를 나타낸다.

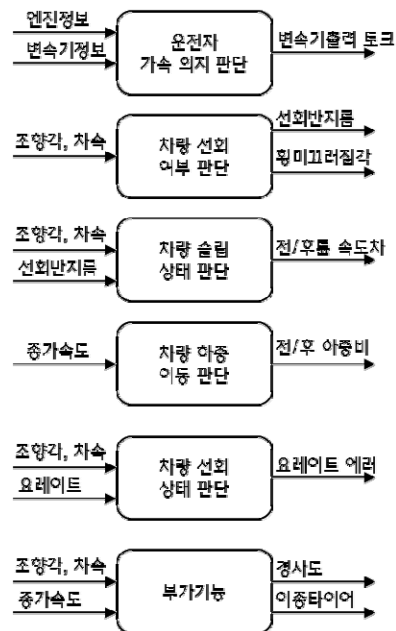


Fig. 12 State estimation

이렇게 추정된 차량 상태를 기준으로 4WD 기능의 개입 시점과 발진 보조, 4WD 기능 제한, 전후륜 슬립저감, 선회시 안정성 향상을 위한 후륜의 구동토크를 결정하게 된다.

3.2 Preload 제어

Preload제어의 목표는 운전자의 가속의지 및 차량의 증가속도에 의한 하중분배를 고려하여 전후륜에 최적의 구동력을 배분하여 발진성능을 향상시키는 것이다. Preload 제어를 위한 후륜 구동토크 계산식은 다음과 같다.

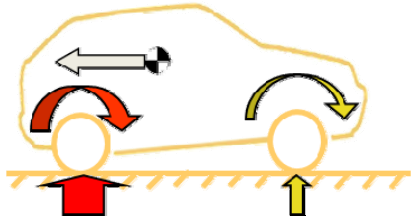


Fig. 13 Preload control concept picture

$$W_r = W_{rs} + W \frac{a_x h}{g L} \quad (1)$$

$$R_{ratio} = \frac{W_r}{W} \quad (2)$$

$$T_{preload} = T_{TM} \cdot G_f \cdot R_{ratio} \quad (3)$$

W_r 은 후륜작용하중, W_{rs} 는 후륜 정하중, W 는 차량 정하중, a_x 는 증가속도, h 는 차량의 무게중심 높이, L 은 휠베이스, R_{ratio} 는 하중 배분비, T_{TM} 은 변속기 출력토크, G_f 는 전륜 중감속 기어비, $T_{preload}$ 는 발진제어를 위한 후륜 구동토크를 나타낸다.

3.3 슬립제어

슬립제어의 목표는 전후륜 간의 속도차를 저감시켜 전륜 혹은 후륜의 슬립에 의한 구동력 손실을 최소화하는 것이다. 슬립제어를 위한 후륜 구동토크 계산식은 다음과 같다.

$$T_{slipcontrol} = K_p \cdot e + K_I \int_0^t edt \quad (4)$$

e 는 전/후륜 속도차, $K_p \cdot K_I$ 는 P-I 게인을 나타낸다. Fig. 14는 슬립제어의 개념을 나타낸다.

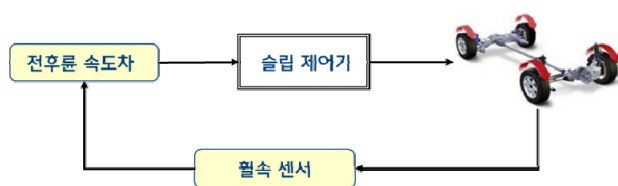


Fig. 14 Slip control

3.4 핸들링제어

핸들링제어의 목표는 차량이 선회시 발생할 수 있는 과도한 언더스티어, 오버스티어의 특성을 저감시켜 선회 안정성 및 민첩성을 향상시키는 것이다. 핸들링제어를 위한 후륜 구동토크 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{\psi}_{error} = \dot{\psi}_{desire} - \dot{\psi}_{measure} \quad (5)$$

$$T_{handling} = K_p \cdot \dot{\psi}_{error} \quad (6)$$

$\dot{\psi}_{error}$, $\dot{\psi}_{desire}$, $\dot{\psi}_{measure}$ 는 각각 요레이트 에러, 목표 요레이트, 실제 요레이트 값이고, K_p 는 P게인, $T_{handling}$ 은 핸들링 제어를 위한 후륜 구동토크를 나타낸다. Fig. 15는 핸들링 제어의 개념을 나타낸다.

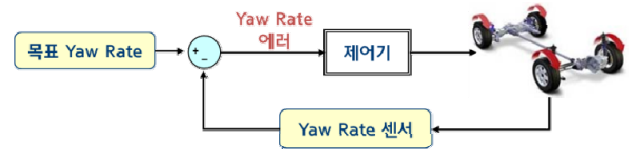


Fig. 15 Handling control

기계식 4WD 제어로직에는 이외에도 NVH 제어, TCB(Tight Cornering Brake) 제어와 같은 로직이 있으나 이들 로직은 추진축이 있으므로 발생하는 것들로, e-4WD 시스템에는 필요하지 않다.

4. 성능 검증

앞에서 기술한 제어로직의 성능 검증을 위해 실차 시험을 다음과 같이 수행하였다. 본 논문에서는 e-4WD시스템의 성능 확인을 위해 33% 등판 발진,

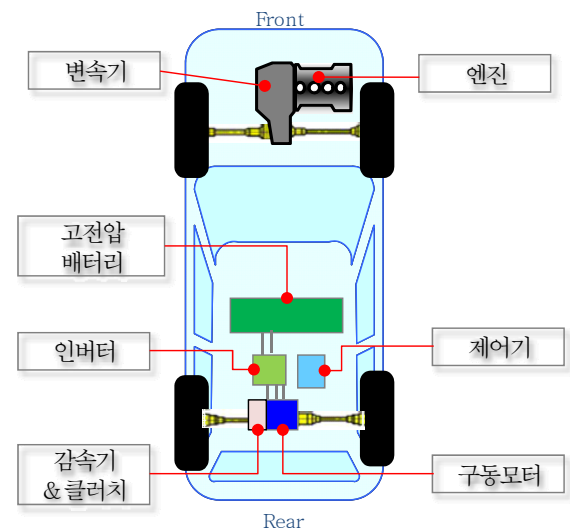


Fig. 16 Vehicle configuration

평지롤러탈출 및 12% 롤러탈출 시험을 실시하였다.

Fig. 16은 실차시험을 위하여 제작한 시험차량의 구성을 나타낸다.

4.1 33% 고마찰로 등판 발진 시험

Fig. 17은 33% 고마찰로 등판 발진 시험시 2WD와 e-4WD의 결과를 나타낸다. 이 결과를 보면, 2WD의 경우 등판에서 발진 가속을 하게 되면 등판이 가능하기는 하지만 초기 발생한 전륜의 슬립으로 초기 구동력이 손실되는 것을 볼 수 있다. e-4WD의 경우는 운전자의 가속의지 및 전후륜 속도차를 모니터링 하며, 초기에 최적의 발진을 위해 전륜 엔진토크 저감과 후륜 구동모터에 토크를 인가함으로써 전륜의 휠슬립을 예방하고, 이로 인해 등판 성능이 향상됨을 볼 수 있다. 동일한 TPS값에도 불구하고 엔진토크값이 차이가 나는 것은, e-4WD의 경우 후륜 모터에 인가된 토크 만큼 엔진토크를 저감 시켜 운전자가 의도한 총 구동력의 합을 유지하기 위함이다. 그리고 e-4WD에 의한 효과는 Table 1에 정리되어 있다.

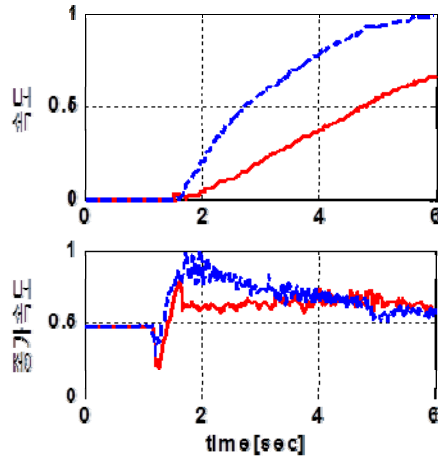
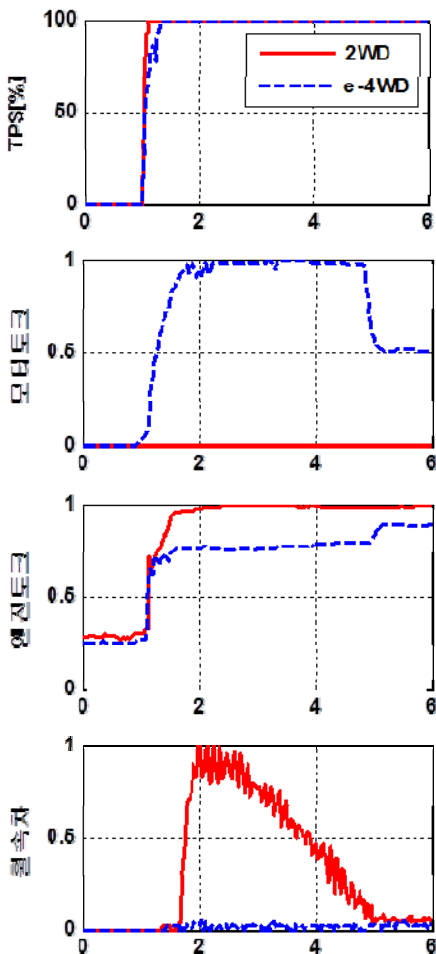


Fig. 17 33% ramp test (stop→TPS 100%)

Table 1 Result of 33% ramp test

시험 조건	33% 고마찰로 등판 발진 시험 정지 → TPS 100%		
	5초후 속도 (kph)	전/후속도차 (rpm)	총g평균 (m/s ²)
2WD	12.5	230	0.69
e-4WD	18.6	10	1
효과	48.8% ↑	95.6% ↓	46% ↑



4.2 평지 롤러 탈출 시험

Fig. 18은 평지 롤러 탈출시험 결과를 나타낸다. 이 결과를 보면, 2WD경우 전륜을 롤러에 올려놓고 가속을 하게 되면 전륜에 심하게 휠 슬립이 일어나게 되고, 이로 인해 정상적인 발진이 불가능 하다. 하지만 e-4WD의 경우 운전자의 가속의지와 전후륜의 속도차를 인지하여 전륜 엔진토크 저감과 동시에 후륜 구동모터에 토크를 인가함으로써 전후 속도차를 저감시켜 전륜 롤러상황에서도 발진이 가능한 것을 볼 수 있다. e-4WD에 의한 효과는 Table 2에 정리되어 있다.

Table 2 Result of flat-roller test

시험 조건	평지 롤러 탈출 시험 정지 → TPS 50%	
	전/후속도차 (rpm)	총g평균 (m/s ²)
2WD	860	0.87
e-4WD	465	1.09
효과	46% ↓	26% ↑

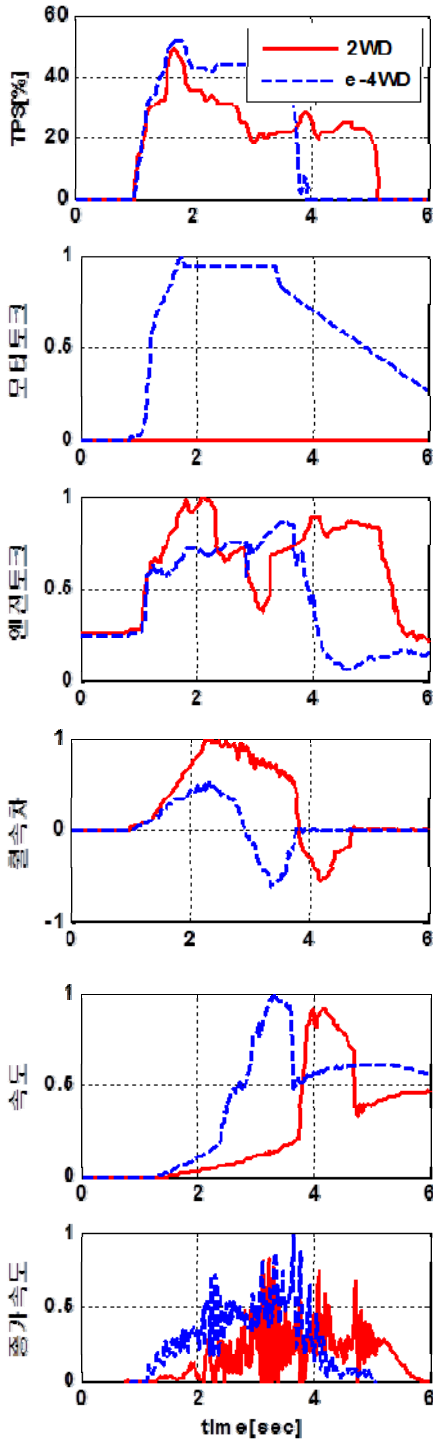


Fig. 18 Flat-roller ground escape test

4.3 12% 롤러 탈출 시험

Fig. 19는 12% 롤러탈출시험 결과를 나타 낸다. 이 결과를 보면, 12% 롤러의 경우는 평지 롤러탈출 보다 더 가혹한 시험조건이어서 2WD 경우 가속을 하게 되면 전륜의 휠 슬립이 심하게 발생하고 차량은 속도를 제대로 발생시키지 못한다. 하지만 e-4WD의 경우 전륜 엔진토크 저감과 동시에 후륜 구동모터에

토크를 인가함 으로서 전후 속도차를 저감시켜 전륜 롤러 상황에서도 등판이 가능한 것을 볼 수 있다. e-4WD에 의한 효과는 Table 3에 정리되어 있다.

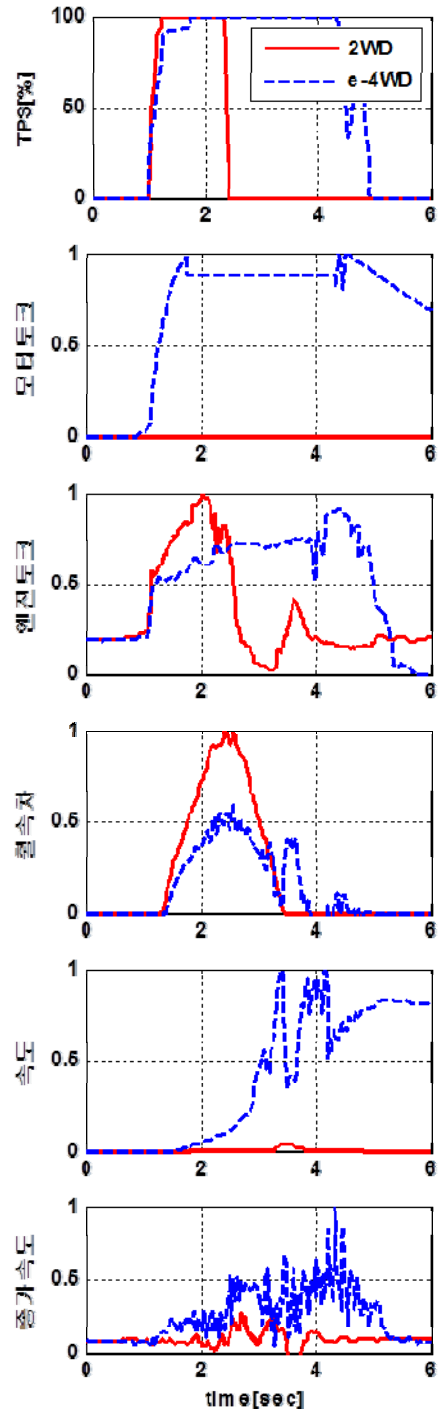


Fig. 19 12% ramp-roller escape test (stop→TPS 100%)

Fig. 4를 이용하여 모터 용량을 선정할 때, 기계식 4WD의 대부분 성능을 만족하지만 12% 롤러 탈출은 제외하는 조건으로 모터를 30KW 로 선정하였다. 그런데 12% 롤러 탈출 시험 에서는 30KW급 모터로

탈출 가능하다는 시험 결과를 얻었다. 이 결과의 의미는, 4WD 시험을 통하여 성능 만족 여부를 판정할 때 0.1G 이상 가속 가능 유무로 판단한다. 이때 30KW의 경우 충분한 가속은 아니나 탈출은 가능하였다.

Table 3 Result of 12% ramp-roller test

시험 조건	12% 경사도 롤러 탈출 시험 정지 → TPS 100%	
	전/후속도차 (rpm)	중g평균 (m/s ²)
2WD	1075	0.92
e-4WD	600	2.57
효과	44% ↓	180% ↑

끝으로 e-4WD 시스템은 모터/인버터로 이루어진 전기적인 시스템으로 HEV에 가까운 시스템이어서 HEV 모터 테스트에 준하는 신뢰성 시험이 이루어져야 한다. 이와 같은 신뢰성 시험에 대해 간단히 기술하겠다. 먼저 모터와 인버터의 센서 인터페이스, 고장진단, 보호기능, 전원특성, 절연특성, 출력성능, 진동충격, 온도, 환경 시험 등이 있다. 그리고 e-4WD 모듈의 30만km 내구 성능 평가 등이 병행되어야 한다.

이상 e-4WD 시스템의 구동성능 실차평가 결과를 나타내었다. 그리고 앞절에서 설명한 핸들링제어에 관한 실차평가가 필요하였으나, 전후 구동력 배분에 의한 선회시 성능차이는 고마찰 노면에서는 그 차이가 크지 않고, 주로 저마찰 노면에서 차이를 볼 수 있다. 이 저마찰 노면에서 시험하기 위해서는 동계시험장에서 하거나 인공 저마찰 노면에서 하여야 한다. 그런데 인공 저마찰 노면의 경우는 핸들링 시험을 할 정도로 넓지 않아, 핸들링 제어 성능을 보기 위해서는 실제 저마찰 노면 시험에서 수행해야 함으로 본 논문에서는 핸들링 시험 결과를 포함시키지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 시스템 중 하나인 후륜 인라인 방식의 e-4WD 시스템을 이용한 4WD 성능 구현을 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다.

(1) e-4WD 시스템을 구성하는 구성품의 정의 및 사양에 대해 기술하였다.

(2) e-4WD의 4WD 기능 구현을 위한 제어 로직에 대해 기술하였다.

(3) e-4WD 시스템을 탑재한 시험차량을 제작 하여 실차시험을 실시하였다.

(4) 실차 시험결과 e-4WD시스템의 4륜 구동 효과를 확인할 수 있었다.

이상과 같은 연구를 통하여 모터를 이용 해서도 기존의 기계식 4WD 성능을 구현할 수 있음을 확인할 수 있었고, 이를 통해 후륜 인라인 방식의 하이브리드 시스템 적용시 연비향상 뿐 아니라 4WD 성능까지 확보할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 2011년도 수요자 연계형 부품소재 기술 개발사업(과제번호 : 10040814)으로 선정되어 진행된 연구 내용임을 밝힙니다.

References

- 1) Koichi Kondo, Sumiko Sekiguchi, Michitaka Tsuchida, "Development of an Electrical 4WD System for Hybrid Vehicles", SAE, 2002.
- 2) J. Jeong, H. Kim, W. Lim, S. Cha and S. Kang, "Development of Backward Simulation Program Based on Dynamic Programming for 4WD Hybrid Electric Vehicle considering Tire Slip Model", KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1851-1855, 2013.
- 3) S. Lee, J. Kim, K. Lee, G. Lee, "Study of high-performance control for the vehicle class 30kW IPMSM", KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1982-1987, 2013.
- 4) Mitsuru Ohba, Hirokazu Suzuki and Takashi Electronically Controlled 4WD System : Toyota Active Torque Control 4WD", SAE, 1999.
- 5) Jisoo Lee, Heeyoung Jo, Sangho Lee, "The Study on Torque Distribution Control to Improve Handling Performance for All Wheel Drive", KSAE, 2008
- 6) Heinrich Huchtkoetter, Theodor Gassmann, "Vehicle Dynamics and Torque Management Devices", SAE, 2004.