

수소전기차량용 E-axle의 동력분배장치 모드 변환 제어로직 개발

김 한 솔¹⁾ · 임 원 식^{*2)}서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계자동차공학과²⁾

Development of the Mode Conversion Control Logic of the Power Split Device of E-axle Equipped to Hydrogen Electric Vehicle

Hansol Kim¹⁾ · Wonsik Lim^{*2)}¹⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea²⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

(Received 19 September 2023 / Revised 25 September 2023 / Accepted 25 September 2023)

Abstract : Due to the climate crisis and environmental concerns, regulations on greenhouse gas emissions from vehicles have been tightened. Commercial vehicles, which emit significant amounts of greenhouse gases, are increasingly in need of electrification. While most small electric vehicles operate only with a motor without a transmission, but medium-to-large vehicles require a transmission because they have a wide operating range and diverse driving conditions. Increasing motor size complicates optimal operation, making transmissions essential. Using manual transmissions in commercial vehicles can increase driver fatigue, and AMT transmissions lead to power interruptions during gear changes. To address this, the E-axle system, which combines dual motors with dog clutches, was introduced. This paper focuses on developing and testing a mode conversion control strategy and ASW for smooth gear changes in the E-axle system through vehicle tests.

Key words : FCEV(수소전기자동차), Transmission(변속기), E-axle(일체형 구동모듈), Phase(변속 과정), ASW (Application software, 응용소프트웨어)

Nomenclature

T	: torque, Nm
ω	: rotational speed, rad/s
V	: vehicle speed, m/s
ψ_{sp}	: speed handover ratio
ψ_{tq}	: torque handover ratio
η	: efficiency
MG	: motor and generator
r	: gear ratio
r_m	: torque distribution ratio
G	: shifting gear stage
I	: inertia, kg · m ²

1. 서론

최근 기후 위기로 환경문제가 대두되면서, 가장 보편적으로 사용되는 대중교통인 자동차의 온실가스 규제가 강화되고 있다. 특히 상용 차량의 경우 일반 승용 차량에 대비하여 온실가스가 많이 나오기 때문에, 강화되고 있는 환경규제를 만족하기 위해서는 상용 차량의 전동화가 필수적이다.¹⁾

대부분의 전동화된 승용차량은, 장착된 모터의 구동 성능(회전속도와 토크) 범위가 차량의 요구 성능(차속과 구동력) 범위를 포함할 수 있기 때문에, 변속기 없이 모터만으로도 차량을 구동한다. 하지만 중대형 차량에서는 고속 주행이 가능해야 하면서도 화물 적재량에 따라 요구 구동력이 큰 폭으로 변화할 수 있어야 한다. 이러한 다양한 주행 성능을 모터 단독으로 구현하기 위해서는

*Corresponding author, E-mail: limws@seoultech.ac.kr

¹⁾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.

최대 토크와 최대 회전속도를 증대해야 하는데, 최대회전속도를 증가시키는 문제도 윤활과 진동 등의 문제로 인해 해결하기 어려우며, 토크 증대를 위해 모터 사이스를 증대하면 패키징의 어려움과 전비 성능이 떨어지고 다양한 주행 요구 조건에 맞는 모터의 최적점 운전이 불가능해진다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 중대형 차량에는 변속기 적용이 적극 추천된다.

상용차량에서는 수동 변속기를 적용하게 되면 변속시 높은 클러치 페달 담력과 변속 레버 조작력이 요구되며 운전자의 피로도와 스트레스가 가중된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 AMT 변속 시스템을 적용하는 경우, 변속시의 동력단절감과 변속 충격으로 인해 운전자에게 불쾌감을 주게 된다. 본 연구에서는 이러한 동력단절 문제를 해결하기 위하여 듀얼 모터 시스템에 도그 클러치를 적용한, 클러치 리스 방식의 새로 고안된 E-axle 시스템을 적용하였다. 본 연구의 E-axle 시스템은 듀얼 모터로 구동되는 변속시스템이기 때문에, 별도의 후진기어 없이 모터의 역회전으로 후진 구동이 가능하며, 각각의 모터에 2단 변속기가 적용되어 있고, 두 모터 동력이 통합되는 위치에 유성기어를 이용한 2단 변속기가 추가 적용되어 있다. 연구대상 시스템은 수소연료전지 차량이지만, E-axle 시스템은 전기차량에도 적용할 수 있는 시스템이다.^{2,4)}

본 논문에서는 모터의 정밀 속도 제어 장점을 활용하여, 변속시의 모터 토크 분배 및 속도 제어를 이용한 E-axle 시스템의 동력단절감 없는 변속모드 전환제어 전략 및 ASW를 개발하고, 실차시험을 통해 개발된 제어로직의 신뢰성을 검증하였다.

2. E-axle 시스템 모델링

본 연구 대상인 E-axle의 파워트레인 시스템은 Fig. 1과 같이 2개의 모터(MG1, MG2)와 6개의 도그 클러치 (a, b, c, d, L, H)로 구성되어 있고, Table 1과 같이 도그 클러치들과 모터의 작동조합에 따라 6단의 변속비를 구현하고 있다. MG1 출력부의 감속비는 도그 클러치 a, b에 의하여 r1, r3, r5, r7 등으로 결정되고, MG2 출력부의 감

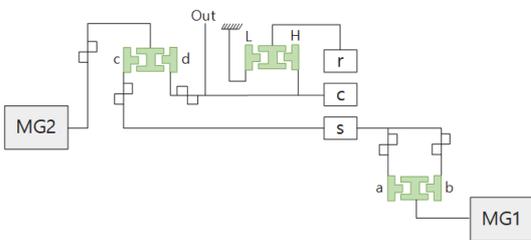


Fig. 1 Configuration of powertrain system

속비는 도그 클러치 c, d에 의하여 r2, r4, r6 등으로 결정된다. MG1과 MG2의 동력은 유성기어의 도그 클러치 L, H에 의하여 조합된다.^{5,6)}

본 연구 대상 E-axle의 운동방정식을 유도하기 위하여, Fig. 1로 표현된 구동시스템의 회전관성들과 클러치들을 자세히 고려하여 성능 모델링을 Fig. 2와 같이 수행하였다. MG1과 MG2 모터에서 나온 동력은 유성기어의 캐리어와 최종감속비를 거쳐 휠로 출력된다. 이러한 구동시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{m1} \\ \dot{\omega}_{m2} \\ \dot{\omega}_c \\ \dot{\omega}_s \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{m1} - T_b/r_b + T_c/r_c \\ T_{m1} - (T_d + T_c)/r_{m2} \\ r_d T_d - T_H + T_r + T_s - T_o \\ r_c T_c - T_a - T_b \\ T_L + T_H - T_r \\ r_f T_o - T_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

연구대상 시스템의 차량 및 모터 제원은 Table 2와 같다.⁴⁾

Table 1 Clutch operating mode with shifting step⁴⁾

Gear	MG2 Ratio	Clutch						MG1 Ratio
		Sf2		Range		Sf1		
		C	D	Low	High	A	B	
1	r2	●		●		●		r1
2		●		●			●	r3
3	r4		●	●			●	r5
4			●		●	●		
5	r6	●			●	●		r7
6		●			●		●	

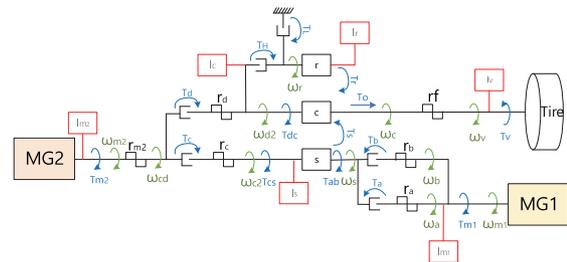


Fig. 2 Dynamic modeling of powertrain system

Table 2 Specifications and performance of vehicle and motor⁴⁾

Vehicle weight	40,000 kg	Vehicle Max. Driving force	12 kN
Vehicle Max. Power	460 kW	Climbing performance	30 %
Vehicle Max. Speed	160 km/h	Motor Max. Power	230 kW
Motor Max. Torque	1,300 Nm	Motor Max. Speed	4,000 rpm

3. E-axle 변속 제어전략 및 제어로직

연구대상 시스템의 변속 중 동력단절감을 최소화하기 위한 제어전략을 고안하고 MATLAB Simulink를 통해 제어로직을 구성하였다. 변속을 위해 제어해야 할 요소는 2개의 모터, 3개의 도그 클러치 시스템이며, 도그 클러치의 제어를 위해서는 Sf1/Sf2/Range부에 대한 총 3개의 액추에이터가 필요하다.

도그 클러치 작동을 제어하기 위한 제어 시퀀스를 Figs. 3~5와 같이 구성하였다. 제어 시퀀스는 3단 ↔ 4단 변속시의

8개 Phase를 제외하고는 5개 Phase로 구성되어 있으며, 각 Phase에서는 Tables 3~4의 내용과 같이 제어가 이루어진다.

Table 3에 도시된 5-Phase shift 제어의 Phase 1(Torque control)에서는, 변속을 시작하면 기어를 변경해야 하는 부분의 모터 토크를 0으로 제어하면서 반대쪽 모터에서 추가적인 토크 보상 제어가 이루어진다. 이를 통해 변속 중에도 출력 토크의 변화없이 제어가 가능하다. Phase 2(Gear neutral)는 변속해야 하는 기어를 중립으로 제어하는 구간이다. Phase 3(Speed control)에서는 목표 기어단의 도그 클러치 체결을 위한 모터 속도 제어가 이루어진다. 도그 클러치의 상대속도($\Delta\omega$)가 체결이 가능한 수준까지 낮아지면 Phase 4(Gear shifting)에 진입하게 되고, 액추에이터를 작동시켜 도그 클러치 체결을 수행한다.

Table 3 Mode conversion of control phase(5-Phase shift)

No.	Role	Description
1	Torque control	Change the torque of the motor located in the shifting gear to zero
2	Gear neutral	Neutral control of the dog clutch of the shifting gear
3	Speed control	Since the speed of the dog clutch gear changes when the gear ratio is changed, the motor is controlled within the corresponding speed range to increase the probability of fastening.
4	Gear shifting	Dog clutch actuator fastening
5	Torque recovery	Torque distribution control between dual motors

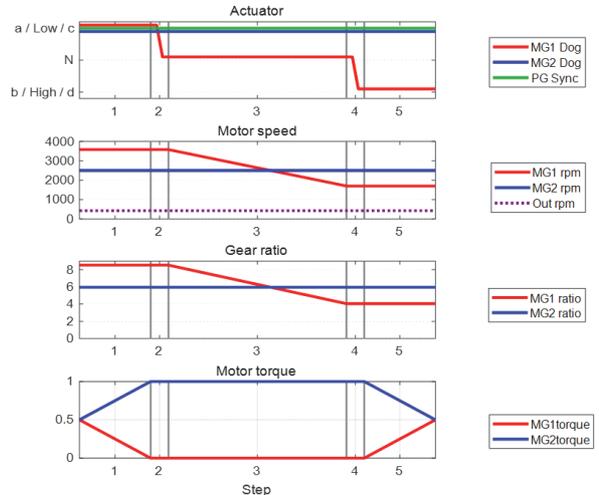


Fig. 3 MG1 actuator control strategy(1st → 2nd)

Table 4 Mode conversion of control phase(8-Phase Shift)

No.	Role	Description
1	Torque control	Change the torque of the motor located in the shifting gear to zero
2	Gear neutral 1	Neutral control of the dog clutch of the shifting gear
3	Speed control 1	Since the speed of the dog clutch gear changes when the gear ratio is changed, the motor is controlled within the corresponding speed range to increase the probability of fastening.
4	Gear neutral 2	Neutral control of the dog clutch of the shifting gear
5	Gear shifting 1	Dog clutch actuator fastening
6	Speed control 2	Since the speed of the dog clutch gear changes when the gear ratio is changed, the motor is controlled within the corresponding speed range to increase the probability of fastening.
7	Gear shifting 2	Dog clutch actuator fastening
8	Torque recovery	Torque distribution control between dual motors

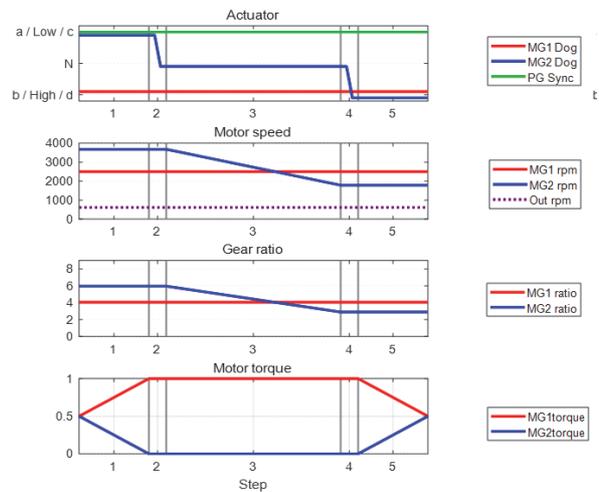


Fig. 4 MG2 actuator control strategy(2nd → 3rd)

체결이 완료되고 나면, Phase 5 (Torque recovery) 구간에서 두 모터간의 토크 분배 제어를 통해서 토크 값이 복귀되는 과정이 이루어진다.

Fig. 3과 Fig. 4는 Table 3의 5-Phase shift 제어에 해당하는 변속 과정의 개념을 보이고 있다. Fig. 3은 MG1 액추에이터를 작동하여 1단→2단의 변속 제어를 보이고 있고, Fig. 4는 MG2 액추에이터를 작동하여 2단→3단의 변속 제어를 보이고 있다.

3단과 4단 사이의 모드변환 과정에서는 유성기어 파트에 장착되어 있는 Low/High 도그 클러치 변속이 이루어진다. ‘a/b’와 ‘Low/High’ 클러치를 모두 변속해야 하기 때문에 2번의 속도 제어와 도그 클러치 체결이 필요하고, Fig. 5와 같이 8개의 Phase로 변속 제어가 이루어진다.

본 연구대상 시스템은 Table 1과 같이 변속 단계에 따라 각 모터에 적용되는 감속비가 다르며, 주행 중의 차량 속도와 운전자 요구 토크 등이 수시로 변화하게 된다. 따라서 Figs. 3 ~ 5의 토크 및 속도제어 구간에서 운전자 요구를 만족하는 제어 목표 값에 대한 계산이 필요하다.

토크 제어 구간에서는 변속하는 모터의 토크($T_{m,shf}$)가 감소한 만큼 반대쪽 구동 모터에서 토크를 보상하게 된다. 반대쪽 모터의 목표 토크($T_{m,drv}$)는 현재단과 목표단의 기어비에 의해 결정되며, 출력축 토크($T_{o,dmd}$)의 변화가 없도록 값이 산출된다. 식 (2) ~ 식 (4)는 토크를 계산하는 과정을 나타내고 있으며 변수(ψ_{tq})를 통해 토크 분배 비율을 제어할 수 있도록 하였다. 해당 값이 ‘0’일 때는 모터 2개의 토크가 함께 작용하게 되며 값이 ‘1’이 되면 변속이 이루어지는 모터는 무부하 상태가 되면서 반대쪽 모터가 모든 요구 토크를 감당하게 된다. ψ_{tq} 값의 상승/하강 기울기를 변경하여 토크제어 Phase에서 토크 변환 속도를 제어할 수 있게 하였다.

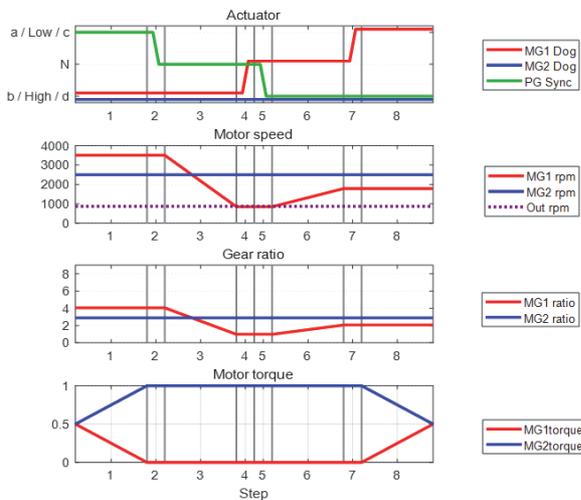


Fig. 5 Range actuator control strategy(3rd → 4th)

$$T_{m,shf} = \psi_{tq} T_{m,shf,dmd} \tag{2}$$

$$T_{m,drv} = -\frac{1}{\psi_{tq}}(r_{m,shf} T_{m,shf} - T_{o,dmd}) \tag{3}$$

$$T_{o,dmd} = r_{shf} T_{shf,dmd} + r_{drv} T_{drv,dmd} \tag{4}$$

속도제어 Phase에서는 식 (5)와 같이 현재 출력축 속도와 변속 전/후 기어비의 관계식으로 목표 속도 값이 산출된다. 변수 ψ_{sp} 를 이용한 내분 공식을 활용하여 속도 변환 비율을 제어할 수 있도록 하였으며, ψ_{sp} 값의 상승/하강 기울기를 변경하여 속도를 제어할 수 있게 하였다.

$$\omega_{m,shf} = (1 - \psi_{sp}) r_{m,pre} + \psi_{sp} r_{m,tar} \omega_o \tag{5}$$

5-Phase 변속인 경우, Phase에 따른 제어변수 ψ_{tq} 와 ψ_{sp} 는 Fig. 6과 같이 출력된다.

다음으로는 E-axle을 제어하기 위한 EACU의 제어로직을 구성하였다. EACU의 제어를 위한 VCU와 MCU사이의 주요 I/O 신호를 Fig. 7과 같이 구성하였다. EACU에

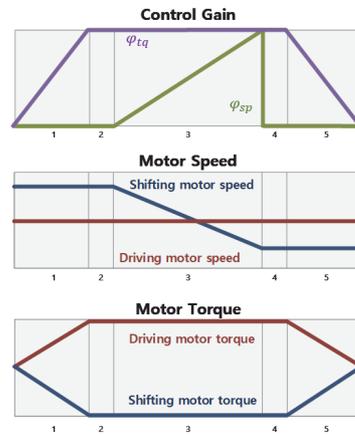


Fig. 6 Control strategy of torque and speed

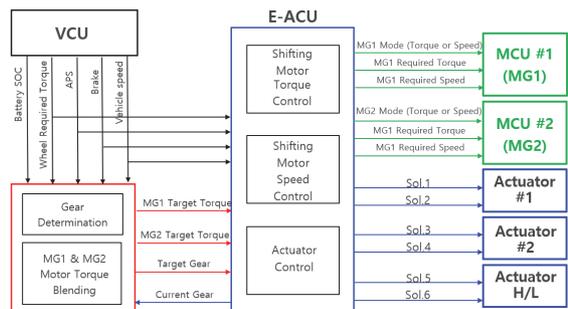


Fig. 7 EACU shifting control architecture

서는 VCU를 통해 들어오는 APS(즉, Driver wheel required torque)를 만족하기 위한 모터와 액추에이터 지령을 출력하게 된다.

Fig. 6을 만족하기 위한 EACU의 제어 로직의 아키텍처를 Fig. 8과 같이 총 13개의 컴포넌트로 개발하였다. 실제 차량 제어기에 적용하기 위하여 Fig. 9와 같이 ASW 수준으로 개발하였고, 10 ms의 이산계 모델로 구성하였다. Virtual sensor는 EACU Input/ Output 신호를 처리하는 컴포넌트로서 센서로 계측되지 않는 제어 요소 값들을 물리적인 개념을 활용하여 계산하고 있다. Vehicle state에서는 VCU를 통해 들어오는 운전자의 요구 및 차량의 상태를 판단한다. Transmission mode decision을 통해서 변속기의 모드를 결정한다. Transmission target torque determination는 운전자의 요구에 따른 모터의 타겟토크를 결정한다. Transmission learning에서는 변속기 학습과 관련된 작업을 수행한다. Transmission gear selection을 통해서 운전자의 변속신호/최적기어단/물리적으로 불가능한 기어단제한/외부요청 변속단의 우선순위를 판단하여 타겟 기어단을 출력하고, Transmission shifting coordinator에서 전체적인 변속 시퀀스를 총괄한다. 변속과정에서의 MG1/MG2 모터의 타겟토크를 Transmission motor torque distribution 컴포넌트에서 결정한다. EOP Control은 MOP에서 냉각유량이 부족시에 EOP가 작동하도록 구성되어 있다. Gear box control에서는 변속신호에 따라 액추에이터의 타겟신호 출력 및 액추에이터 타겟 위치에 따른 솔밸브 작동 신호를 출력하며, Transmission

motor control에서는 변속신호에 따라 속도 및 토크 컨트롤 수행과 변속과정에서 토크 단절이 이루어지지 않도록 제어로직이 구성되어 있다.

4. 차량 시뮬레이션 및 실차 검증

연구대상 차량은 40톤급 수소 전기 트럭이며, 한국자동차연구원의 차대동력계를 활용하여 차량주행시험을 수행하였다. (Photo. 1 참조)

이상과 같이 구성된 E-axle 변속 제어로직인 ASW를 차량제어기에 적용하여 차량 주행을 수행하였다. 전진 1단에서 6단까지 변속을 수행하였으며, 차량시험 환경에서는 운전자의 APS에 따른 Wheel required torque를 만족하도록 제어를 수행하고 있다. 그 결과를 Figs. 10 ~ 12에 나타내었다. Figs. 3 ~ 5에서 제안한 Control strategy에 따



Photo. 1 Vehicle test environment

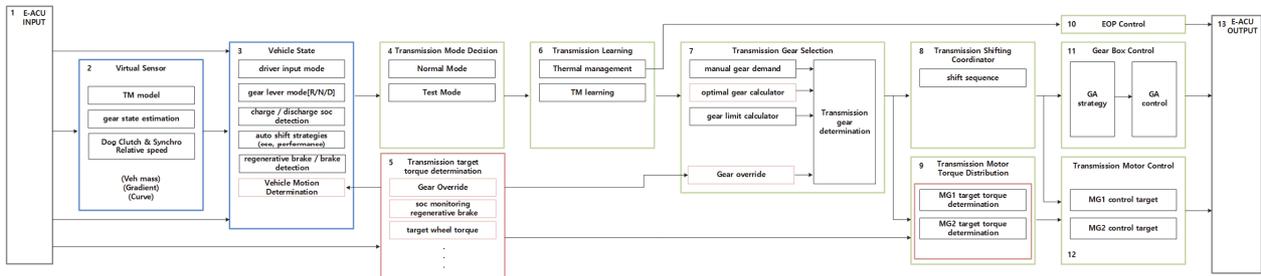


Fig. 8 EACU Control logic architecture

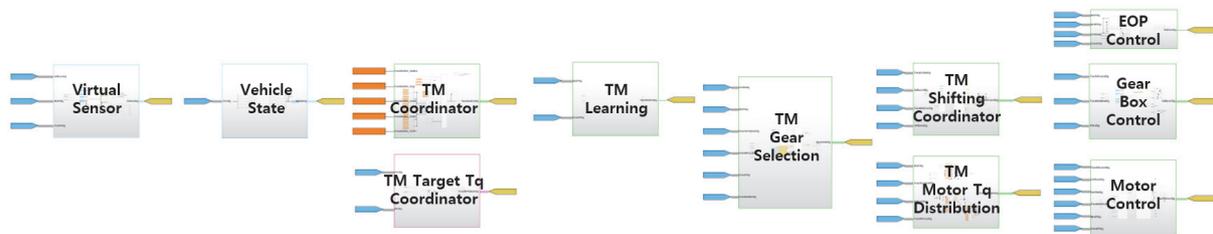


Fig. 9 EACU application software(MATLAB Simulink)

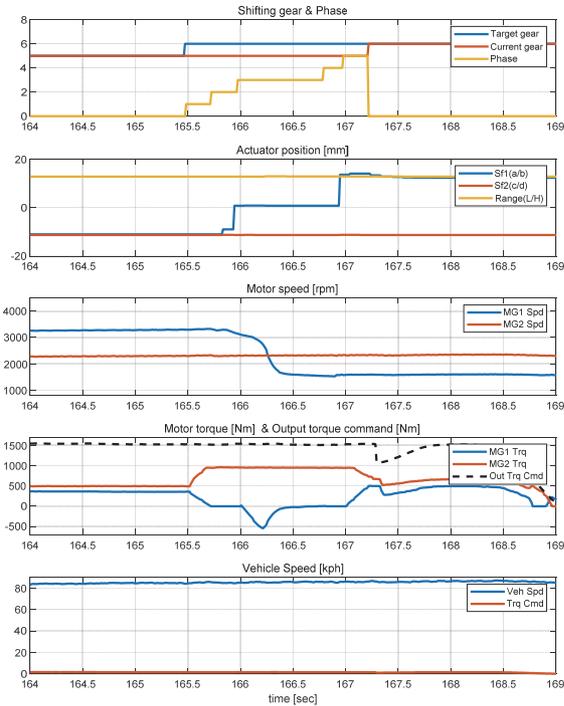


Fig. 10 Test result of MG1 shifting(4th → 5th)

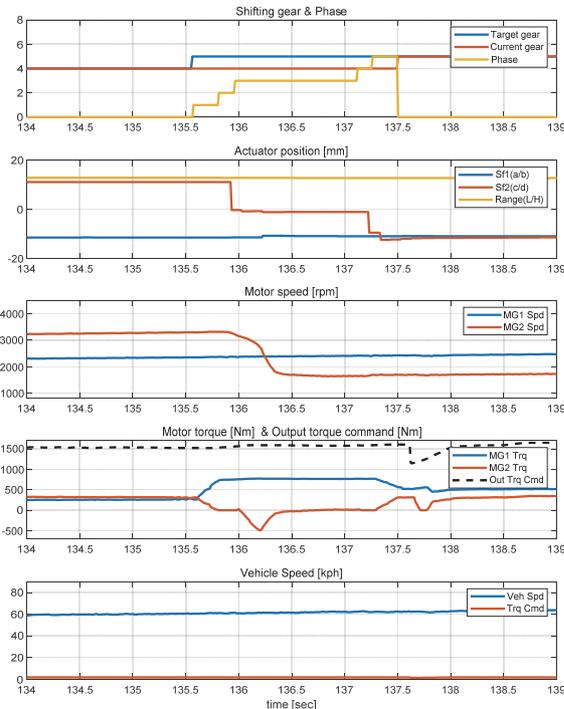


Fig. 11 Test result of MG2 shifting(5th → 6th)

른 시험 결과를 나타내고 있다. MG1/MG2 변속시 5 Phase, Range 변속시 8 Phase로 변속을 수행하고있으며, Target gear 요청에 따라 각 Phase에 맞춰 모터토크 및 속

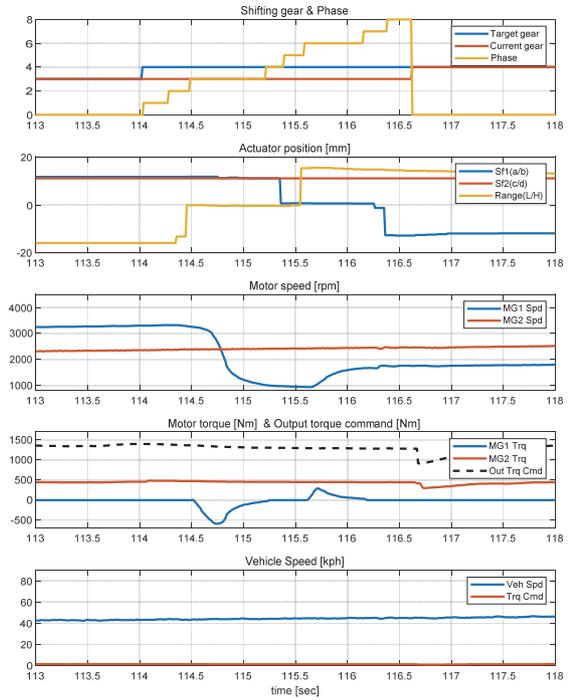


Fig. 12 Test result of Range shifting(3rd → 4th)

도제어, 액추에이터 제어가 전략과 동일하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이때 Vehicle speed는 변속 중임에도 단절 없이 지속적으로 증가하고 있는 결과를 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 듀얼 모터가 장착된 E-axle 시스템의 제어전략 및 ASW를 개발하여 변속 중 동력단절감이 없이 변속하는 방법을 고안하였다. 차량제어기에 ASW를 적용하여 실차시험을 통해 주행성능 결과를 확인하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) E-axle 변속 제어 시스템의 제어전략에 따른 ASW를 개발하여 실제차량 제어기에 적용 가능한 수준으로 개발하였다.
- 2) 개발된 ASW를 Phase 별로 운전자의 요구에 따라 모터 토크 보상 및 속도 제어, 액추에이터 제어가 이루어지고 있으며, 실차에서의 변속성능 검증을 하였다.
- 3) 개발된 제어로직을 활용하여 실차에서 주행하였을 때, 동력단절감 없는 변속을 수행하는 결과를 확인하였다.

후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20011886).

References

- 1) D. J. Kim, H. C. Jung, K. C. Oh and J. W. Kim, "Fuel Economy Performance Analysis of EV Transmission," Korean Society of Automotive Engineers 2013 Daejeon-Chungcheong Branch Spring Conference, pp.133-139, 2013.
- 2) D. H. Park, L. Y. Yang and N. W. Kim, "Integrated Shifting Control Strategy of Shifting Actuator and Traction Motor for 2-Speed Electric Vehicle," KSAE 2018 Annual Autumn Conference & Exhibition, p.1188, 2018.
- 3) K. H. Kwon and S. G. Min, "Multi-objective Optimization of Motor Torque Distribution and Gear Ratios for Electric Vehicles with Two-motor and Two-speed Powertrain System," KSAE 2019 Fall Conference & Exhibition, p.1226, 2019.
- 4) H. S. Kim, W. S. Lim, "Optimization of the Shifting Point and Torque Blending Logic of Dual Motor Equipped FCEV E-axle for Minimizing Power Consumption," Transactions of KSAE, Vol.31, No.8, pp.653-660, 2023.
- 5) J. Y. Park, J. W. Lee and S. W. Heo "Study on Control Algorithm Development of Front Wheel Driven Dual Motor Torque Vectoring System and Handling Performance Evaluation," Transactions of KSAE, Vol.27, No.4, pp.301-308, 2019.
- 6) H. S. Kim, W. S. Choi, W. S. Choi and W. S. Lim, "Energy Optimization through Operating Mode and Motor Torque Control for Electric Vehicles Equipped with 2-Motor and 2-Transmission," Transactions of KSAE, Vol.29, No.5, pp.477-483, 2021.