

듀얼모터가 적용된 수소전기차량용 E-axle의 전력 소모량 최소화를 위한 변속 시점 및 토크 분배 로직의 최적화

김 한 솔 · 임 원 식*

서울과학기술대학교 일반대학원 자동차공학과

Optimization of the Shifting Point and Torque Blending Logic of Dual Motor Equipped FCEV E-axle for Minimizing Power Consumption

Hansol Kim · Wonsik Lim*

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
(Received 17 July 2023 / Revised 24 July 2023 / Accepted 24 July 2023)

Abstract : As environmental regulations are strengthened around the world, the application of eco-friendly vehicles such as electric vehicles is expanding in the existing small vehicle models. In addition, since commercial vehicles generate a lot of exhaust gas, the importance of technology development for eco-friendly electric vehicles is on the rise. In this paper, a 6-speed transmission exclusively for electric vehicles applied with dual motors was analyzed. The two motor output shafts installed in this system have different gear ratios for each shift stage, so the load level for each motor is different according to the shift stage. To minimize energy consumption, torque distribution between the two motors and control for optimizing shift timing are required. In this paper, a method for optimal power control of the developed E-axle system was derived and verified by simulation.

Key words : FCEV(수소전기자동차), Transmission(변속기), E-axle(일체형 구동모듈), Torque distribution(토크 분배), Powertrain(파워트레인), Energy optimization(에너지 최적화)

Nomenclature

T	: torque, Nm
ω	: rotational speed, rad/s
V	: vehicle speed, m/s
F	: driving force, N
P	: power, W
η	: efficiency
MG	: electric engine (motor & generator)
r	: gear ratio
r_m	: torque distribution ratio
G	: shifting gear stage
I	: inertia, kg*m ²

1. 서론

전 세계적으로 환경규제가 강화됨에 따라 기존 소형 차종에서는 전기자동차 등 친환경 차량 적용이 많이 확대되고 있다. 또한 중대형 상용차의 경우에는 배기가스 발생량이 많기 때문에 친환경 전기자동차에 대한 기술 개발 중요성이 더욱 대두되고 있으며, 수소 전기 상용 차량 개발이 활발히 진행되고 있다. 상용 차량의 경우 화물적재량에 따라 요구 구동 토크 값이 큰 폭으로 변화한다. 주어진 모터를 이용하여 보다 높은 차속과 큰 구동 토크를 발생시키기 위해서는 변속기가 적용된 구동 시스템 개발이 필수적이라 할 수 있다. 이러한 다단의 변속기를 적용하면 구동 성능뿐만 아니라 연비 성능도 높일 수 있다.¹⁾

*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.

전기자동차에서는 싱글모터에 별도의 마찰 클러치 없이 싱크로나이저 또는 도그클러치만으로 구성된 변속기 시스템이 고려되기도 하지만,²⁾ 이러한 시스템은 변속 중 토크 단절로 인해 승차감이 저하되는 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해 듀얼 모터를 적용하면서도 각 모터에 서로 다른 고정 감속비를 적용하여 변속 특성을 구현하는 시스템도 고안되고 있다.^{3,4)} 하지만 중부하 차량의 경우에는 주행 및 부하의 범위가 넓기 때문에 다단 변속기의 적용이 요구된다. 본 연구진은 토크 단절 개선과 다단 변속을 구현하기 위해, 듀얼 모터에 서로 다른 2단 변속기를 적용한 4단 변속 시스템에 대하여 선행 연구를 수행한 바 있다.⁵⁾ 중부하 차량에서는 저단에서 높은 감속비가 요구되는데, 이때 기어비 증가로 인한 단분할비 증가는 변속 시의 모터 속도 변화량을 증가시켜 변속소요시간을 증가시키므로, 더 많은 변속단의 변속 시스템을 필요로 한다.

본 연구에서는 듀얼 모터가 적용된 수소전기 중부하 트럭 전용 6단 변속기에 대하여 분석하였다. 연구대상 시스템은 AMT와 유사한 방식이지만 E-Axle 시스템에 듀얼 모터가 적용되어 한쪽 모터에서 동력단절이 발생하더라도 다른 모터에서 토크를 보상하여 변속 단절감이 나타나지 않는 6단 변속기이다. 이 시스템에 장착된 2개의 모터 출력축에는 변속 단수별 기어비가 서로 다르게 구성되어 있기 때문에, 변속 단에 따른 모터별 부하 레벨이 서로 다르므로, 에너지 소모 최소화를 위해서는 두 모터 간 토크 분배 및 변속 시점 최적화 제어가 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 신규 개발된 E-axle 시스템의 최적의 동력제어를 위한 방안을 도출하고 시뮬레이션 검증하였다.

2. 파워트레인 시스템 모델링

2.1 파워트레인 구조 및 차량 제원

연구대상 차량의 파워트레인 시스템은 Fig. 1과 같이 2개의 모터가 적용되어 있는데, MG1 독립 구동 시 4단 변속, MG2 독립 구동 시 3단 변속이 이루어지는 시스템으로 구성되어 있다. 또한 MG1과 MG2를 동시에 작동

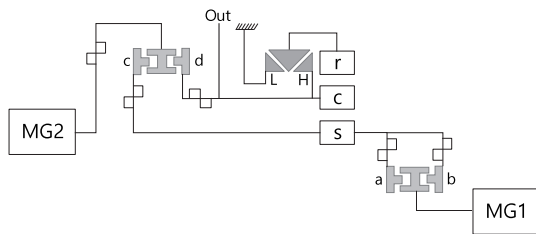


Fig. 1 Configuration of powertrain system

Table 1 Operating mode of shifting system

Gear	MG2	Clutch						MG1
	Ratio	c	d	Low	High	a	b	Ratio
1	r2	●		●		●		r1
2		●		●			●	r3
3	r4		●	●			●	
4			●		●	●		
5	r6	●			●	●		r7
6		●			●		●	

Table 2 Vehicle specifications and performance

Vehicle weight	40,000 kg	Chassis structure	6×2
Max. Power	460 kW	Max. Driving force	12 kN
Max. Speed	160 km/h	Climbing performance	30 %

시키면 6단의 변속비 조합을 생성할 수 있다. 따라서 본 연구 대상 시스템은 Single 모터 작동 모드 7개, Dual 모터 작동 모드 6개로서 총 13개의 변속 모드를 가질 수 있다. MG1 및 MG2에 각각 2단 변속기/도그 클러치 장치가 적용되어 있고 출력단의 유성기어에는 2단 변속기/싱크로 장치가 적용되어 있다.

본 연구 대상 시스템은 모터와 클러치의 작동 조합에 따라 Table 1은 듀얼 모터기준 작동모터를 기준으로 변속단을 정의하였다. 클러치 3개의 조합에 의해 변속단이 결정되는 시스템이다.

연구대상 시스템의 차량 제원은 Table 2와 같다.

2.2 구동시스템 모델링

Fig. 2는 Fig. 1의 연구 대상 시스템의 동적 모델링 결과를 나타내고 있으며, 시스템의 운동방정식은 (1)~(6)과 같이 정리할 수 있다.

$$I_{m1}\dot{\omega}_{m1} = T_{m1} - T_b - T_a \tag{1}$$

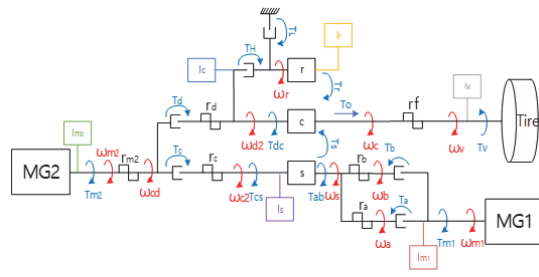


Fig. 2 Dynamic modeling of powertrain system

$$I_{m2} \dot{\omega}_{m2} = T_{m2} - \frac{T_d + T_c}{r_{m2}} \quad (2)$$

$$I_c \dot{\omega}_c = T_d - T_H + T_r + T_s - T_o \quad (3)$$

$$I_s \dot{\omega}_s = r_c T_c - \frac{T_b}{r_b} - \frac{T_a}{r_a} \quad (4)$$

$$I_r \dot{\omega}_r = T_L + T_H - T_r \quad (5)$$

$$I_v \dot{\omega}_v = r_f T_o - T_v \quad (6)$$

2.3 구동원 성능 모델링

시스템에 장착된 두 모터는 동일한 사양으로서, 최대 토크 약 1,300 Nm, 최대속도 4,000 rpm, 최대파워 230 kW의 출력 성능을 가지고 있다. 작동 영역에서의 효율 분포는 Fig. 3과 같으며, 모터의 전기적 소모 파워를 표현하면 식 (7), (8)과 같다.

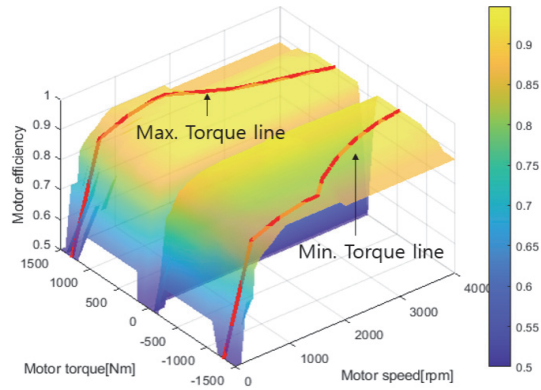


Fig. 3 Efficiency characteristics of motor

$$\omega_m T_m = P_{m.mech} = \eta_m P_{m.elec} \quad (P_m < 0) \quad (7)$$

$$\omega_m T_m = P_{m.mech} = \eta_m^{-1} P_{m.elec} \quad (P_m > 0) \quad (8)$$

3. 소모에너지 최소화를 위한 주행전략

3.1 모터 토크 분배비 정의

연구대상 시스템의 MG1과 MG2 모터에는 각각 서로 다른 기어비의 변속기가 장착되어 있다. 기어비가 다르기 때문에 두 모터 변속 단에 따라 서로 다른 작동 점을

갖는다. 출력축 토크는 Fig. 4와 같이 MG1과 MG2 모터의 출력토크에 각 변속단의 기어비가 적용되어 합쳐진다. 토크 분배비는 식 (9)와 같이 MG1+MG2 합산토크와 MG1 토크의 비율로 정의되는데, 식에서 토크 분배비 ‘1’은 MG1 모터 단독구동, ‘0’은 MG2 모터의 단독구동 모드를 나타낸다.

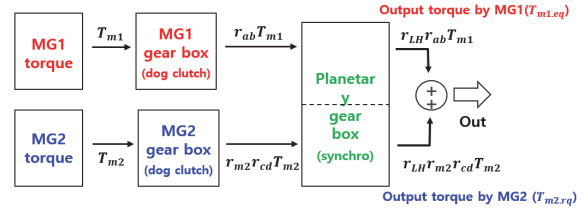


Fig. 4 Definition of motor torque distribution ratio

$$r_m = \frac{T_{m1}}{T_{m1} + T_{m2}} \quad (9)$$

3.2 변속단 및 토크분배비에 따른 전력소모량 분석

Fig. 5는 연구대상 시스템의 구동력 선도를 보이고 있는데, 각 모터와 기어조합에 따른 7개의 구동력 선도와 최종적인 합산 구동토크를 나타내고 있다.

차속 50 km/h, 구동력 11 kN의 구동조건을 기준으로 구동력을 조합하여 분석한 기어 단별 모터 작동 점이 Figs. 6~8과 Table 3과 같이 나타난다. Fig. 5의 구동조건(합산 구동토크 11 kN)에서 하나의 모터가 많은 토크를 감당하게 되면 다른 모터에서 감당하는 토크가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이때 두 모터의 토크 분배 값은 각각의 모터에 장착된 변속 기어비에 따라 결정된다.

Table 3를 보면 모든 작동점을 분석했을 때, 변속 단 및 모터 토크 분배비에 따라 배터리 소모량이 다른 결과를 보이고 있다. 변속 단 4단, 토크 분배비 0.75일 때 소

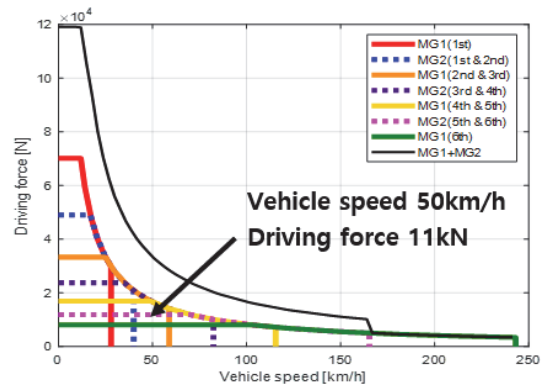


Fig. 5 Driving force of vehicle

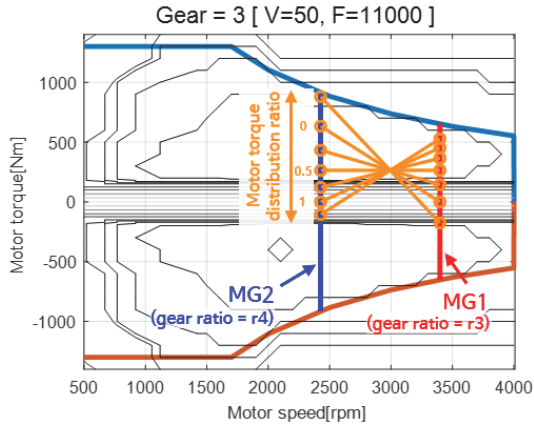


Fig. 6 Operating points with variation of motor torque distribution ratio (3rd. gear)

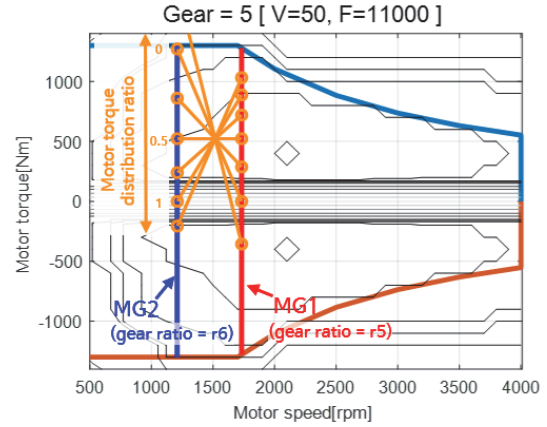


Fig. 8 Operating points with variation of motor torque distribution ratio (5th. gear)

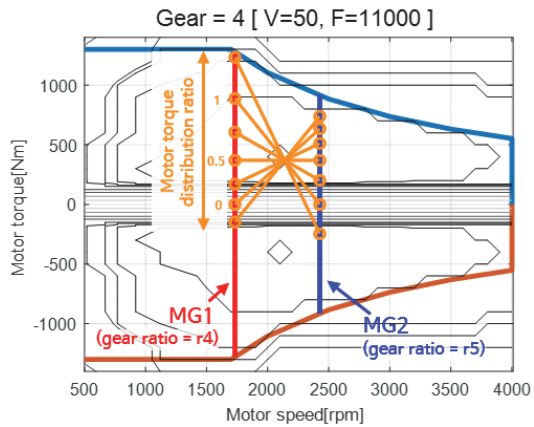


Fig. 7 Operating points with variation of motor torque distribution ratio (4th. gear)

모 파워합이 172 kW으로 배터리 소모량이 가장 낮게 나타나고 있고, 해당 구동 조건에서의 최적 단과 분배비를 결정할 수 있다.

3.3 최적 기어단 및 작동모드 결정

3.2절의 내용을 통해, 모든 속도 및 구동력 영역에 대해 모터 토크 분배비에 따라서 최적의 기어 단 및 구동력의 범위가 달라지는 특성을 확인할 수 있다.

출력축 기준의 요구속도 N 과 요구 토크 F 가 주어지면, 최소 소모 파워 P^* 를 결정하기 위한 최적 기어 단 G 와 토크 분배비 r_m 를 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{elec.V.F}^*(V,F) = \min_{(G,\gamma_m)} \left[P_{m1.elec}(N,T,G,\gamma_m) + P_{m2.elec}(N,T,G,\gamma_m) \right] \quad (10)$$

위 식을 통해 모든 속도와 구동력 영역에 대해 최적 변속 단 및 모터 토크 분배비를 구하였다. Fig. 9 변속 단 최적화 결과이고, Fig. 10은 모터의 토크 분배비 최적화 결과를 나타낸다. Fig. 10을 보면 요구 구동력이 낮은 구간에서 모터의 최적 토크 분배비가 0 또는 1이 나오는 구간이 존재하는데, 이런 경우는 식 (9)에 의해서 단일 모터 주행의 경우에 해당하며, 효율 측면에서 단일모터 주행이 유열 모터 주행보다 유리한 구간도 존재하는 것을 의미한다.

Table 3 Energy consumption according to torque distribution ratio (vehicle speed 50 km/h and driving force 11 kN)

Torque ratio	3 rd gear					4 th gear					5 th gear				
	MG1 Tq.	MG2 Tq.	MG1 Eff.	MG2 Eff.	Elec. Power	MG1 Tq.	MG2 Tq.	MG1 Eff.	MG2 Eff.	Elec. Power	MG1 Tq.	MG2 Tq.	MG1 Eff.	MG2 Eff.	Elec. Power
-0.25	-176	879.9	0.92	0.92	184.9	-147.8	738.9	0.9	0.93	177.9	-356.2	1780.9	0.94	-	-
0	0	633.5	0.5	0.93	173.1	0	633.5	0.5	0.93	173.1	0	1270.9	0.5	0.91	176.9
0.25	144	431.9	0.89	0.93	175.7	170.6	511.7	0.92	0.93	173.5	286.7	860.2	0.93	0.92	174.4
0.5	263.9	263.9	0.93	0.93	173.1	369.6	369.6	0.94	0.93	172.6	522.5	522.5	0.94	0.93	172.1
0.75	365.4	121.8	0.93	0.84	176.5	604.9	201.6	0.94	0.93	171.9	719.9	240	0.93	0.93	172.7
1	452.4	0	0.93	0.5	173.1	887.4	0	0.93	0.5	173.1	887.4	0	0.93	0.5	173.1
1.25	527.8	-105.6	0.93	0.81	180.2	1232.9	-246.6	0.92	0.93	185.7	1031.5	-206.3	0.92	0.93	179.1

* Units: Torque(Nm), Power(kW)

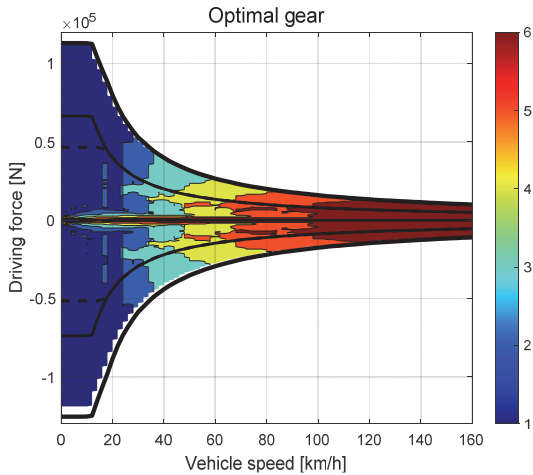


Fig. 9 Optimal gear step

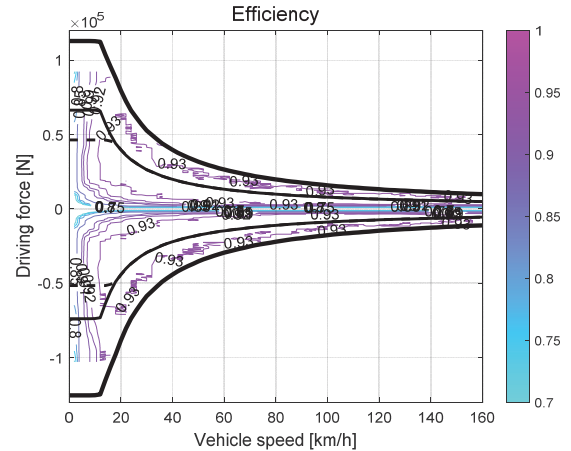


Fig. 11 Powertrain efficiency (equal torque distribution ratio)

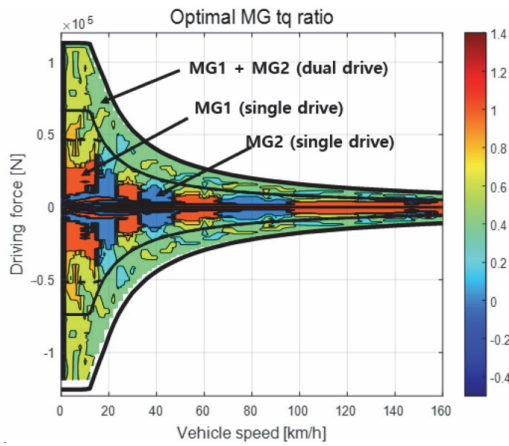


Fig. 10 Optimal distribution ratio of motor torque

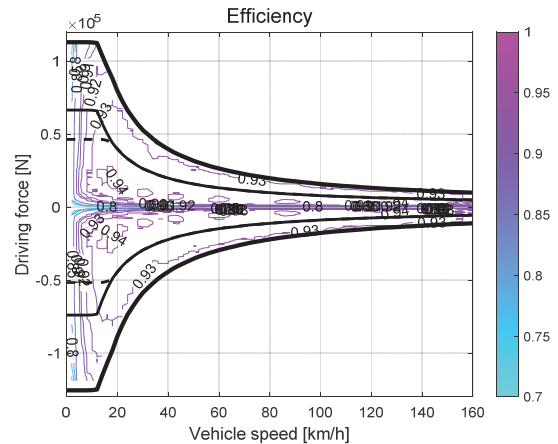


Fig. 12 Powertrain efficiency (optimal torque distribution ratio)

3.4 에너지 최적화 분석 결과 비교

에너지 최적화 결과를 비교하기 위해, 모터의 토크 분배비를 0.5로 고정한 경우와 식 (10)을 통해 얻은 최적 토크 분배비를 적용한 경우의 두 효율을 비교하였다.

Fig. 11은 모터 토크 분배비를 0.5로 고정하였을 때 차속과 구동력에 따른 효율 분포를 나타내고 있다. 에너지 최적화를 통해 토크 분배비를 결정하면 Fig. 12와 같은 효율 분포가 나타나는데, 토크 분배비를 0.5로 고정하였을 때보다 특히, 저부하 영역에서 고효율 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4. 주행 시뮬레이션 및 제어 성능 검증

4.1 해석 모델 구성

3장에서 도출된 최적 토크분배비의 성능을 검증하기 위해서 성능 시뮬레이션을 수행하였다. 해석모델은 모터, 배터리, 변속기, 차량 주행 부하계 및 운전자 모델, 모터 제어기, 변속 제어기 등으로 구성되어 있으며, Fig. 2의 파워트레인 시스템을 Fig. 13과 같이 MATLAB Simulink를 활용하여 구성하였다.

4.2 파워트레인 제어 모델

Fig. 9에서 도출한 최적 기어 단은 이상적으로 도출된 결과이기 때문에 해당 맵을 변속 단 제어 로직에 적용하게 되면 잦은 변속 현상이 발생할 우려가 있다. 이를 방

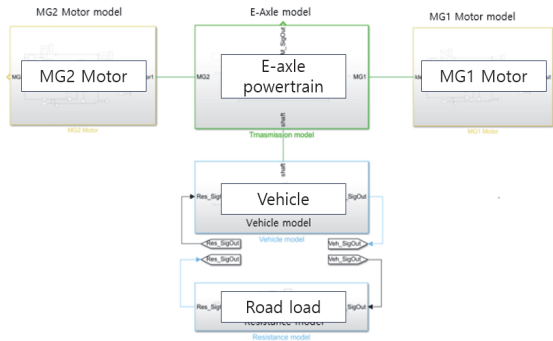


Fig. 13 Simulation model of E-axle

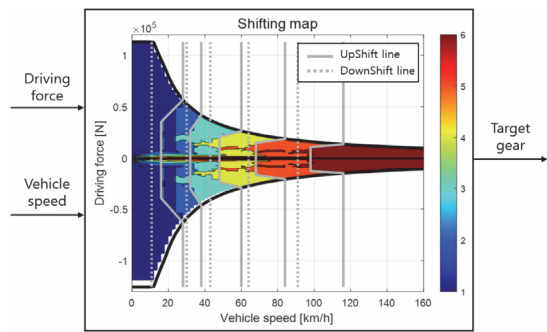


Fig. 14 Shifting control strategy

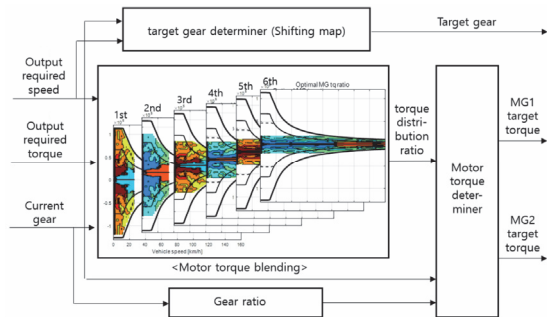


Fig. 15 Motor torque control strategy

지하기 위하여 변속 제어 모델에서는 Fig. 14와 같이 상단 변속 라인을 설정하고 일정 범위의 히스테리시스를 적용하여 하단 변속 라인을 설정하였다.

모터 토크 분배 로직은 Fig. 15와 같이 출력축의 요구 속도와 토크가 주어졌을 때 현재 체결되어있는 기어 단을 기준으로 최적의 토크 분배비를 결정하게 되며, 식 (11) ~ (12)를 통해 각 모터의 토크를 결정할 수 있도록 하였다.

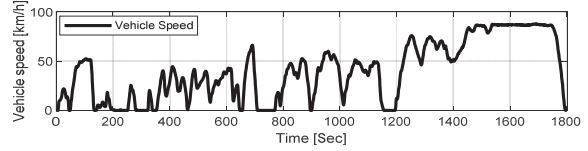


Fig. 16 Commercial vehicle driving cycle (WHVC)

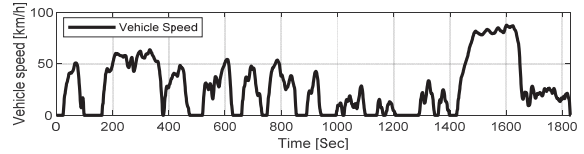


Fig. 17 Commercial vehicle driving cycle (JE05)

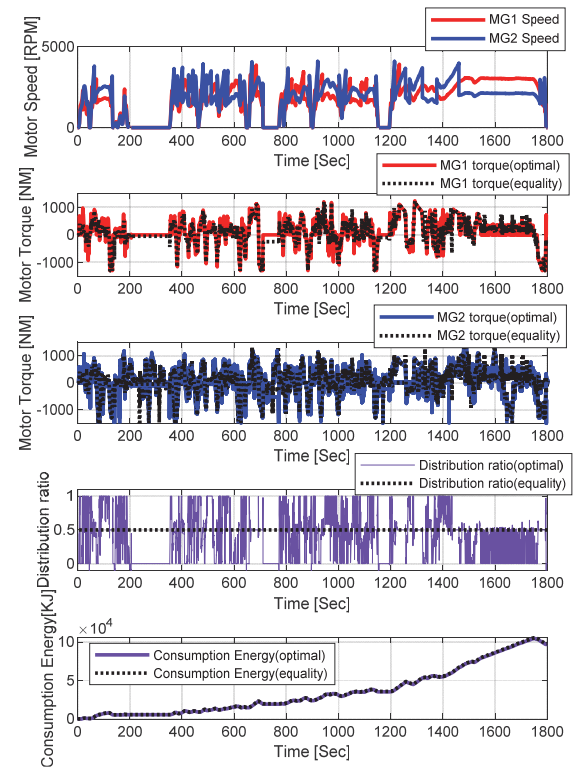


Fig. 18 Driving simulation results (WHVC)

$$T_{m1}^* = T_o^* / (r_{m1} + (r_{m2}(1-\gamma_m)) / \gamma_m) \quad (11)$$

$$T_{m2}^* = T_o^* / (r_{m2} + (r_{m1}\gamma_m) / (1-\gamma_m)) \quad (12)$$

4.3 시뮬레이션 결과

연구대상 차량은 40톤급 수소 전기 트럭이며, 상용 주행 모드 중 하나인 WHVC 및 JE05 주행 모드에 대해 전력 소모량을 시뮬레이션하였다.

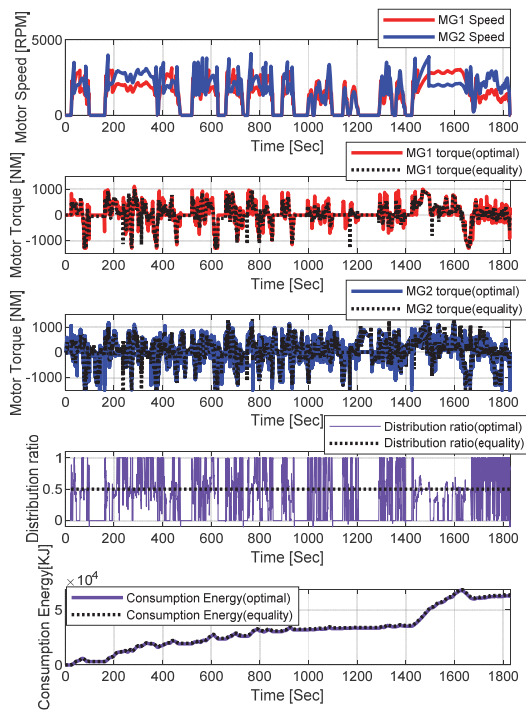


Fig. 19 Driving simulation results (JE05)

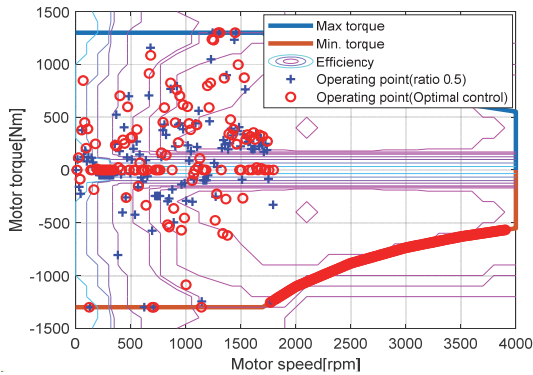


Fig. 20 MG1 motor operating points (WHVC)

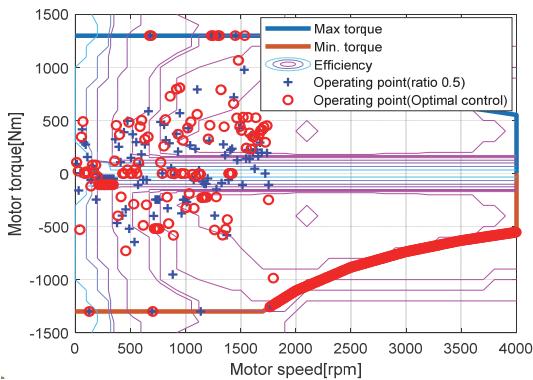


Fig. 21 MG2 motor operating points (WHVC)

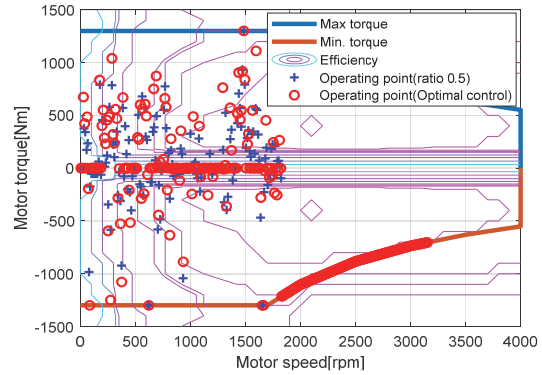


Fig. 22 MG1 motor operating points (JE05)

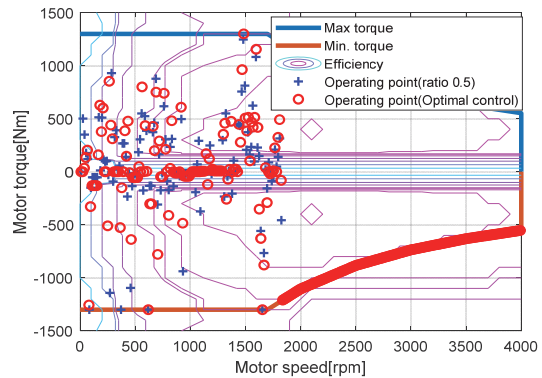


Fig. 23 MG2 motor operating points (JE05)

Table 4 Energy consumption

Case	Equality distribution (km/kwh)	Optimal distribution (km/kwh)	Improvement rate
WHVC	0.736	0.742	0.90 %
JE05	0.790	0.806	2.12 %

각 주행사이클에 대해 MG1과 MG2의 토크 분배비를 0.5로 고정된 경우와 토크 분배비 최적화 제어를 하였을 때의 결과를 Fig. 18, Fig. 19에 도시하였다. Figs. 20 ~ 23 은 각 모터의 작동점을 나타내고 있다. 최적화 제어를 한 경우 모터의 작동점이 효율이 더 높은 영역으로 이동 하였으며, 두 주행 사이클에서 모두 전력 소모량이 감소 하는 효과를 확인할 수 있었다. 전력 소모량 비교 결과는 Table 4와 같다.

5. 결론

본 연구에서는 듀얼 모터가 장착된 전기구동 변속기 시스템의 소모에너지를 최소화하는 방법을 고안하였다. 두 모터 간의 토크 분배비와 변속 시점 최적화 제어

를 통해 전력 소비를 최소화하였다. 시뮬레이터를 구성하여 제어성능을 검증하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 상용 전기자동차 전용 변속기 시스템에 대한 성능 모델을 개발하고 전력 소모량 최소화를 위한 변속 단 및 토크 분배비를 도출하였다.
- 2) 변속로직 및 모터 토크분배 로직을 구성하고 차량 주행 시뮬레이터를 통해 상용 차량 주행사이클(WHVC, JE05)에 대한 성능 해석을 수행하였다.
- 3) 토크분배비 0.5로 고정했을 때의 전력 소모량 보다 최적화 로직을 적용했을 때의 전력소모량이 감소하였는데, WHVC에서는 0.9 %, JE05에서는 2.12 % 나타났다.

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 and 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 Annual Autumn Conference and Exhibition, p.1226, 2019.
- 4) 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.
- 5) 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.