



변속기 효율을 고려한 자동변속기 변속선도의 설계

한재훈 · 정호운 · 황성호*

성균관대학교 기계공학과

Design of Gear Shift Map for Automatic Transmission considering Transmission Efficiency

Jae-Hoon Han · Ho-Un Jeong · Sung-Ho Hwang*

Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 16419, Korea

(Received 22 March 2019 / Revised 24 April 2019 / Accepted 10 May 2019)

Abstract : In accordance with strict fuel efficiency regulations, automobile manufacturers are currently focusing on research and development methods, such as shift map design, for the improvement of fuel efficiency. Traditional eco-shift maps mainly consider only the engine operation efficiency, but mostly ignore the power loss of the transmission. In the case of automatic transmissions, losses in the transmission have a significant impact on fuel economy. This paper suggests a gear shift map design method that considers the effectiveness of an automatic transmission for an enhanced fuel efficiency. A simulator using a parallel hybrid vehicle model and an automatic transmission efficiency analysis model were developed in order to examine the effect of the new eco-shift map. When applying the newly proposed shift map in urban and highway driving cycles, the overall fuel efficiency was improved by 3~4 % as compared to the traditional eco-shift map.

Key words : TMED hybrid electric vehicle(TMED 하이브리드 차량), Automatic transmission shift map(자동변속기 변속선도), Transmission power loss analysis(변속기 손실해석), Fuel efficiency(연비), Efficiency analysis simulator(효율 해석 시뮬레이터)

Nomenclature

FC : equivalent fuel consumption, L

m_{fuel} : gasoline fuel consumption, kg

SOC : battery state of charge, -

ρ_{fuel} : density of fuel, kg/m^3

$Q_{battery}$: capacity of battery, kWh

E_g : equivalent energy, kWh/L

T : total drag torque, Nm

T_{fa} : drag torque due to ATF film in continuous section, Nm

T_{ra} : drag torque due to ATF film in ruptured section, Nm

T_{rm} : drag torque due to mist film in ruptured section, Nm

r_i : inner radius of clutch plate, mm

r_o : outer radius of clutch plate, mm

r^* : critical radius, mm

N : number of frictional interface, -

μ : dynamic viscosity, cSt

$\tau_{z\theta}$: shear stress acting on the disk, Pa

$\Phi(r)$: ruptured section with respect to the full ATF film, -

1. 서론

변속기는 입력되는 동력의 힘과 속도의 분배비를 상황에 맞게 변화시켜 운전성능과 연비를 향상시키는 동력 전달장치이다. 초기의 변속기는 엔진의 저속 회전 구간에서 부족한 토크를 증폭시키기 위해 사용되었지만 출발시에 토크가 부족한 문제가 해결된 이후에는 연비 향상을 고려한 전략이 적용되고 있다.

자동변속기의 경우, 오일의 순환을 통해 동력을 전달하기 때문에 동력손실이 수동변속기에 비해 크다. 이러한 이유로 자동변속기의 동력손실을 최소화하기 위해 다

*Corresponding author, E-mail: hsh0818@skku.edu

* 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.

양한 전략들이 연구되었고 가장 큰 손실을 유발하는 토크 컨버터의 경우, 전기모터로 동력을 보조하는 하이브리드 시스템이 등장한 이후에는 파워트레인에서 배제함으로써 큰 이득을 취했다.

변속기의 손실을 개선하기 위해 변속전도의 변화도 이루어졌는데 초기의 연비향상 변속전도는 운전성과 연료효율을 모두 반영한 톨 기반의 선도를 활용하였고 1995년에 Bastian은 사람의 판단과정을 모사하는 Fuzzy Logic을 활용한 선도를 사용하였다.¹⁾

친환경 차량 중 가장 많이 보급된 병렬형 하이브리드 차량의 경우 기존의 연비 향상 변속전도는 엔진을 고효율 구간에서 운전시키는 것을 목적으로 설계되었다.²⁾ 하지만 자동변속기의 경우, 변속기에서 손실되는 동력이 크기 때문에 변속단수를 선정할 때 이것을 추가적으로 고려한다면 연비를 더욱 향상시킬 수 있다.³⁾

본 연구는 엔진의 효율만을 고려한 선행연구에서 개선하기 위해 자동변속기의 손실을 고려한 TMED(Transmission Mounted Electric Device) 방식의 하이브리드 차량의 연비를 향상시킬 수 있는 변속전도를 제안하고자 한다. 엔진을 각 rpm에서 최고의 효율로 구동시키기 위해서는 부족한 토크를 보조하거나 과도한 토크를 활용할 수 있는 하이브리드 시스템이 필수적이기 때문에 본 연구의 변속전도는 하이브리드 모드의 선도로 특정하였다. 이를 위해 하이브리드 차량의 연료소비 시뮬레이터 개발과 자동변속기의 구동조건 별 손실 해석을 수행하고 엔진과 변속기의 효율을 통합적으로 고려하여 연비를 향상시키는 선도를 개발한 후 결과를 확인한다.

2. 하이브리드 차량 연비 계산 시뮬레이터 개발

본 논문에서는 대상이 되는 차량 시스템의 모델을 개발하였다. 전체적인 구조를 모듈별로 나누어 모터, 엔진, 브레이크, 배터리, 운전자 모델, 차량동역학 모델, 클러치 제어 모델, 온도모델, 연료소비 모델을 MATLAB/Simulink를 활용하여 개발하였다.

2.1 하이브리드 구조 모델링

본 연구의 대상 차량은 TMED 병렬형 하이브리드 방식이며 클러치가 체결되면 엔진과 모터가 같이 구동되고 클러치 비 체결시 모터만으로 구동하는 구조를 가지고 있다. He 등⁴⁾의 기어맵 최적화 연구에 사용된 시뮬레이터를 참고하여 시스템을 모델링 하였고, Fig. 1은 대상 하이브리드 차량 시스템 모델의 블록선도를 나타낸다.

2.2 연료소비 모델

전체연비를 계산하기 위해 전기 에너지 사용량과 연료 사용량을 통합하였다. 엔진의 속도와 토크를 Brake-specific fuel consumption(BSFC) 선도에 입력시켜 BSFC 값을 출력하고 BSFC 값에 동력을 곱하여 연료 소모량(g)을 계산하였다. 전기에너지 사용량은 식 (1)을 통해 연료 소모량으로 전환하고 합하여 통합 연비를 계산하였다. 이것을 Simulink로 모델링한 결과는 Fig. 2와 같다.

$$FC = \frac{m_{fuel}}{\rho_{fuel}} + \frac{\Delta SOC \times Q_{battery}}{E_g} \quad (1)$$

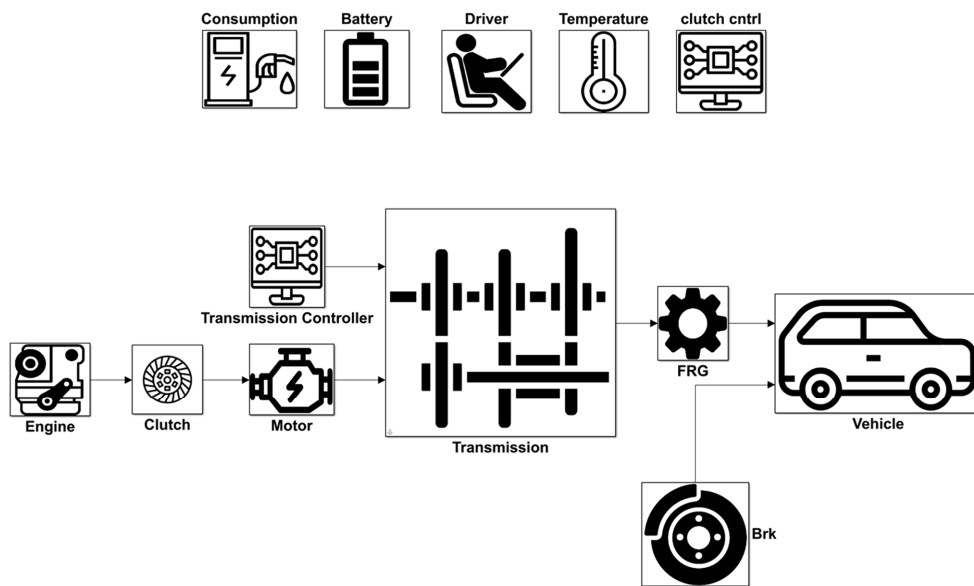


Fig. 1 Block diagram of hybrid electric vehicle system

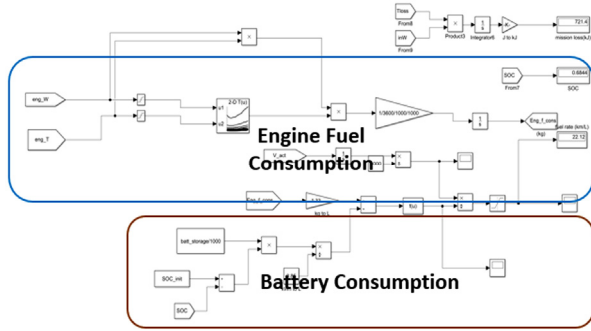


Fig. 2 Energy consumption model

3. 자동변속기 효율 해석 시뮬레이터 개발

이 장에서는 자동변속기에서 발생하는 동력 손실량을 예측하는 시뮬레이터를 소개한다. 먼저 자동변속기를 해석하고 발생할 수 있는 손실 유형을 리스트업하고 부하 손실과 무부하 손실로 나누었다. 이것을 기반으로 각 손실의 수식을 적용시켜 실제 손실 데이터와 비교/검증하였다. 전체적인 효율해석 시뮬레이터의 블록선도는 Fig. 3 과 같다.

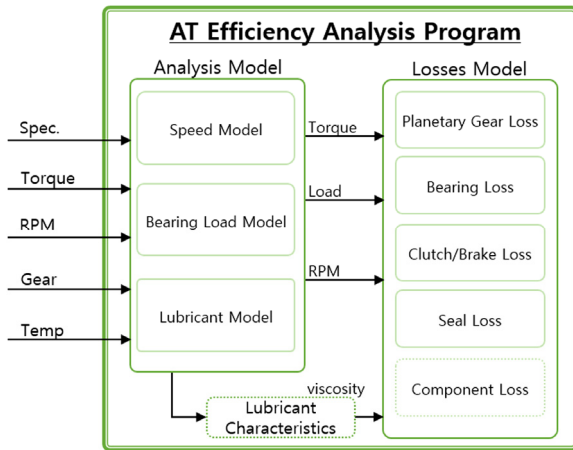


Fig. 3 Block diagram of efficiency analysis program

3.1 자동변속기 토크, 속도 해석

요소별 손실량을 계산하기 위해서는 각 위치에서의 토크와 속도를 알아야 하기 때문에 토크 해석, 속도 해석을 수행하였다. 속도 해석은 유성기어열의 속도 해석에서 가장 많이 쓰이는 레버해석 이론을 적용하였고 토크 해석은 Arnaudov의 토크 해석법⁵⁾으로 각 기어의 작용 토크를 계산하였다. 레버해석으로 각 기어의 속도를 해석한 결과는 Fig. 4와 같다.

3.2 클러치 드래그 토크 손실

클러치는 동력을 전달하고 해제하는 것을 자유롭게

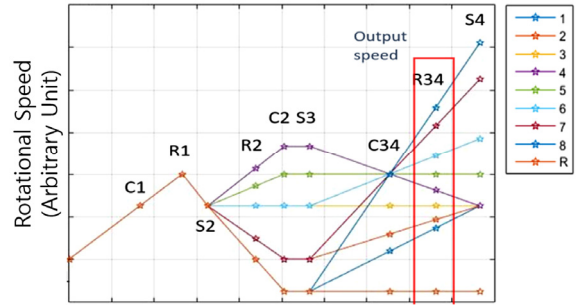


Fig. 4 Result of planetary gear set speed analysis

제어하기 위해 필수적인 요소이지만, 비체결 상태에서 디스크 판 사이에 유체로 인해 드래그 토크가 손실로 발생하게 된다. 본 장에서는 이 드래그 토크를 정량적으로 분석하였다. 오일 미스트로 인한 영향을 계산하지 않은 연구⁶⁾는 고속 구간에서 오차가 발생하기 때문에 가장 많은 요인을 모델링하고 실제 데이터와 유사한 Iqbal의 연구⁷⁾를 활용하여 적용시켰다.

$$T = T_{fa} + T_{ra} + T_{rm} \quad (2)$$

각각의 값은 다음 식으로 계산된다.

$$T_{fa} = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} N \tau_{z\theta} r^2 dr d\theta$$

$$T_{ra} = \int_0^{2\pi} \int_{r_s}^{r^o} N \Phi(r) \tau_{z\theta} r^2 dr d\theta \quad (3)$$

$$T_{rm} = \int_0^{2\pi} \int_{r_s}^{r^o} N(1 - \Phi(r)) \tau_{z\theta} r^2 dr d\theta$$

위의 식을 기반으로 전체 드래그 토크를 시뮬레이터 반영할 수 있는 식으로 정리하면 식 (4)와 같다.

$$T_{fa} = \frac{\pi \mu_{ATF} \Delta w N}{2h} (r_o^4 - r_i^4)$$

$$T_{ra} = \frac{\pi \mu_{ATF} \Delta w N}{2h} (r_o^4 - r_i^4) \quad (4)$$

$$T_{rm} = \frac{2\pi \mu_{ATF} \Delta w N}{h} \int_{r_s}^{r_o} (1 - \Phi(r)) r^3 dr$$

이 식으로 예측한 드래그 토크와 실제 실험에서 측정된 드래그 토크를 비교한 결과는 Fig. 5와 같다.

3.3 전체 효율 검증

Fig. 3의 변속기 손실 해석 프로그램의 검증을 위하여 시뮬레이션 결과를 동일 조건에서의 실험결과와 비교하였다. Fig. 6은 특정 조건에서의 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교 검증한 그래프로 회전속도와 토크 변화에 따라 전체 전달 효율의 오차가 비선형적으로 변화됨을 알 수 있다. 일부 저토크 구간에서 약간의 차이를 보이고 있으나, 전반적으로 유사한 결과를 보여주고 있다. 전체

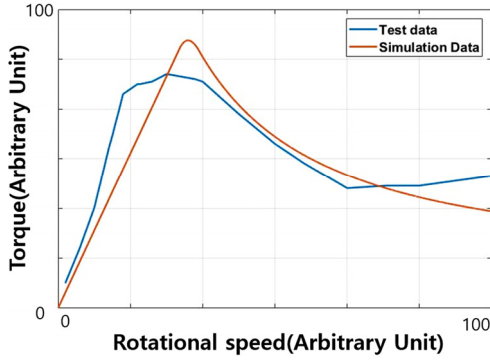


Fig. 5 Drag torque loss comparison

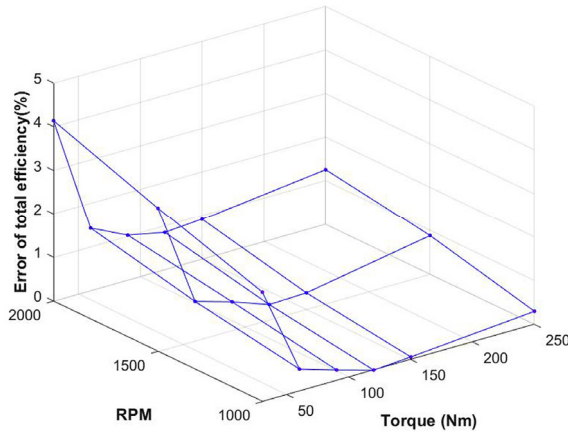


Fig. 6 Comparison of simulation & experimental results

단수의 평균적인 오차는 RMS 오차기준 1.8 %의 정합도로 신뢰성을 확보하였다.

4. 변속기 손실을 활용한 변속맵 도출

자동변속기의 손실을 반영하여 최고 효율점을 기반으로 한 변속맵 선도를 도출하고, 그 효과를 확인하기 위해 기존 방식의 엔진 최고 효율점만을 고려한 알고리즘을 적용시킨 변속맵 선도를 도출하고 비교하였다. 변속맵 선도를 도출하기 위해 구동 조건을 한 단씩 바꿔가며 모든 포인트에서 효율을 계산하되, 요구 동력을 충족시키지 못하는 경우는 제외하였다. 이렇게 같은 조건에서 최고의 효율을 내는 단수를 선정하는 방식으로 변속맵 선도를 도출하였다.

4.1 기존 엔진 효율 기반 변속맵 도출

기존에 언비 향상을 위하여 많이 사용되던 엔진의 효율만을 고려하여 엔진이 고효율점에서 구동되도록 변속 단수를 선정하는 방식으로 변속맵을 도출하였다. 본 논문에서는 방법의 비교를 위하여 실제 변속선도를 사용하지 않고 엔진을 각 구동조건에서 최고 효율로 구동시킬

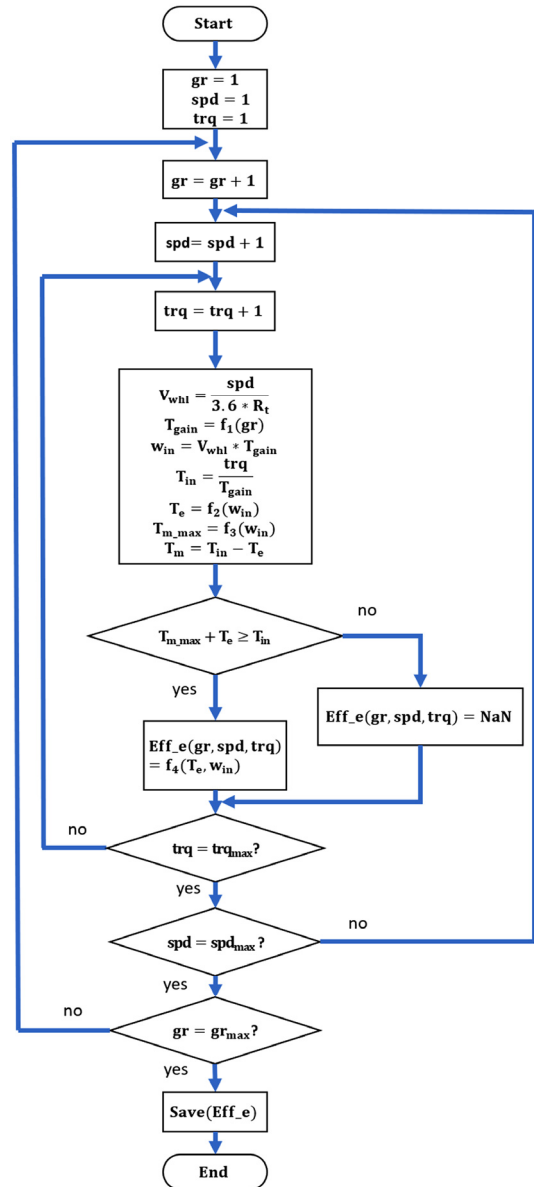


Fig. 7 Flowchart of calculating efficiency

수 있는 변속 선도를 도출하였다. 각 기어별로 모든 차속, 요구 휠 토크에서 엔진의 효율을 계산하여 저장하였으며, 요구 동력을 만족시키지 못하는 경우에는 해당 단수, 차속, 요구 휠 토크에서의 효율을 반영하지 않도록 하였다.

이렇게 저장된 효율들을 분석하여 동일한 차속, 요구 휠 토크에서 가장 높은 효율을 출력하는 단수를 선정하고 이 단수를 해당 차속, 요구 휠 토크에서의 변속단수로 선정하였다. Fig. 7은 변속 알고리즘에 대한 흐름도를 보여준다.

제한한 알고리즘을 통해 각 구동조건에서 최고 효율을 출력하는 단수를 추출하여 만든 변속맵 선도는 Fig. 8과 같다.

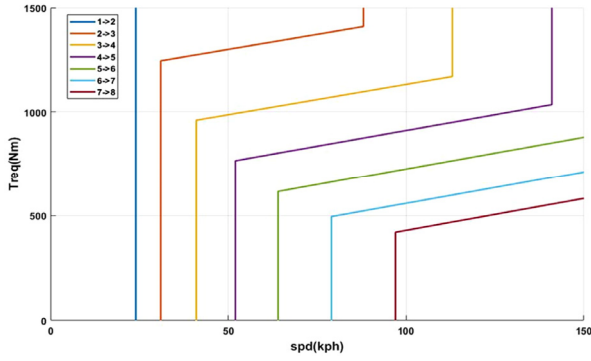


Fig. 8 Shift map considering only engine efficiency

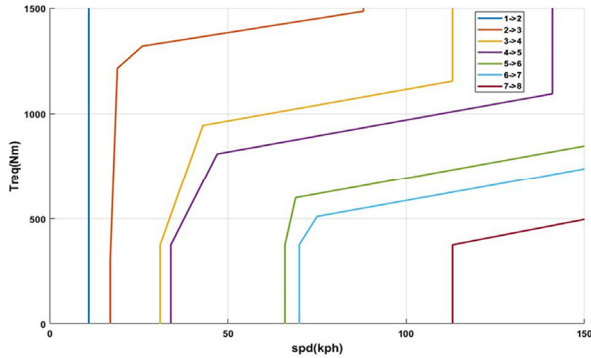


Fig. 9 Shift map considering transmission efficiency

4.2 변속기 효율을 고려한 변속맵 선도 도출

여기서는 단순 엔진 효율만을 고려한 변속선도와와의 비교를 위하여 변속기 효율을 추가적으로 고려한 변속맵 선도를 도출하였다. Fig. 8의 알고리즘에서 각 구동조건에서 변속기의 효율을 엔진의 효율에 곱한 값을 전체 효율로 선정하여 각 조건별 효율을 계산하고 최고 효율을 출력하는 단수를 추출하는 방식으로 Fig. 9와 같은 변속 선도를 도출하였다.

5. 시뮬레이션 결과

TMED 하이브리드 차량에 변속맵 선도를 적용시킨 연비해석 시뮬레이터를 통해 변속단, 엔진 rpm의 구간별 구동시간, 최종연비를 해석하고 정량적으로 분석하였다. UDDS 도심주행 사이클에서의 두 변속 선도의 변속 결과는 Fig. 10과 같다.

구동시간을 분석해 보면 5단의 사용시간이 6배 이상 증가하고 4단 6단의 구동 시간이 대폭 감소하였는데, 이 시뮬레이션에 사용된 자동변속기의 효율을 분석해 보면 5단의 효율이 4단 6단에 비해 유의미하게 높기 때문에 도출된 결과로 분석된다.

고속도로 주행 사이클에서의 변속단을 비교한 결과는 Fig. 11과 같다.

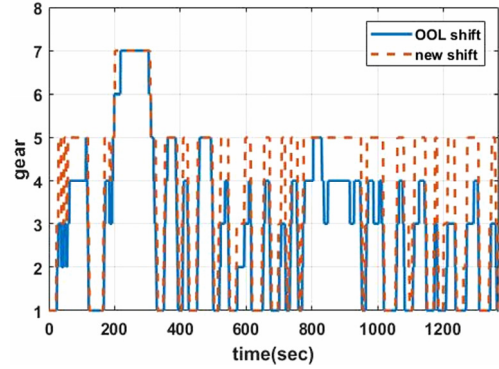


Fig. 10 Gear shift result from UDDS cycle

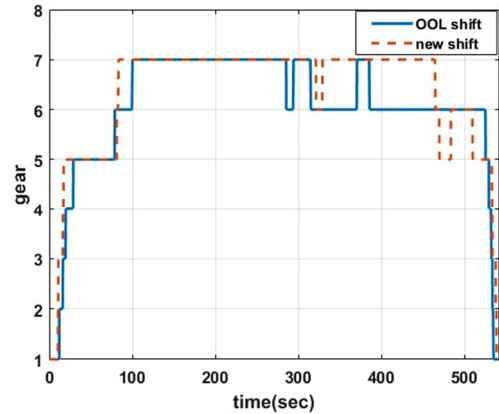


Fig. 11 Gear shift result from highway cycle

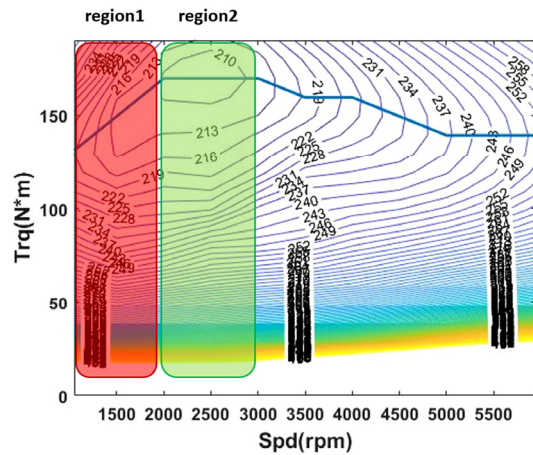


Fig. 12 Break specific fuel consumption of engine at each speed and torque

가장 큰 차이는 7단에서의 시간이 대폭 증가한 것이다. 기존의 OOL(Optimal Operating Line) 변속 선도로 주행할 때 6단으로 주행했던 구간 중 많은 구간이 7단으로 주행된 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 7단의 전달효율이 6단의 전달효율보다 유의미하게 높기 때문으로 추정된다.

반면 엔진의 구동 rpm은 엔진의 효율만을 고려한 선도

Table 1 Operating time and region of engine

	UDDS cycle		Highway cycle	
	OOL	New	OOL	New
Operating time at Region 1 (sec)	70	150	59	239
Operating time at Region 2 (sec)	226	176	226	43
Total operating time	296	326	284	282

Table 2 Fuel rate and energy loss from transmission

	UDDS cycle		Highway cycle	
	OOL	New	OOL	New
Energy loss from transmission (kJ)	1412	1204	998	958
Fuel rate (km/L)	23.27	24.37	21.43	22.13

와 비교했을 때 효율이 낮은 구간에서 구동됨을 확인하였다. 그 이유는 변속기의 효율을 추가적으로 고려하는 경우 엔진의 효율과 변속기의 효율을 곱한 효율이 개선된다면 차량은 해당 단수로 구동되기 때문으로 추정된다. 아래 Fig. 12에서 효율에 따라 영역을 두 개로 나누었는데 새로운 변속선도는 기존의 변속선도에 비해 효율이 낮은 Region 1에서 구동시간이 증가함을 확인하였다. 두 선도의 엔진 구동 구간별 구동 시간은 Table 1과 같다.

엔진에서의 손실은 기존의 선도보다 증가하였지만 변속기에서의 손실이 감소하여 전체 연비는 Table 2와 같이 3~4% 개선됨을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 자동변속기가 탑재된 TMED 병렬형 하이브리드 차량의 연비 향상을 위한 변속 선도에 대한 연구를 수행하였다. 주행 사이클을 추종하고 통합연료 소모량을 계산할 수 있는 하이브리드 차량 해석 시뮬레이터를 개발하고, 변속기 손실을 반영하기 위해 변속기 동력 손실 예측 모델을 개발하였다.

하이브리드 차량 시스템 시뮬레이터는 요구 주행 사이클을 추종하고 엔진 모터의 구동점을 기록하며 통합연료소모를 계산할 수 있도록 개발하였다. 변속기 동력 손실 예측 모델은 다양한 손실 요인을 반영하여 신뢰도가 높은 이론식이나 실험을 기반으로 한 실험식을 채택하여 적용시켰다. 그 후 실제 양산되는 자동변속기의 도면을 참고하여 동력이 손실되는 지점을 파악하고 각 지점의 손실량을 정량적으로 계산하여 비교함으로써 신뢰도 높은 통합 효율 예측 시뮬레이터를 개발하였다.

개발된 하이브리드 차량 시뮬레이터와 변속기 손실 해석 모델을 이용하여 차량의 요구 토크와 차속에서 가장 효율이 높은 단수를 추출하는 알고리즘으로 변속맵

선도를 도출하였다. 기존의 엔진 효율만을 고려한 알고리즘을 적용시켜 도출한 변속선도와 변속효율을 추가적으로 고려한 변속선도를 각각 도출한 후 연비 시뮬레이션을 통해 결과를 비교하였다. 비교 결과, 본 논문에서 제안한 변속선도가 기존 선도에 비해 엔진에서 손실되는 에너지는 증가하지만 변속기에서 손실되는 에너지가 감소함에 따라 전체 연비가 3~4% 향상됨을 확인하였다.

실제 변속선도는 연비효율만을 고려하지 않고, 차량의 다양한 주행성능 등을 고려하여⁸⁾ 결정된다. 본 논문에서 제안한 방식은 단지 연비효율만을 고려한 것으로서 실차 적용에는 한계가 있으며, 추후 차량의 주행성능 등을 함께 고려한 변속 알고리즘 연구가 진행될 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학iCT연구센터지원사업(IITP-2018-0-04126)과 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단-차세대공학자 육성 연구사업(No. 2017H1D8A2031628)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

- 1) A. Bastian, S. Tano, T. Oyama and T. Arnould, "Fuzzy Logic Automatic Transmission Expert System," IEEE International Conference on Fuzzy System, Yokohama, Japan, 1995.
- 2) S. Bai, K. V. Hebbale and C. J. Lee, Automatic Transmission Shift Point Control System and Method of Use, US Patent, US7653469B2, 2008.
- 3) S. B. Jeon, K. G. Bae, J. B. Wi, C. Namkoong, C. G. Goo, J. S. Lee, S. H. Hwang and H. S. Kim, "Development of Shift Map for TMED Type DCT PHEV in Charge Sustaining Mode considering Transmission and Motor Losses," Transactions of KSAE, Vol.25, No.3, pp.367-373, 2017.
- 4) C. R. He, W. B. Qin, N. Ozay and G. Orsoz, "Optimal Gear Shift Schedule Design for Automated Vehicles Hybrid System Based Analytical Approach," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.26, Issue 6, pp.2078-2090, 2018.
- 5) K. Arnaudov and D. Karaivanov, "The Torque Method Used for Studying Coupled Two-carrier Planetary Gear Trains," Transactions of FAMENA, Vol.37, No.1, pp.49-61, 2013.
- 6) J. H. Woo, Y. H. Jung, W. S. Ryu and H. Y. Lee, "Development of Mathematical Model for Drag Torque of Wet Clutch in an Automatic Transmission and Test Analysis," KSAE Spring Conference Pro-

- ceedings, pp.169-175, 2017.
- 7) S. Iqbal, F. A. Bender, B. Pluymers and W. Desmet, "Model for Predicting Drag Torque in Open Multi-Disks Wet Clutches," *Journals of Fluids Engineering*, Vol.136, Issue 2, 2014.
- 8) W. Lim and C. Shin, "Determination of Shifting Pattern for the Enhancement of Vehicle Performance," *Auto Journal, KSAE*, Vol.35, No.8, pp.25-32, 2013.