

조향 모델에 따른 조향 소모 에너지와 연비 분석

구본현¹⁾ · 이희윤¹⁾ · 박윤경²⁾ · 차석원^{*1)} · 임원식²⁾ · 장봉춘³⁾ · 방진석⁴⁾

서울대학교 기계항공공학부 · 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 ·
안동대학교 기계공학과 · 현대자동차 상용선행연구팀¹⁾

Steering Consuming Energy and Fuel Efficiency Analysis Depending on Steering System Model

Bonhyun Gu¹⁾ · Heeyun Lee¹⁾ · Yunkyong Park²⁾ · Sukwon Cha^{*1)} ·
Wonsik Lim²⁾ · Bongchoon Jang³⁾ · Jinseok Bang⁴⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Gyeongbuk 36729, Korea

⁴⁾Commercial Vehicle Advanced Engineering Team, Hyundai Motor Group, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup,
Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

(Received 8 December 2015 / Revised 1 March 2016 / Accepted 16 March 2016)

Abstract : For high fuel economy, many kinds of unit in vehicle have been developed. In steering system, as a result, HPS(Hydraulic Power Steering) system has been replaced as EHPS and EPS system. But the structures of these systems are totally different, and that causes the uncertainty of fuel economy evaluation. Therefore we undertake to research to find results and tendency of fuel economy and energy in steering system. For accurate evaluation, we modeled different types of steering systems on same vehicle model. The simulation came into action on various driving cycle. The driving condition is designed to show standby power of pump. Results show differences of fuel efficiency and energy consumption.

Key words : Power steering(동력 조향 장치), Fuel economy(연비), HPS(유압식 동력 조향 장치), EHPS(전기 유압식 동력 조향 장치), EPS(전기식 동력 조향 장치), Trucksim(트럭심)

Nomenclature

J : moment of inertia, kgm^2
 P : pressure, bar
 T : torque, Nm
 X : x coordinate, m
 F : force, N
 θ : angle, rad
 B : damping, N/m
 AV : angular velocity, rad/s

Subscripts

FE : fuel economy
 SOC : state of charge
 sw : steering wheel
 $tbar$: torsion bar
 gb : gearbox
 col : column
 rp : rack pinion
 rck : rack

*Corresponding author, E-mail: swcha@snu.ac.kr

1. 서론

최근 자동차업계의 화두는 환경 친화적인 자동차에서 자율 주행, 스마트 카 등 다른 연구테마로 관심이 넘어간 듯 하지만, 대부분의 나라에서 환경오염에 대응하기 위해 시행하고 있는 정책과 규제는 시간이 지남에 따라 오히려 과거보다 더 엄격해졌다고 할 수 있다. 이에 따라 높은 연비는 이제 선택이 아니라 필수 사항이 되었다. 자동차의 연료 소모량을 줄이기 위해 자동차업체들은 각 부품들의 성능 향상, 주행전략 개선, 제어로직 변경 그리고 전체적인 자동차 동력원의 변경(EV, HEV 등)까지 이뤄내고 있다.

그 중 조향장치는 연비적인 측면 외에도, 자율 주행, 차선 유지 등 여러 측면에서 관심이 집중되고 있다. 조향장치는 과거의 무보조력 시스템이 외면받은 후에 유압으로 운전자의 동력을 보조했고, 최근 승용차를 시작으로 전기로 동력을 보조하는 시스템이 상용화되고 있다.

동력 조향 시스템은 종류에 따라 유압식, 전기 유압식, 전기식으로 크게 3가지로 나눌 수 있는데, 특히 전기식인 EPS(Electric Power Steering)시스템은 기존의 유압식인 HPS(Hydraulic Power Steering)시스템보다 뛰어난 연비를 보이고 있다. 그 대표적인 원인으로 유압식은 조향력이 거의 없는 경우에도 실린더 내의 유체의 압력을 유지해야하기 때문에 엔진의 에너지가 계속 소모되는데 비해, 전기식은 조향력이 필요할 때에만 동력을 발생시키기 때문에 엔진에너지 소모가 적다는 사실이다. 이 때문에 동일한 차량에서도 주행 도로의 조향각의 정도에 따라 동력 조향 장치들의 에너지 소모량이 달라질 것으로 예상된다. 하지만 연비해석은 주로 사용되는 주행사이클(NEDC, FTP-75 등)을 통해 알 수 있듯이 조향 모델의 에너지 소모량을 반영하지 않는다. 즉, 조향시스템에 대한 연비 해석 포맷이 따로 없고, 선행연구¹⁾에서도 조향 모델을 포함한 연비 해석은 잘 이루어지지 않았다는 것을 확인할 수 있다. 국문논문 중 세 가지 조향모델에 따른 연비를 분석한 논문에서는 실차 실험과 시뮬레이션을 모두 보였지만, 조향 모델 특성에 따라 연비가 차이나는 이유에 대해서는 따로 결론을 보이지 않았다.

실제 차량을 개발하는 제조사 입장에서는 조향모델에 따라 연비가 상승하는 결과를 다양한 경우에 대해 비추어 보고 싶을 것이다. 주행 사이클에 따라 연비가 달라지는 것과 마찬가지로 조향모델의 소모 에너지도 주행 사이클에 따라 달라질 것이라 예상할 수 있다.²⁾

본 연구에서는 먼저 HPS, EHPS, EPS 모델을 동일한 차량 데이터를 기반으로 모델링을 하였다. 그리고 주행 속도를 달리한 직선 주행도로와 연비측정 주행 사이클, 사인파 조향 주행, 실제 도로 데이터를 반영한 주행도로를 모델링하여 상용 프로그램인 Trucksim과 Simulink를 이용하여 통합 연비 해석 프로그램을 개발하였다.

시뮬레이션을 통해 HPS, EHPS, EPS의 조향 소모 에너지를 분석하여 경향성을 제시하고, 그 원인을 분석하였다. 그리고 실제 도로를 시뮬레이션 하여 운전자가 실도로를 운전하였을 시에 전체적인 연비향상을 사례로 제시하였다.

2. 본론

3가지 타입의 조향시스템 모델링을 변수로, 동일한 상태의 차량을 공통변인으로 하는 모델링을 완성하고 시뮬레이션을 수행했다. 상용프로그램인 Trucksim과 Matlab, Simulink를 사용했고 3가지의 주행사이클에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 조향 시스템의 특성을 분석할 수 있게 하였다.

2.1 조향 시스템 모델링

조향 시스템 모델링은 Matlab과 Simulink로 각 변수를 선정하여 역학적으로 설계했다. 조향 시스템 종류에 따라 펌프, 랙 기어, 모터, 배터리, 알터네이터 등을 부품 모델링하였다.

2.1.1 HPS 시스템 모델링

유압식 동력 조향 장치는 엔진의 동력을 펌프가 전달받아 유압실내에서 유압과 압력을 조절한다. 이 압력의 힘으로 랙 기어를 움직여 조향력을 보조하기 때문에, 펌프의 특성상 조향력이 필요하지 않을 때에도 펌프에서 에너지가 소모된다. 엔진속도에 가장 큰 영향을 받으며 조향 방향을 바꿀 때에 스티어링 각속도에 따라 펌프 토크가 증가하는 경

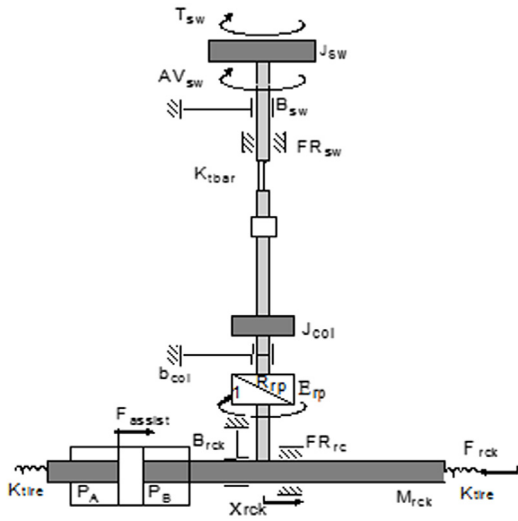


Fig. 1 HPS system & EHPS system

향을 보인다. 모델링은 크게 펌프와 칼럼, 그리고 랙 바 등으로 나누어 모델링 하였다. Fig. 1의 요약도에서 fassist를 가하는 펌프를 엔진과 연결하였다. 특히 조향에 필요한 역학모델링은 뉴턴의 제 2법칙을 적용, inertia와 각속도 등으로 식 (1), (2)를 완성하였다.

$$J_{sw} \ddot{\theta}_{sw} = T_{sw} - B_{sw}(\dot{\theta}_{sw}) - FR_{sw}(\dot{\theta}_{sw}) - K_{tbar}(\theta_{sw} - \theta_{col}) \quad (1)$$

$$J_{equ} \ddot{X}_{rck} = F_{assist} + \frac{E_{rp}}{R_{rp}} K_{tbar}(\theta_{sw} - \theta_{col}) - \left[B_{rck} + \frac{B_{col} E_{rp}}{R_{rp}^2} \right] (\dot{X}_{rck}) - FR_{rck}(\dot{X}_{rck}) - F_{rck} \quad (2)$$

2.1.2 EHPS 시스템 모델링

전기 유압식 동력 조향 장치는 엔진의 동력을 이용하여 알터네이터를 회전시켜 전기에너지로 변환, 배터리에 저장한다. 이 전기에너지로 모터를 회전시켜 이와 연결된 펌프를 가동하여 HPS와 마찬가지로 펌프의 힘으로 랙 기어를 움직여 조향력을 보조한다. EHPS의 모델링은 Fig. 1에서 fassist를 가하는 펌프의 에너지가 모터로부터 올 수 있도록 구성하였다. EHPS는 배터리와 모터를 이용하기 때문에 엔진의 속도와 상관없이 펌프를 구동할 수 있는 장점이 있다. HPS의 펌프모델링을 차용하고 모터와 배터리, 알터네이터를 Simulink로 모델링하여 통합하였다.

2.1.3 R-EPS 시스템 모델링

전기식 동력 조향 장치는 조향력을 보조해주는 모터의 위치에 따라, 모터가 직접 칼럼을 보조하는 C type(C-EPS), 피니언을 보조하는 P type(P-EPS), 듀얼피니언 방식의 조향을 하는 D type(DP-EPS), 랙 기어를 보조하는 R type(R-EPS)의 4가지 타입으로 나뉜다. 본 연구에서는 랙 기어를 보조하는 R type을 사용했다. EHPS처럼 엔진의 동력을 알터네이터가 전기에너지로 바꾸어 배터리에 저장한 후 모터가 위의 4가지 타입에 맞는 보조장치에 에너지를 전달하여 동력을 보조한다. 모터를 이용하기 때문에 조향력이 필요하지 않을 때에는 에너지를 소모하지 않는다. 펌프와 관련된 장치 대신 모터와 알터네이터, 배터리와 조향장치를 모델링 하였다. 파라미터는 승용차의 R-EPS의 파라미터를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다.

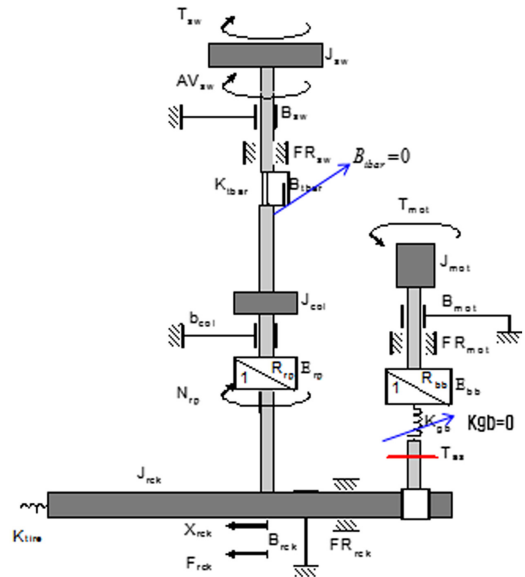


Fig. 2 R-EPS system

2.2 차량 모델링

대상 차량은 상용차의 한 종류인 미니 밴이다. 아직 상용차에는 R-EPS의 장착이 흔치 않기 때문에, 본 연구에서는 대상차종의 파라미터를 기반으로 사용하고 일부 R-EPS 데이터는 변수 조정작업을 하였다. 주요 스펙은 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of object vehicle

Vehicle	European large van
Mass	2100 kg
Overall length	6.195 m
Front area	4.88 m ²
Transmission	6-speed
Max power	150 hp
Max torque	45 kg·m

차량 모델링은 상용프로그램인 Trucksim을 기반으로 하여 필요한 부분을 Simulink로 대체하여 입출력 포트 연결하였다. Trucksim내부에서 설정하기 어려운 ESS(Energy Storage System, ex)Alternator, Battery)와 자체 변속 알고리즘을 넣기 위한 엔진 변속기를 Simulink로 모델링했다.

2.3 실험 방법

우선 기본적으로 주행 사이클의 속성은 차속이라고 할 수 있다. 각 조향모델은 차속과 엔진 속도에 영향을 받기 때문에 주행 환경을 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 km/h의 속도로 설정한 후 시뮬레이션을 하였다. 조향의 정도와 조향 시의 속도에 따라서 에너지 소모가 달라질 수 있기 때문에 직선도로로 가정하였다.

두 번째 실험은 연비 분석에 주로 쓰이는 NEDC 사이클에 대해서 시뮬레이션 하였다. 같은 직선로이지만 가속과 감속이 있기 때문에 실제 주행 프로파일 이전에 어느 정도 연비 특성을 나타낸다고 할 수 있다. 그리고 그 결과를 HPS에 조향 부하를 제외한 연비와 비교하였다.

세 번째 실험은 조향성능을 테스트할 때 사용되는 사인파형태의 조향각 프로파일을 직선도로와 조합하였다. 사인파 프로파일을 직선 프로파일에 100% 부터 50, 33.33, 25, 20, 10%까지의 비율로 주기마다 조합하여 주행하였다. 직선도로에서 조향각의 비율이 얼마냐에 따라 각 조향 시스템 별로 연비를 분석할 수 있었다.

마지막으로 남양-수원 사이의 실제도로를 주행 사이클로 하여 두 번째 실험과 같은 방법으로 시뮬레이션 하였다.

HPS의 경우에는 조향력을 보조하는 동력원인 펌프가 직결로 연결된 엔진에서 에너지를 끌어오지

만, EHPS와 R-EPS는 배터리에서 에너지를 끌어온다. 그 때문에 시뮬레이션이 끝나는 지점에서 배터리의 SOC(State Of Charge)에 따라 연비가 달라질 수 있다. 이 부분에 대해서는 SOC변화에 따라 식 (3)의 보간법을 이용한다.

$$FE_0 = (FE_2 - FE_1) / (\Delta SOC_2 - \Delta SOC_1) * (-\Delta SOC_1) + FE_1 \quad (3)$$

Table 2 Driving Cycle

Simulation	Vehicle speed	Time
Constant speed	30,40,50,60,70,80,90 km/h	Variable
NEDC	Variable	1000 sec
Sine wave	40 km/h	1180 sec
Real road	Variable	Variable

2.4 실험 결과

2.4.1 정속 시뮬레이션

Fig. 3의 그래프에서 알 수 있듯이 차속이 증가함에 따라 연비가 낮아지고, HPS와 EHPS, R-EPS의 연비가 각각 흡사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 각 조향 모델에 따른 연비 차이를 가시적으로 보기 위해 HPS대비 EHPS와 R-EPS의 연비 변화율을 백분율로 나타내었다.

Fig. 4의 그래프에서 40 km/h부분을 제외하고, 전체적으로 HPS대비 EHPS의 연비 증가율은 차속이 올라감에 따라 약 -4%부터 2%에 가깝도록 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 저속에서는 EHPS가 HPS보다 연비가 안 좋을 때도 있다는 결과이다. 그리고

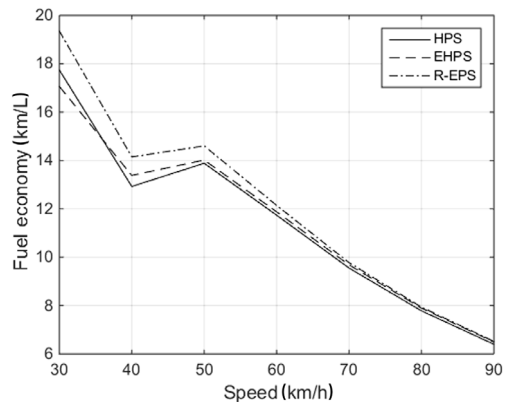


Fig. 3 Fuel economy by different velocity

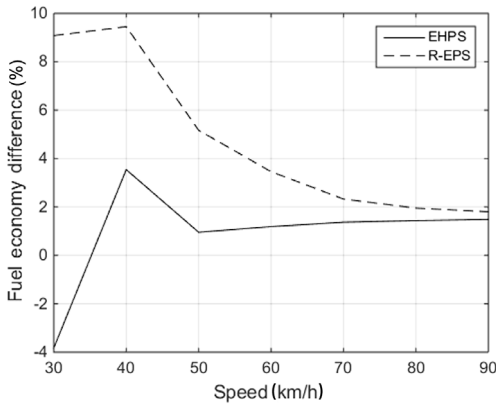


Fig. 4 FE compared to HPS system by different velocity

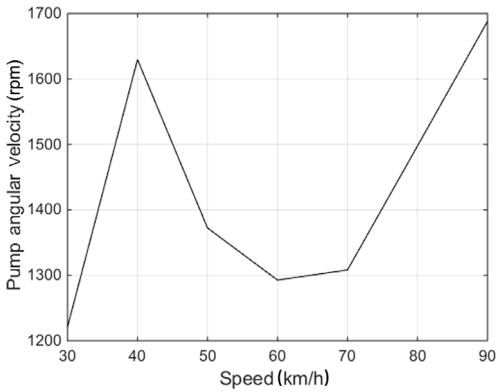


Fig. 5 Pump angular velocity in HPS by different velocity

HPS대비 R-EPS의 연비 증가율은 차속이 올라감에 따라 약 9%부터 2%까지 감소하는 결과가 나타났다. 차속 40 km/h일 때 연비 차이의 증감의 경향성에서 벗어난 이유를 분석하기 위해 HPS의 펌프의 RPM의 그래프를 구했다.

HPS에서 차속 40 km/h에서 펌프의 angular velocity가 크게 증가한 것을 알 수 있다. 즉, 변속기의 변속맵에 의한 변속단 변화로 엔진 속도가 변했고, 이와 직결된 HPS의 펌프의 속도와 토크가 증가했다. 그래서 펌프의 에너지 소모가 커짐에 따라 연비가 경향성보다 낮아졌다는 것을 예상할 수 있다. 즉, 변속에 의해 RPM이 급격히 바뀌지 않는다는 가정하에, EHPS와 R-EPS의 연비증가는 Fig. 4와 같은 경향성을 보인다고 예상할 수 있다.

Fig. 6의 그래프를 통해 조향 소모 에너지의 경향성을 볼 수 있는데, EHPS의 조향소모에너지는 특히

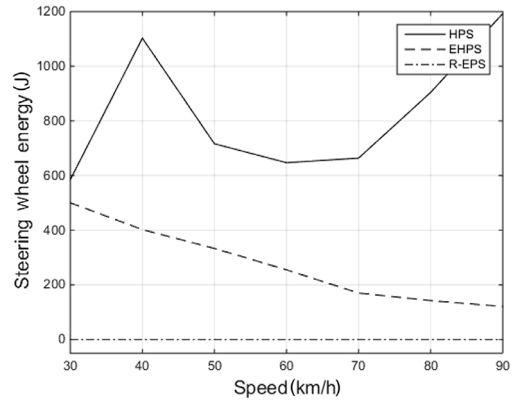


Fig. 6 Steering wheel energy by different velocity

차속이 증가함에 따라 낮아지는 것을 알 수 있다. 직선도로이기 때문에 R-EPS는 에너지 소모가 변함없이 0이다.

2.4.2 NEDC 모드 시뮬레이션

NEDC 모드를 주행하는 것은 2.4.1의 정속 주행처럼 조향력을 보조하지 않는 상태인 것은 동일하지만, 정속 주행이 아니라 연비 측정에 표준인 차속 변화를 시뮬레이션한다는 점에서 차이가 있다. NEDC 모드는 유럽에서 사용하는 연비측정 방식으로 ECE15(시가지 주행)과 EUDC(고속주행)으로 구성되어 있다. 시가지 주행은 4회 반복, 고속 주행은 1회 주행하여, 총 1180초의 주행시간을 갖는다(최고속도 120 km/h).

주행한 결과 연비는 Table 3과 같다. HPS_no load는 기존의 다른 시뮬레이터처럼 조향 소모 에너지를 엔진에 부하로 가하지 않은 상태이다. 이는 HPS에서 조향시스템 개선에 따라 잠재적으로 향상시킬 수 있는 최대 연비라고 할 수 있다.

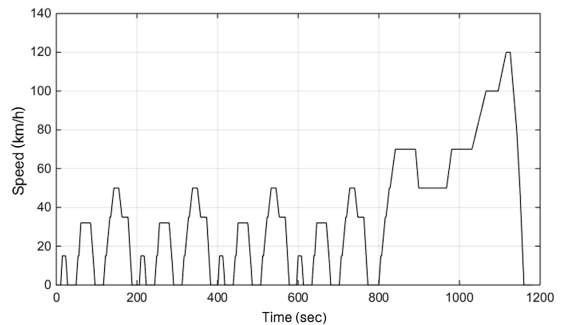


Fig. 7 NEDC mode profile

Table 3 NEDC mode fuel economy

Model	Adjusted F/E (km/L)	Compared by HPS
HPS	7.365	-
EHPS	7.456	1.24 %
R-EPS	7.548	2.48 %
HPS_no load	7.568	2.76 %

즉, 이론적으로 2.76 %의 연비를 향상시킬 수 있는데, HPS대비 EHPS는 1.24 %, R-EPS는 2.48 %의 연비가 향상된 것을 알 수 있다.

2.4.3 사인파 조향 시뮬레이션

조향시스템마다 연비의 차이는 주행에서 조향의 빈도에 따라 달라진다고 예상할 수 있다. 이를 분석하기 위해서 조향성능 테스트를 위해 사용되는 사인파 조향입력을 비율을 조정하여 시뮬레이션을 행하였다. 속도는 40 km/h로 고정하였다.

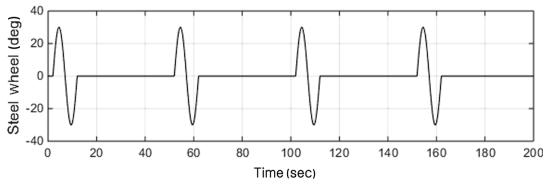


Fig. 8 20 % Sine wave steering wheel profile

위 그래프는 20 % 사인파의 조향프로파일이다. 위와 같은 방법으로 10 %부터 100 %까지 6단계로 나누어 조향시스템에 따라 연비를 분석하였다.

첫 번째와 두 번째 실험과는 달리 세 번째 실험에서는 전체 도로에서 조향구간의 비율에 따라 거의 정확한 비례를 보여주었다. R-EPS, EHPS, HPS로 이

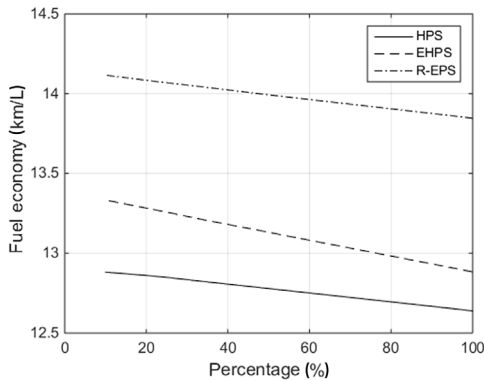


Fig. 9 Fuel economy by sine wave portion

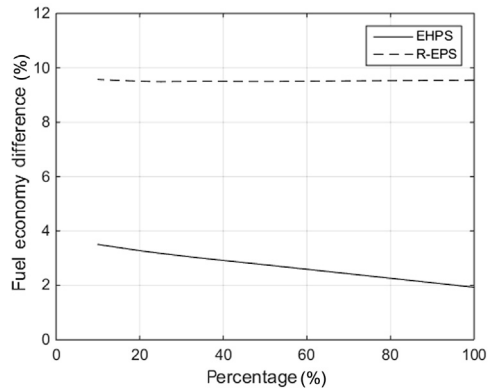


Fig. 10 FE compared to HPS system by sine wave portion

어지는 연비 순위가 역전되는 일이 없었지만, EHPS가 상대적으로 조향비율이 높아질수록 연비가 낮아지는 것을 알 수 있었다.

HPS와 비교한 연비 차이를 나타낸 그래프이다. 2.4.1에서 볼 수 있듯이 40 km/h의 속도에서는 HPS와 R-EPS의 연비차이가 크다. 그리고 그 차이는 조향구간의 비율이 올라가도 거의 변하지 않지만, EHPS의 경우에는 그 차이가 작아진다. 이는 모델링에서 EHPS의 경우 펌프가 전기모터로 구동하기 때문에 조향구간이 많아질수록 엔진 대비 전기모터의 에너지 사용비율이 점차 높아지기 때문이다. R-EPS는 전기모터로 rack에 가하는 에너지 자체가 작기 때문에 HPS와의 연비차이가 거의 좁혀지지 않는다.

2.4.4 실도로 시뮬레이션

실도로 주행 모드는 차량이 주행하는 구간의 GPS데이터를 수집하고 TM좌표계로 변환한 후, 오차 데이터를 제거하여 실도로 주행 환경을 구축하였고, 운전자 모델은 1.5초 후의 위치를 예상하여 조향을 실시하였다.

본 연구에서 선정한 실도로 주행 모드 시뮬레이션 결과, EHPS와 R-EPS는 HPS 대비 각각 0.86 %, 2.19 % 연비가 향상되었다. 실도로 주행의 경우 선정 구간에 따라 연비 개선 편차가 발생하기 때문에 정량적인 판단은 어렵지만, 개선율은 NEDC 모드와 유사한 경향을 나타냈다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 시뮬레이션 기법을 적용하면 다양한 실도로 주행 모드에 대한 연비 개선 효과를 사전에 예측할 수 있다.

3. 결론

본 연구를 통해 HPS, EHPS, R-EPS의 조향시스템의 장착에 따른 연비 향상과 그 경향성을 분석할 수 있었다.

- 1) 조향력이 필요하지 않은 직선 주행에 속도가 일정한 정속 주행일 때, HPS대비 EHPS의 연비 향상도는 저속일 때는 매우 낮았고(30 km/h일 때 약 -4%), 차속이 증가함에 따라 향상되었다(90 km/h일 때 약 2%). R-EPS는 에너지 소모가 없으나 알터네이터 충전 등으로 인해 저속일 때는 HPS대비 연비 향상이 매우 높았고(30 km/h일 때 약 9%), 차속이 증가함에 따라 향상도가 낮아졌다(90 km/h일 때 약 2%). 즉 시뮬레이션 결과는 차속에 따라 연비 향상도가 바뀌며, EHPS의 연비가 HPS보다 낮아질 수도 있다는 것을 알 수 있다.
- 2) 위의 경향성의 이유는 엔진속도에 따라 펌프의 요구속도와 토크가 결정되는 HPS의 특성과, 차속에 따라 조향력을 보조하는 모터의 요구 에너지가 영향을 받는 EHPS의 특성에 기인한다. 모델링에도 반영되었지만,⁴⁾ HPS의 경우에는 엔진과 펌프가 단순기어비로 연결되어 있다. 따라서 엔진의 회전속도가 올라가면 펌프의 회전속도도 같은 비율로 올라가게 되어 이런 결과를 낸 것으로 볼 수 있다. EHPS는 ECU에서 차속과 조향각속도를 입력받아 모터 회전수를 제어하게 되는데, 차속이 빨라질수록 타이어와 지면의 마찰의 영향이 작아져 조향에 필요한 파워가 낮아지기 때문이다. 펌프가 엔진의 회전속도에 영향을 받지 않기 때문에, HPS와는 다른 결과를 보이게 된다.
따라서 차량이 실제 주행할 시에 평균 차속에 따라 연비향상이 달라지며, 그것은 각 조향 모델의 조향력 보조 장치의 소모 에너지를 결정하는 엔진속도 또는 차속에 기인한다.
- 3) 정속 주행 외에, NEDC 모드로 시뮬레이션을 하였을 때, EHPS는 HPS대비 1.24%의 연비가 향상되었고, R-EPS의 경우 2.48%의 연비가 향상되

었다. 따라서 일반적인 차속 조건에서 R-EPS, EHPS, HPS의 순으로 연비가 향상되었으며 그 범위는 Fig. 4를 통해서 예측할 수 있다.

- 4) 사인파 조향 테스트로, 조향구간의 비율에 따라 조향시스템들의 연비차이가 달라지는 것을 알 수 있다. 특히 HPS와 EHPS의 연비차이가 조향구간이 많아질수록 작아졌으며, R-EPS는 큰 차이가 없었다.
- 5) 실도로 주행 모드에서는 HPS대비 EHPS와 R-EPS가 0.86%, 2.19% 연비가 향상된 것을 알 수 있으며, 이는 NEDC 모드와 유사한 경향을 나타냈다.

후 기

본 논문은 현대자동차 그룹의 산학연구 및 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2009-0083495, No.2015046558)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) H. Wi, G. Jo, J. Park, K. Park and J. Lee, "Effect of Type of Power Steering System on Vehicle Fuel Economy," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.733-738, 2006.
- 2) B. Gu, H. Lee, Y. Park, S. Cha, W. Lim, B. Jong and J. Bang, "A Study on Required Power of Driving and Steering With Considering Driving Path," KSAE Spring Conference Proceedings, p.65, 2015.
- 3) J. Jeong, H. Kim, K. Kim, W. Lim and S. Cha, "Evaluation of Fuel Economy and Performance for 2WD and 4WD Hybrid Electric Vehicle Based on Backward Simulation," Transactions of KSAE, Vol.22, No.1, pp.174-182, 2014.
- 4) D. Lee, K. Lee, W. Lim, J. Bang, B. Jong, Gu and H. Lee, "A Study on HPS, EHPS, RMDPS Steering System Modeling for the Application of Semi-bonnet Cars," KSAE Spring Conference Proceedings, p.457, 2015.