

동력 추적 기법을 활용한 직렬형 유압 하이브리드 차량의 제어 방식에 관한 연구

A study on the control of series hydraulic hybrid vehicle using power follower strategy

권우상 · 오주영 · 송창섭

W. S. Kwon, J. Y. Oh, and C. S. Song

Key Words: Hydraulic hybrid vehicle(유압 하이브리드 차량), Series hybrid vehicle(직렬형 하이브리드 차량), Power management(동력 관리), Power follower strategy(동력 추적 기법)

Abstract: A series hydraulic hybrid vehicle(SHHV) concept has been explored as a potential pathway to an ultra-efficient city vehicle. Improvements in SHHV fuel economy with reduced emissions strongly depend on their supervisory control strategy. Thermostatic control is simple and reliable but it's cause of frequent engine on-off. Therefore, power follower strategy is presented

In this paper, thermostatic control strategy and power follower strategy is compared for the SHHV model developed using AMESim.

1. 서론

기호 설명

- $P_{b,max}$: Maximum requested power allowed
when the engine-pump/motor #1 is off [Kw]
- $P_{g,max}$: Maximum power output of the
engine-pump/motor #1 set [Kw]
- $P_{g,min}$: Minimum power output of the
engine-pump/motor #1 set [Kw]
- P_r : overall power requirement
- SOC_U : Maximum state of charge [null]
- SOC_L : Minimum state of charge [null]
- $S_g(t)$: ON-OFF State of the
engine-pump/motor #1 set [null]
- T_E : Engine torque [Nm]
- $T_{P/M}$: Pump/Motor torque [Nm]
- V_D : Displacement of Pump/Motor [m3]
- W_E : Angular Speed of engine [rev/min]
- $W_{P/M}$: Angular Speed of Pump/Motor [rev/

하이브리드 자동차는 차량의 역사와 같이 긴 역사를 가지고 있다. 초기에는 연료 소비나 배출가스를 감소시키기 위해서 사용된 것이 아니라 엔진을 도와 큰 동력을 얻기 위해서 전기 에너지를 사용하는 형태로 사용 되었지만, 최근에는 연료 감소에 따른 연료 가격의 상승과 환경오염에 대한 위기의식이 증가됨에 연비를 증가하고 배기가스를 감소시키기 위해서 사용 되고 있다.¹⁾

하이브리드 자동차는 동력을 공급하는 2차 에너지에 따라 electric, flywheel, chemistry, hydraulic type으로 나눌 수 있으며, 이 중에서 가장 많이 쓰이는 HEV(Hybrid electric vehicle)와 HHV(Hydraulic hybrid vehicle)를 비교하면 다음과 같은 특징을 가진다.

- 동력 밀도가 크다. HHV는 축압기가 높은 비율과 주파수로 충*방전을 할 수 있으며, 그로인해 동력 밀도가 커지나 에너지 저장 용량이 작아 에너지 밀도가 작으며, HEV는 인버터에 의한 지연에 의해 축압기(Accumulator)보다 상대적으로 낮은 주파수로 충방전이 가능하나 에너지 저장 용량이 커서 에너지 밀도가 크다. 그러므로 HHV는 트럭, 건설 기계, 버스와 같이 차량의 질량이 많이 나가는 곳에 적합하다.¹⁾

- 회생 제동 효율이 높다. HHV에서는 Pump/Motor, 축압기의 효율에 의해 회생된 에너지의 약 70%가 차량을 가속시키는데 사용되나, HEV에서는 빠른 속도

접수일 : 2010년 6월 7일
 권우상 (책임저자) : 한양대학교 대학원 기계설계메카트로닉스 공학과
 E-mail : dsckwon@hanyang.ac.kr, Tel : 02-2220-0433
 오주영 : 한양대학교 대학원 기계설계메카트로닉스 공학과
 송창섭 : 한양대학교 기계공학과

로 충전이 발생되면, 축전지의 응답성이 이를 따라가지 못해 높은 비율은 완전히 충전되지 않으며, 그로 인해 회생에너지의 약 40% 정도가 차량의 가속 에너지로 사용되어 진다.^{1,2,3,4)}

- 충전 효율이 높다. HHV의 축압기 효율은 약 98%정도⁵⁾지만, HEV의 충*방전 효율은 축전지와 인버터의 효율을 고려해야 하며, 인버터의 효율은 Williamson의 연구⁶⁾에 의하면 시뮬레이션 동안 평균적으로 약 90%정도의 효율을 가졌으며 Li-ion 축전지의 경우 시간당 방전을 1에서 10으로 바꾸어 주었을 때 방전 효율이 97%에서 78%로 감소하였다.⁷⁾

- 동일한 동력을 가지는 유압 Pump/Motor는 전기 Generator/Motor보다 1/10정도 가볍다. 그로인해 유압 Pump/Motor의 극관성이 전기 Generator/Motor보다 작으므로 응답성이 빠르며, 이에 따라 Actuator는 높은 주파수 대역을 가져야 한다.⁸⁾

Fig.1에 보이듯이 Light Truck의 판매량이 증가하여 시간이 흐를수록 연료 소비율이 증가 하고 있으나, 승용차의 연료 소비율은 안정적이므로 Light Truck의 연료 효율을 높일수록 전체적인 차량의 연료 효율에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 그로인해 Light Truck에 적합한 HHV 연구의 필요성이 대두되고 있다.

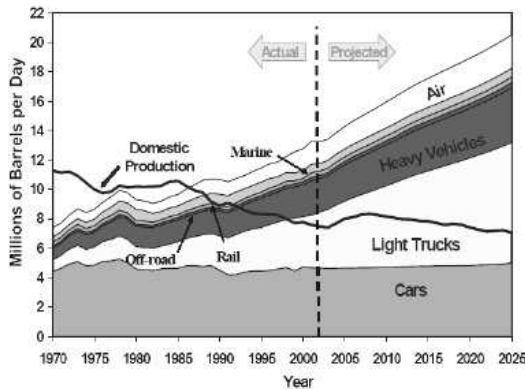


Fig.1 Transportation petroleum use by mode and production⁹⁾

HHV는 구조에 따라 Fig.2와 같이 크게 Series, Parallel 형태로 나눌 수 있다.

SHHV(Series hydraulic hybrid vehicle)는 모든 견인력이 Pump/Motor #1에 의해서 공급되어 "Full hybrid"라고 불리며, 엔진과 구동축이 연결되어 있지 않기 때문에 Fig.3과 같이 엔진의 "Optimal Curve"를 추종 할 수 있어 PHHV(Parallel hydraulic hybrid Vehicle)보다 엔진의 효율을 높일 수 있다.

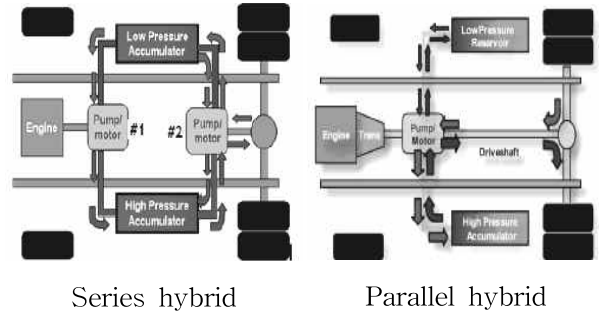


Fig.2 Classification of HHV²⁾

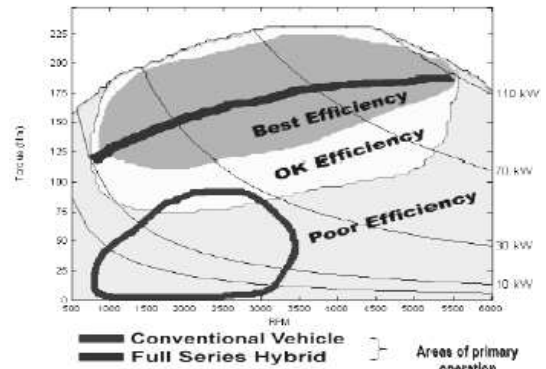


Fig.3 Power Map for a Typical Engine³⁾

EPA(The U.S. Environmental Protection Agency)에서 수행한 실험 결과에 따르면 FTP 72_Cycle시 기존의 AT보다 연비 측면에서 60~70%정도의 효율이 증가 하였으며, 배기가스 측면에서는 CO2의 배출량이 40%, HC 배출량이 50%, 부유분진(Particulate matter)이 60%이상 감소하였다.¹⁰⁾

가격적인 측면에서는 기존 AT에 비해서 Large 4WD SUV Clean Diesel, Full Hydraulic Hybrid, Engine Off시 가격이 \$2,241 증가 하였으며, 약 2.5년이 지난 후에야 기존 AT에 비해 금전적으로 절약이 되기 시작한다.¹¹⁾

PHHV는 2차 에너지원이 작은 용량이라고 하여 "Mild hybrid"라고 불리거나 구동력의 대부분을 엔진에서 공급되며 2차 에너지원은 단지 엔진의 동력을 보조 하거나 회생에너지를 저장하는데 쓰인다고 하여 "Power assist hybrid" 라고도 말한다.

EPA에서 수행한 실험 결과에 따르면 The U.S. FTP-72 (Federal Test Procedure) cycle 시 기존의 AT보다 연비 측면에서 20~40%정도의 효율이 향상 되었으나 엔진의 BSFC(Brake specific fuel consumption)선도에서 사용되어지는 구간이 기존의 AT와 같기 때문에 고속도로와 같이 회생이 거의 일

어나지 않는 곳은 기존의 AT와 동일한 효율을 가지거나 무게의 증가로 인해 효율이 감소된다.¹⁰⁾

가격적인 측면에서는 기존 AT에 비해서 Large 4WD SUV Clean Diesel, Mild Hydraulic Hybrid, Engine Off시 가격이 \$2,999 증가 하였으며, 약 4.5년이 지난 후에야 기존 AT에 비해 금전적으로 절약이 되기 시작한다.¹¹⁾

Hybrid 차량은 엔진과 2차 동력원을 어떻게 사용하는가에 따라 차량의 효율이 결정되며, SHHV의 경우 Modulated control¹²⁾, Thermostatic control¹³⁾을 이용한 Power management의 연구가 수행되었으나, Modulated control의 경우 회생 에너지의 회수만이 고려되어 엔진을 다운 사이즈 하는데 한계가 존재하며, Thermostatic control의 경우 축압기의 에너지가 작아 차량의 요구 동력이 클 경우 엔진 ON-OFF가 반복적으로 일어나게 되어 승차감과 배기가스에 좋지 않는 영향을 준다.

본 논문에서는 엔진의 작동이 최적 효율 운전곡선에서 작동하는 제어 방법과 차량 부하와 SOC(State of charge)에 의해 엔진의 ON-OFF를 제어하여 반복적인 엔진 ON-OFF를 피하는 Power follower control¹⁴⁾ 방법에 대해 제안 하고자 한다.

2. 직렬형 유압 하이브리드 차량 모델링

2.1 시스템의 구성 및 작동원리

SHHV는 Fig.2와 같이 2개의 유압 Pump/Motor, Accumulator로 구성되는 간단한 구조를 가지며 Fig.4와 같이 상용틀인 AMESim을 사용하여 모델링 하였다.

차량의 가속시 Pump/Motor #1은 Pump로 작동하여 고압 축압기(High Pressure Accumulator)를 충전하는데 사용되고, Pump/Motor #2가 Motor로 사용되어 지며 운전자의 페달 신호가 사판(Swash)을 움직여 차량의 가속정도를 판단하며, 고압 축압기나 엔진에 의해서 또는 둘 다에 의해서 동력이 공급되어 진다.

차량의 감속시 Pump/Motor #2가 Pump로 사용되며 고압 축압기를 충전하여 주며 브레이크 신호가 사판(Swash)을 움직여 차량의 감속정도를 판단한다.

고압 축압기는 에너지를 저장하는 요소로 사용되며, 저압 축압기(Low Pressure Accumulator)는 Reservoir로 사용되어진다.

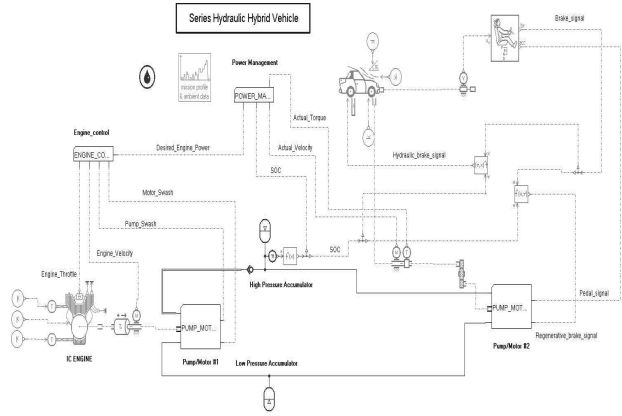


Fig.4 SHHV Model using AMESim

2.2 시스템 구성 요소의 특성 및 제한

Y. J. Kim and Z. Filipi¹³⁾이 수행한 Thermostatic control 방법과 비교하기 위해서 다음과 같이 동일한 차량 제원을 사용하였다.

2.2.1 엔진

엔진은 Fig.5와 같이 트로틀 개도, 회전속도 토크를 나타낸 Engine Map과 엔진 자체만의 연료 소비 특성을 나타낸 BSFC선도로부터 특성이 결정된다.

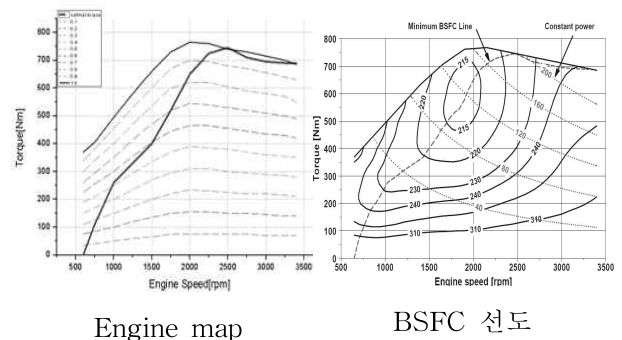


Fig.5 Characteristics of the Engine¹³⁾

2.2.2 HHV 제원

Pump/Motor의 제원은 Table.1과 같으며 효율은 사판각, 회전속도, 압력에 의해 변하지만 평균적으로 0.9의 효율을 가지며, Close_circuit을 구성하므로 Reservoir의 초기 압력을 높게 설정해 줌으로써 효율을 높여 줄 수 있다.

축압기는 충·방전이 빨리 일어나므로 단열 과정으로 가정 하였으며, SOC는 고압 축압기의 압력으로부터 다음과 같이 결정된다.

$$SOC = \frac{X(t) - 150}{350 - 150}$$

where, $X(t)$: Pressure of High Pressure Accumulator

Table. 1 Specification of Pump/Motor & Accumulator¹³⁾

Parameter	Pump/Motor #1	Pump/Motor #2
Size	194 cc/rev	288 cc/rev
Efficiency	0.9	0.9
Parameter	High Pressure Accumulator	Low Pressure Accumulator
Accumulator volume	86 Liter	86 Liter
Gas Precharge Pressure	150 bar	5 bar
Initial Pressure	290 bar	10 bar
polytropic index	1.4	1.4
Fluid Type	ISO 4113	ISO 4113

Table. 2 Specification of vehicle¹³⁾

Parameter	Value
Engine rated speed	3300 rpm
Engine Max. torque	580 Nm @2100 rpm
Vehicle mass	5112 kg
Wheel radius	0.4412 m
Wheel inertia	32.0 kg.m ²
Differential gear ratio	3.56
Differential gear efficiency	0.94
Air drag coefficient	0.7
Frontal area	3.58 m ²

3. SHHV Control Logic

3.1. Engine Control Logic

SHHV의 가장 큰 장점은 엔진의 속도와 구동축의 속도를 다르게 제어 할 수 있으므로 엔진의 최적 곡선을 사용할 수 있다는 점이다.

부하에 의해서 엔진의 동력이 결정되면 Fig.5의 BSFC선도의 최적 운전곡선에 의해서 엔진의 토크와 회전속도가 Engine Map에 의해서 엔진의 Throttle 개도가 결정되며, 엔진과 Pump/Motor #1은 같은 회전 속도로 회전하고, 아래의 식과 같은 관계를 가지므로 사판의 각도에 따라 엔진의 회전 속도를 제어 할 수 있으며, 이 식을 이용하여 Fig.6과 같은 로

직을 구성하였다.

$$Engine\ Power = - Pump/Motor\ 1\ Power$$

$$Engine\ Power = T_E * W_E * \frac{2\pi}{60}$$

$$W_E = W_{P/M} = \frac{Q * 2\pi}{V_D * Swash}$$

$$T_{P/M} = \frac{V_D * Swash * P_{P/M}}{2\pi}$$

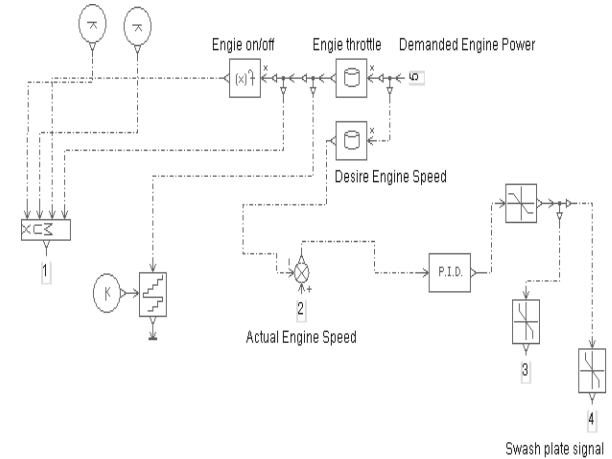


Fig.6 Control logic for engine using AMESim

3.2. Power Management Strategy

3.2.1 Thermostatic Control Strategy¹³⁾

SHHV 모델링 상에서, 드라이버의 페달 신호는 Pump/Motor #2의 동력을 제어하고, 원하는 차속을 만족하게 한다. 그러므로 SOC만이 엔진의 동력을 결정하는 변수가 된다.

Thermostatic control strategy는 Fig.7과 같은 그래프로 표현되며, 엔진의 작동 유무는 SOC에 의해서 결정된다. SOC가 0.4일 때, 엔진 작동을 하지 않으며, SOC가 0.4 이하 값으로 떨어지면, 엔진이 미리 정해진 동력으로 작동하여 축압기를 충전하기 시작한다. 엔진의 잦은 ON-OFF를 줄여 주기 위해 Dead band를 가지므로, SOC가 0.4가 아닌 SOC가 0.55가 될 때까지 엔진 작동을 계속하게 된다.

SOC를 0.4 주위에 위치 시켜 줌으로 인해서 나머지 0.6은 Cycle동안에 회생되는 에너지를 충분히 충전하기 위해서 남겨 두는 공간으로 작동하며, 0.1에서 엔진의 최대 출력을 내는 이유는 가스의 초기 압력(Gas Precharge Pressure)이상에서 작동 압력이 결정되므로 이를 고려하기 위함이다.

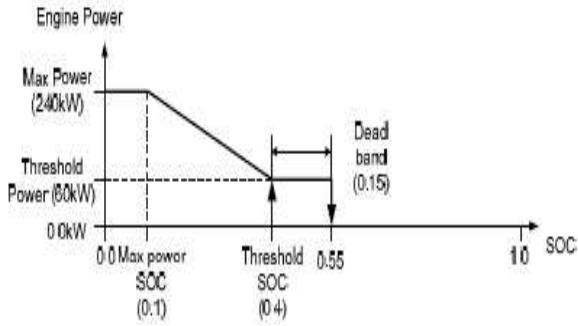


Fig.7 Design parameters of thermostatic SOC control

$$P_g(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } S_g(t) = 0 \\ P_{g, \min} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } S_g(t) = 1 \\ SOC(t) > SOC_U \end{array} \right. \\ P_{gm}(t), & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } S_g(t) = 1 \\ SOC_L \leq SOC(t) \leq SOC_U \end{array} \right. \\ P_{g, \max}, & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } S_g(t) = 1 \\ SOC(t) \leq SOC_L \end{array} \right. \end{cases}$$

Where, $P_{gm}(t) = P_r + \frac{-30}{SOC_U - SOC_L} * SOC(t) + \frac{60 * SOC_U - 30 * SOC_L}{SOC_U - SOC_L}$

3.2.2 Power Follower Control Strategy¹⁴⁾

Thermostatic Control Strategy 방법은 엔진의 잦은 ON-OFF을 방지하기 위해 Dead band를 주었지만 축압기에서 저장 가능한 에너지가 작으므로 부하가 클 경우 SOC의 감소율이 매우 커서 엔진의 잦은 ON-OFF을 가져온다.

그러므로 부하와 SOC상태로부터 Fig.8과 같이 엔진의 ON-OFF를 결정하고, 그때의 SOC상태와 부하에 의해 엔진의 동력을 결정하므로 부하가 클 경우 SOC의 상태에 상관없이 엔진을 작동시킴으로서 엔진 ON-OFF횟수를 줄여 줄 수 있다.

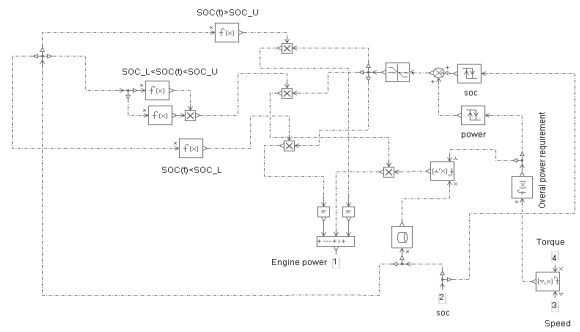


Fig.9 Power follower control logic using AMESim

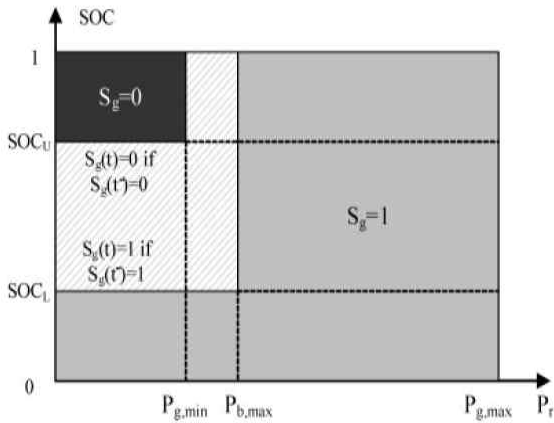


Fig.8 Engine ON-OFF logic

Fig.8의 S_g가 0인 구간은 엔진이 멈추는 것을 의미 하고 S_g가 0 또는 1인 구간은 이전의 엔진 작동 유무에 의해서 결정 되며 S_g가 1인 구간은 엔진의 작동 구간을 나타낸다.

P_{g,min}은 엔진에서 최소로 내보내는 동력을 나타내며, P_{b,max}는 축압기에서 공급할 수 있는 최대 동력을 나타내고, P_{g,max}는 최대 엔진 동력을 나타낸다.

엔진의 작동상태와 SOC상태에 따라 식(3)과 같이 4개의 Case로 분류 할 수 있으며 다음과 같은 특징을 가진다.

Case 1: SOC(t) > SOC_U 이고 요구 되는 동력이 P_{g,min} 이나 P_{b,max}보다 작은 경우로 Fig.7의 진한 검정 부분을 나타내며, 엔진이 작동하지 않는 구간을 나타낸다.

Case 2: SOC(t) > SOC_U 이고 요구 되는 동력이 P_{g,min} 이나 P_{b,max}보다 큰 경우로 Fig.7의 회색 영역과 사선 영역을 나타내며, 엔진의 최소 동력을 공급한다.

Case 3: 동력에 상관없이, SOC_L ≤ SOC(t) ≤ SOC_U 이면 Fig.7의 중간에서 작동하며, 앞에 있는 첫 번째 Term은 부하에 의해 공급 되는 동력이며, 나머지 Term은 SOC 상태로 부터 충전 속도를 결정해 준다.

Case 4: 동력에 상관없이, ≤ SOC(t) ≤ SOC_L 이면 Fig.8의 회색 영역에서 작동하며, 엔진의 최대 동력을 공급한다.

Fig.8의 사선 영역은 높은 주파수로 엔진이 작동하는 것을 보호하기 위해서 설정 되었으며, 기존의 Thermostatic 방법보다 부하가 고려되어 엔진의 잦은 ON-OFF을 방지할 수 있다.

위와 같은 식으로 부터 Fig.9의 로직을 SHHV에 적용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 Thermostatic Control Strategy Result

기존에 수행된 Thermostatic control을 이용한 SHHV와 비교하기 위해서 상용틀인 AMESim을 활용하여 모델링한 SHHV와 비교 및 평가하였으며 거의 동일한 연비를 가지는 것을 확인 하였다.

AT의 경우 차량이 정지시 Ideal Speed 가지므로 FTP-72보다 HWFET(Highway Fuel Economy Test)16)시 연비가 감소하는 것을 알 수 있으며, SHHV의 경우 회생 제동이 빈번히 일어나는 FTP-72에서 더욱 좋은 효율을 가지는 것을 알 수 있다.

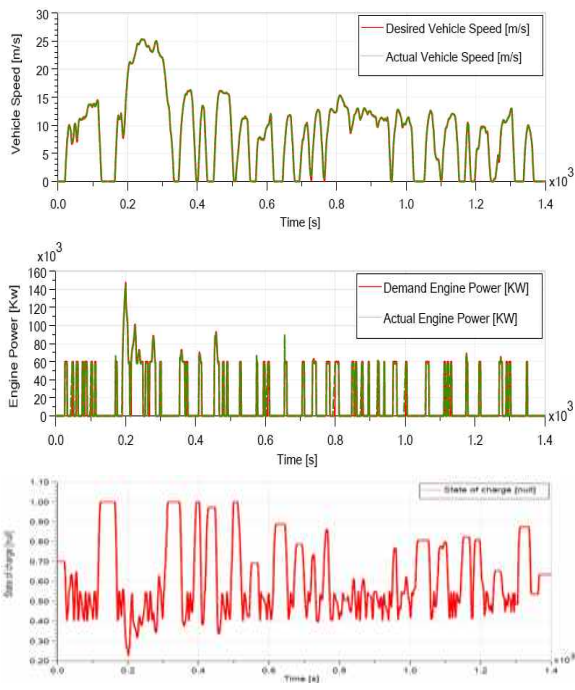


Fig.10 SHHV behavior of the thermostatic control with FTP-72 standard

Table. 3 Result of Thermostatic control

()안의 내용은 Y. J. Kim and Z. Filipi¹³⁾이 수행한 결과임

	FTP-72 (City)	HWFET (Highway)
Conventional	5.27 km/l	6.07km/l
Thermostatic control	8.99 km/l(8.86km/l)	6.83 km/l(6.83km/l)
Fuel economy improvement	68.6%(68.2%)	12.5%(12.5%)
Engine ON-OFF	45 times	31 times
Cycle duration	1400 S	800 S

4.2 Power Follower Control Strategy Result

현재의 부하와 Accumulator가 저장할 수 있는 에너지 정도를 고려하여 Engine을 구동하므로 FTP-72, HWFET모두 Thermostatic보다 향상된 결과를 얻을 수 있으며, FTP-72동안 45번의 엔진 ON-OFF도 28번으로 줄여 운전성도 향상 되는 결과를 얻었다.

Table. 4 Value of the parameters

Parameter	Value
SOC _U	0.55
SOC _L	0.2
P _{g,min}	30Kw
P _{b,max}	90Kw
P _{g,max}	200Kw

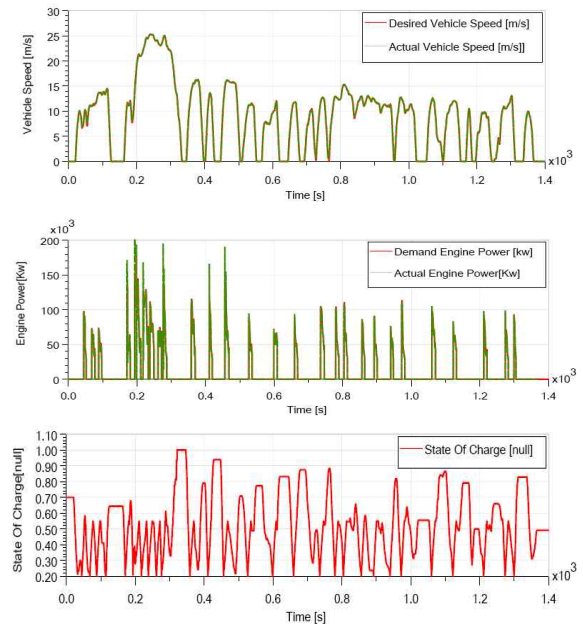


Fig.11 SHHV behavior of the Power follower control with FTP-72 standard

Table. 5 Result of Power follower control

	FTP-72 (City)	HWFET (Highway)
Conventional	5.27 km/l	6.07km/l
Power follower control	9.14 km/l	6.91 km/l
Fuel economy improvement	73.2%	13.8%
Engine ON-OFF	28 times	28 times
Cycle duration	1400 S	800 S

5. 결론

HHV 시스템을 상용틀인 AMESim로 구성 하고 Thermostatic control방법과 Power follower control 방법을 비교하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 기존의 HEV에서 제안된 Power follower control을 SHHV에 적용하여 Thermostatic control 방법 보다 효율과 운전성이 증가하는 것을 확인하였다.

2) 향후 Power follower control의 여러 변수가 연비와 운전성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

1) Stan Miller AQMD, "Hydraulic Hybrid Vehicle Forum and Technical Roundtable" International Truck and Engine, November 15, 2007

2) Amin Mohaghegh Motlagh, Mohammad Abuhaiba, Mohammad H. Elahinia, and Walter W. Olson, "Hydraulic Hybrid Vehicle" Environmentally Conscious Transportation, Ed, By Myer Kutz. John Wily Inc., 2007. ISBN: 978-0-471-79369-4.

3) <http://files.harc.edu/Projects/Transportation/HydraulicHybridsGray.pdf>

4) <http://www.epa.gov/otaq/presentations/diesel/hydraulic-hybrid-hostler.pdf>

5) Environmental Protection Agency, "World's First Full-Size Hydraulic Hybrid SUV Presented at 2004 SAE World Congress", EPA420-F-04-019, 2004.

6) Williamson, S.S., Emadi, A.,Rajashekara, K., "Comprehensive Efficiency Modeling of Electric Traction Motor Drives for Hybrid Electric Vehicle Propulsion Applications", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.56, No.4, July 2007.

7) Miller, J. M., "Propulsion systems for hybrid vehicles", Stevenage, UK, Institution of Electrical Engineers, 2004.

8) Backe, W., "The present and future of fluid power", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I, Journal of

Systems & Control Engineering, Vol. 207, No4, 1993, pp. 193-212.

9) Davis, S. C., Diegel, S.W., "Transportation Energy Data Book: Edition 24", Center for Transportation Analysis Engineering Science & Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, 2004.

10) <http://www.epa.gov/otaq/technology/420f06054.htm> -World's First Full Hydraulic Hybrid in a Delivery Truck

11) Alson, J., Barba, D., Bryson, J., Doorag, M., Haugen, D., Kargul, J., McDonald, J., Newman, K., Platte, L., Wolcott, M., "Progress Report on clean and Efficient Automotive Technologies Under Development at EPA", EPA420-R-04-002, 2004.

12) Bapi Surampudi, Ashok Nedungadi, Gregory Ostrowski, Alan Montemayor, Heather Gruenewald, "Design and Control Considerations for a Series Heavy Duty Hybrid Hydraulic Vehicle" SAE 2009-01-2717

13) Y. J. Kim and Z. Filipi, "Simulation study of a series hydraulic hybrid propulsion system for a light truck,"SAE 2007-01-4151.

14) A. Konev, L. Lezhnev, I. Kolmanovsky, "Control Strategy Optimization for a Series Hybrid Vehicle" SAE 2006-01-0663

15) Yuan Cheng; Keyu Chen; Chan, C.C.; Bouscayrol, A.; Cui, S. "Global modeling and control strategy simulation", IEEE Vehicular Technology Magazine Issue:2 June 2009, P 73 - 79 ISSN : 1556-6072

16) <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/#us-ld>