

병렬형 하이브리드 자동차의 연비 개선을 위한 규칙 기반 최적 제어 전략

최 승 원 · 민 승 재

한양대학교 미래자동차공학과

Optimization of Rule Based Strategy for Parallel Hybrid Vehicle to Improve Fuel Efficiency

Seungwon Choi · Seungjae Min

Department of Future Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract : This paper presents a method of the minimizing fuel consumption for the parallel hybrid electric vehicle by using the rule-based strategy. A simulation model of the vehicle and the control logic are constructed to evaluate the fuel efficiency. A optimization problem which minimizes the fuel consumption during a specific driving cycle is formulated. By using the Genetic algorithm, the values of design variables as SOC range and criteria of driving power is optimized to improve the fuel efficiency and a validity of proposed method is confirmed through the comparison of result.

Key words : Parallel Hybrid Electric Vehicle(병렬형 하이브리드 전기 자동차), Rule Based Strategy(규칙 기반 제어 전략), Genetic Algorithm(유전 알고리즘), Fuel Efficiency(연비)

Nomenclature

P : power, kW
T : torque, Nm
w : angular velocity, RPM
SOC : state of charge, %
BSFC : Brake Specific Fuel Consumption, g/(kW · h)

Com_{mot} : motor command
 Com_{brak} : braking command
TPS : acceleration command
 S_{eng} : engine signal
 S_{clut} : clutch signal
GR : gear ratio
SOC : state of charge
 HEV_{stat} : state of HEV
 SOC_{stat} : state of SOC
gainaccel: gain on the acceleration command
gainbrakes: gain on the braking command
maxtorqveh: maximum braking torque for the vehicle

Subscripts

S_{eng} : start of engine
 P_{HEV} : engine start power
 P_{whl} : wheel power
 T_{req} : torque asked by driver
 T_{engmax} : maximum engine torque
 T_{engmin} : minimum motor torque
 T_{motmax} : maximum motor torque
 ω_{eng} : angular velocity of engine
 Com_{eng} : engine command

1. 서 론

최근 자동차의 대기 오염에 대한 관심이 높아지면서 배기가스에 대한 규제가 계속하여 강화되고 있다. 이를 만족하기 위해서 환경 친화적인 자동차에 대한 관심이 대두되고 그 요구 또한 증가하는 추세이다. 본 논문에서는 연비 개선을 위해 환경 친화적인 자동차 중에서도 병렬형 하이브리드 자동차에 대한 연구를 진행하였다. 병렬형 하이브

* Corresponding author, E-mail: seung5049@hanyang.ac.kr

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

리드 자동차는 주행 중 엔진과 모터가 모두 사용되기 때문에 제어 방식이 직렬형 하이브리드 자동차 대비 복잡하기 때문³⁾에 제어 전략에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 병렬형 하이브리드 자동차의 연비 개선을 위한 규칙 기반 최적 제어 전략²⁾을 제안한다. 병렬형 하이브리드 자동차의 모델링을 한 후 규칙 기반 제어 전략에 따라 EV↔HEV 모드 제어 로직을 구성한다. 이를 이용해 가용 SOC 범위 모드 변환 파워 기준에 대한 최적화를 통해 연비 개선효과를 확인하고 제안한 방법의 타당성을 확인하였다.

2. 차량 모델링

2.1 참고 모델

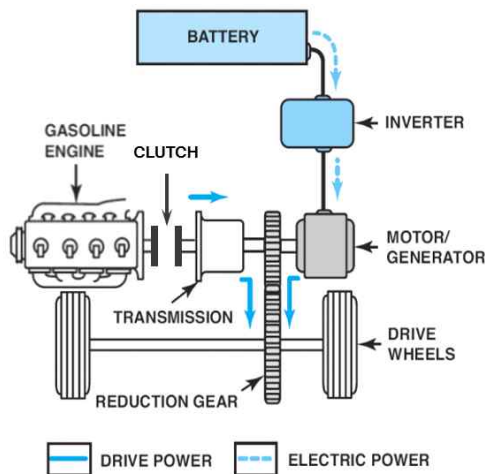


그림 1. 병렬형 하이브리드 자동차 구동계

병렬형 하이브리드 자동차는 그림 1과 같이 클러치가 미 접합 시 모터만 구동에 이용되고 클러치가 접합 시 엔진과 모터의 구동력이 동시에 중감속 기어로 전달된다.

component	specification
Enginge	1.6L 85kW Gasioline
Motor	45kW PM
Battery	310V 5Ah Battery
Vehicle	1400kg
Tire radius	15 in

표 1. 차량 specification

2.2 차량 모델링 구성요소

차량 모델에 사용된 specification은 표 1에서 정의되어 있다.

2.2.1 엔진

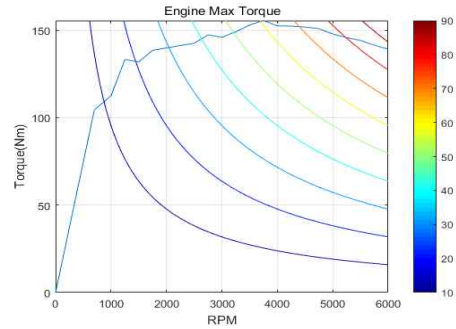


그림 2. 엔진 토크 파워 곡선

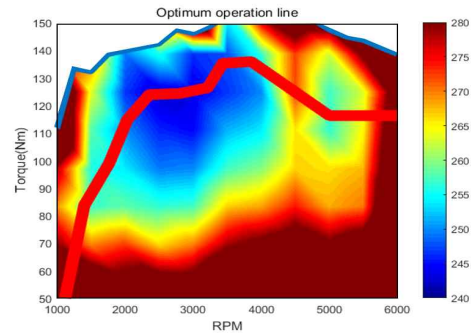


그림 3. 엔진 Optimum Operation Line

엔진의 토크 곡선과 Optimum Operation Line(OOL)을 나타내었다. 엔진이 OOL에서 동작할 때 가장 연비가 좋으므로¹⁾ 이 구간에서 최대한 동작시킬 수 있도록 한다.

2.2.2 모터

모터는 단독으로 구동이 가능해야 하기 때문에 45kW의 출력을 낼 수 있는 모터를 사용하였다.

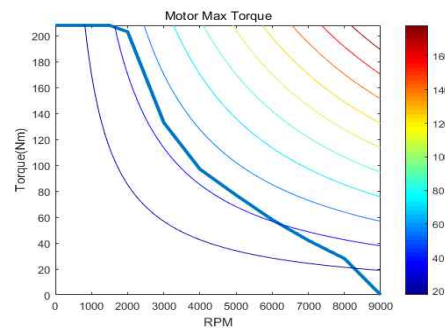


그림 4. 모터 토크 파워 곡선

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

2.2.3 배터리

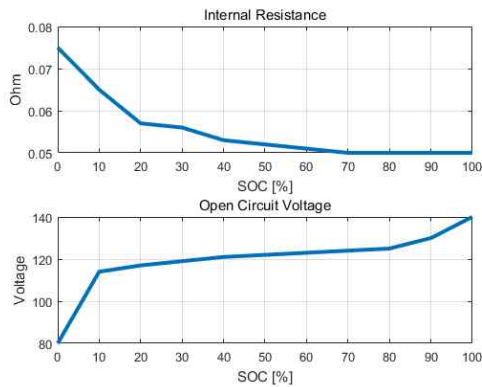


그림 5. 배터리의 내부 저항과 OCV

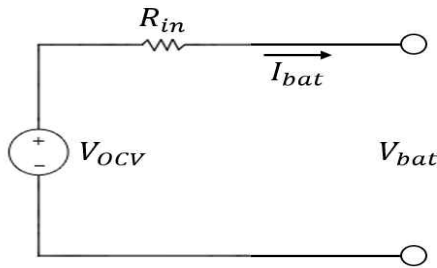


그림 6. 배터리 회로

배터리는 SOC 변화에 따라 내부 저항과 Open Circuit Voltage가 변한다. 배터리의 SOC는 아래의 식에 의해 결정된다.

$$V_{bat} = V_{OCV} - R_{in} \cdot I_{bat}$$

$$\frac{dSOC}{dt} = -I_{bat} \frac{100}{C_{nom}} \quad (1)$$

$$SOC = SOC_{\in} - \frac{100}{C_{nom}} \int I_{bat} dt$$

2.3 차량 모델링

참고 모델을 상용 소프트웨어인 AMESim을 이용하여 모델링 하였다. 운전자 모델에서 TPS, Brake, Gear select 등의 운전자 신호를 차량 제어 유닛으로 전달하면 이를 상황에 맞게 처리하여 엔진, 모터, 배터리, 변속기에 작동 명령을 전달한다. 이 구성요소들은 차량에 연결되어 차량을 구동한다. 차량 제어 유닛에 대한 내용은 4에서 자세히 다룰 것이다.

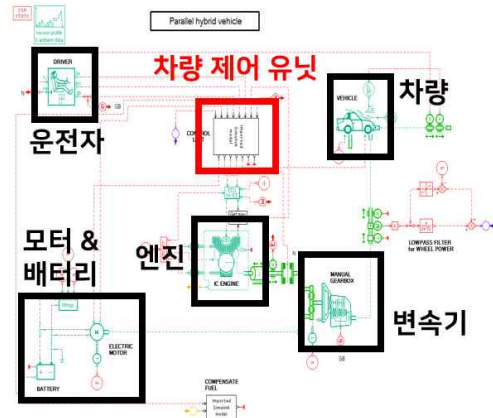


그림 7. AMESim을 이용한 차량 모델링

3. 규칙 기반 제어 전략

규칙 기반 제어 전략은 설계자가 정한 규칙을 바탕으로 작동상태를 결정하는 제어 방법이다. 본 논문에서 사용한 결정 조건은 다음과 같다.³⁾

변수	상태	결정 조건
HEV_{stat}	1	$P_{whl} > P_{HEV}$
	0	$P_{whl} < P_{HEV}$
SOC_{state}	1	$SOC < SOC_{lower}$
	0	$SOC > SOC_{upper}$

표 2. 규칙 기반 제어 전략 결정 조건

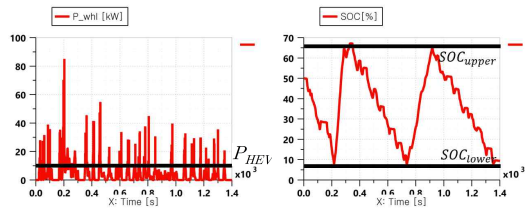


그림 8. 규칙 기반 제어 전략



그림 10. 규칙 기반의 차량 제어 유닛

4. 차량 제어 유닛 구성

4.1 차량 제어 유닛 모드

표 2에서 정한 규칙을 바탕으로 차량의 모드를 구성한다. 각각의 모드는 다음과 같다.

- 1번 모드 : 충전 불필요, 모터 구동
- 2번 모드 : 충전 불필요, 모터 + 엔진 구동
- 3번 모드 : 충전 필요, 모터 발전, 엔진 구동

4.1.1 모드 선택

모드 선택에 대한 기준은 표 3에서 구한 변수들의 상태에 따라 결정된다.

모드	HEV _{stat} = 0	HEV _{stat} = 1
SOC _{state} = 0	1번 모드	2번 모드
SOC _{state} = 1	3번 모드	

표 3. EV↔HEV 모드 선택 기준

4.1.2 브레이크 토크(T_{brak})

브레이크 토크는 운전자에 의해 요구된 브레이크 토크를 뜻한다. 운전자 브레이크 신호와 최대 브레이크 토크의 곱으로 정의된다.

$$T_{brak} = S_{brak} \cdot maxtorqueh \quad (2)$$

4.1.3 요구 토크(T_{req})

요구 토크는 요구 차속을 추종하기 위한 현재 필요한 토크 값이다. 1번 모드에서는 모터를 기준으로 2번과 3번 모드에서는 엔진을 기준으로 한다.

$$\begin{cases} T_{req} = TPS \cdot T_{motmax} - T_{brak} \text{ at } 1 \\ T_{req} = TPS \cdot T_{engmax} - T_{brak} \text{ at } 2/3 \end{cases} \quad (3)$$

4.1.4 1번 모드

1번 모드는 배터리의 충전이 불필요 하고 모터만 구동에 사용된다.

Acceleration

$$\begin{aligned} Com_{mot} &= MIN(T_{req} \cdot gainaccel, T_{motmax}) \\ Com_{brak} &= 0 \end{aligned}$$

Brake and no gear selected

$$\begin{aligned} Com_{mot} &= 0 \\ Com_{brak} &= -T_{req} \cdot \frac{gainbrakes}{maxtorqueh} \end{aligned} \quad (4)$$

Brake and gear selected

$$\begin{aligned} Com_{mot} &= MAX\left(\frac{T_{req}}{GR}, T_{motmin}\right) \\ Com_{brak} &= (Com_{mot} \cdot GR - T_{req}) \cdot \frac{gainbrakes}{maxtorqueh} \end{aligned}$$

4.1.5 2번 모드

2번 모드는 배터리의 충전이 불필요하고 엔진과 모터 모두 구동을 한다.

Acceleration and T_{req} < OOL

$$\begin{aligned} Com_{eng} &= \frac{MIN(T_{req} \cdot gainaccel \cdot dis, T_{engmax})}{T_{engmax}} \\ Com_{mot} &= MIN(T_{req} \cdot gainaccel \cdot (1 - dis), T_{motmax}) \\ Com_{brak} &= 0, S_{dut} = 1, S_{eng} = 1 \end{aligned}$$

Acceleration and T_{req} > OOL

$$\begin{aligned} Com_{eng} &= \frac{MIN(OOL \cdot gainaccel, T_{engmax})}{T_{engmax}} \quad (5) \\ Com_{mot} &= MIN(T_{req} \cdot gainaccel - OOL, T_{motmax}) \\ Com_{brak} &= 0, S_{dut} = 1, S_{eng} = 1 \end{aligned}$$

Brake

$$\begin{aligned} Com_{eng} &= 0 \\ Com_{mot} &= MAX\left(\frac{T_{req}}{GR}, T_{motmax}\right) \\ Com_{brak} &= (Com_{mot} \cdot GR - T_{req}) \cdot \frac{gainbrakes}{maxtorqueh} \\ S_{dut} &= 0, S_{eng} = 1 \end{aligned}$$

2번 모드에서는 요구 토크가 OOL보다 작을 때는 엔진을 OOL에서 동작시킬 수 없기 때문에 엔진과 모터에 동력을 일정 비율로 나누어 구동한다. 요구 토크가 OOL보다 클 경우 엔진을 OOL에서 동작하고 나머지 요구 토크는 모터를 사용하여 구동한다.

4.1.5 3번 모드

3번 모드는 배터리의 충전이 필요하기 때문에 엔진은 구동을 하고 모터는 발전기로 사용해 배터리를 충전한다.

Acceleration and T_{req} < OOL

$$\begin{aligned} Com_{eng} &= \frac{MIN(OOL \cdot gainaccel, T_{engmax})}{T_{engmax}} \\ Com_{mot} &= \frac{MIN(T_{req} \cdot gainaccel, T_{engmax})}{T_{engmax}} \\ Com_{brak} &= 0, S_{dut} = S_{eng} = 1 \end{aligned}$$

Acceleration and T_{req} > OOL

$$\begin{aligned} Com_{eng} &= \frac{MIN(T_{req} \cdot gainaccel, T_{engmax})}{T_{engmax}} \quad (6) \\ Com_{mot} &= Com_{brak} = 0, S_{dut} = S_{eng} = 1 \end{aligned}$$

Brake and no gear selected

$$Com_{eng} = Com_{mot} = 0$$

$$Com_{brak} = (-T_{req}) \cdot \frac{gainbrakes}{maxtorqueh}$$

$$S_{dut} = 0, S_{eng} = 1$$

Brake gear selected

$$Com_{eng} = 0$$

$$Com_{mot} = MAX(\frac{T_{req}}{GR}, T_{motmin})$$

$$Com_{brak} = (Com_{mot} \cdot GR - T_{req}) \cdot \frac{gainbrakes}{maxtorqueh}$$

3번 모드에서는 요구토크가 OOL보다 작을 경우에 엔진을 OOL로 구동하고 초과된 토크는 모터에서 배터리 충전에 사용된다. 요구토크가 OOL보다 클 경우 모터는 배터리 충전에 사용되므로 엔진만 구동을 한다.

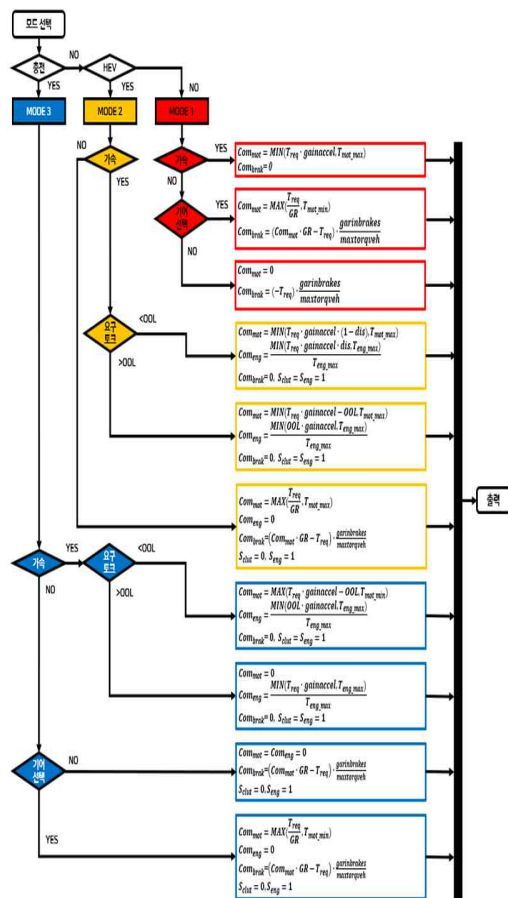


그림 10. 모드 선택 순서도

5. 차량 시뮬레이션

5.1 주행 사이클

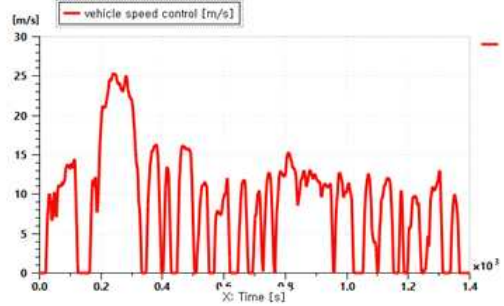


그림 11. FTP-75 주행 사이클

본 논문에서는 연비 개선 효과를 확인하기 위해 미국 환경청(EPA)에서 공인 연비 평가 기준으로 활용하는 FTP-75 주행 사이클을 이용한다.

5.2 시뮬레이션 결과

5.2.1 모드 선택

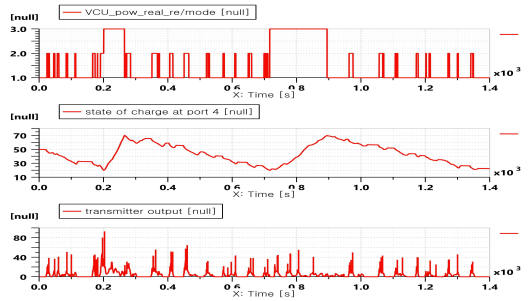


그림 12. 모드 선택 기준에 따른 모드 변환

4.1.1의 기준에 따라 모드가 선택되는 것을 볼 수 있다. 유효파워가 기준보다 커지면 2번 모드, 충전이 필요하면 4번 모드가 된다. 이 때 모드가 수시로 변경되어 엔진의 지나친 작동과 미 작동의 반복을 방지하기 위해 모드 제어 신호에 필터를 적용하였다.

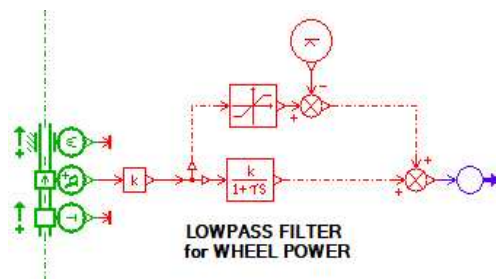


그림 13. 유효파워의 Lowpass filter

5.2.2 엔진, 모터의 구동

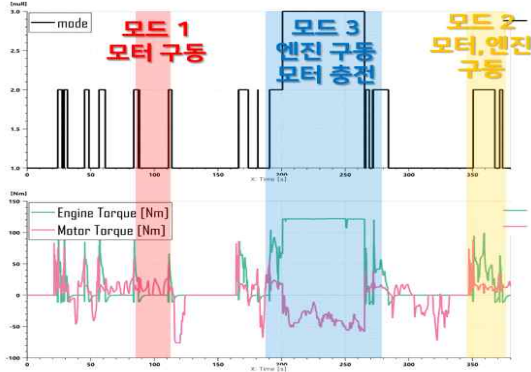


그림 14. 모드에 따른 엔진과 모터의 토크

모드에 따라 엔진과 모터가 작동하는 것을 볼 수 있다.

- 1번 모드에서는 모터가 단독으로 구동한다.
- 2번 모드에서는 모터와 엔진이 정해진 분배비에 따라 나뉘어 구동되는 것을 볼 수 있다.
- 3번 모드에서는 엔진이 구동을 하고 모터는 배터리 충전을 위해 음의 토크를 출력하는 것을 확인할 수 있다.

5.2.3 연료 소모량(conFuel)

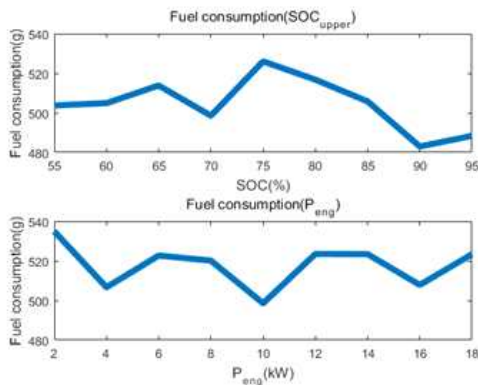


그림 15. 설계 변수에 따른 연료 소모량 변화

SOC와 P_{eng} 의 변화에 따른 연료 소모량을 나타내었다. SOC_{upper} 와 P_{eng} 을 각각 변화 시켰을 때 연료 소모량은 비선형적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

6. 최적화 결과

6.1 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)

유전 알고리즘은 전역적 최적화 방법으로써 비선형 문제에서 다양한 활용사례가 있다. 문제에 대한 가능한 해를 무작위로 선정하고 선택, 교차, 대치, 변이를 통해 더 좋은 해로 수렴해 가는 방식으로 구성된다.

6.2 최적화 문제 정식화

$$\begin{aligned} & \text{minimize}_{\mathbf{x}} \text{ conFuel} \\ & \text{subject to } 50 \leq SOC_{upper} \leq 100 \\ & \quad \quad \quad 5 \leq SOC_{lower} \leq 45 \\ & \quad \quad \quad 0 \leq P_{eng} \leq 20 \\ & \mathbf{x} = [SOC_{upper}, SOC_{lower}, P_{eng}] \end{aligned}$$

연료소모량(conFuel)을 목적함수하고 설계변수에 대한 구속 조건을 \mathbf{x} 와 같이 정의하는 최적화 문제를 정식화 하였다.

6.3 최적화 문제 결과

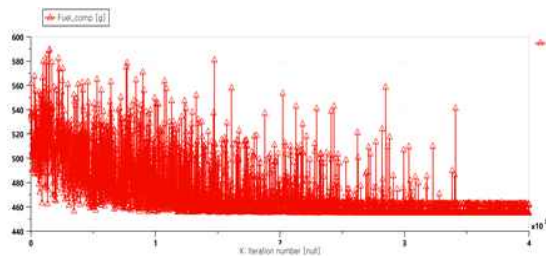


그림 16. 연료 소모량 최적화 결과

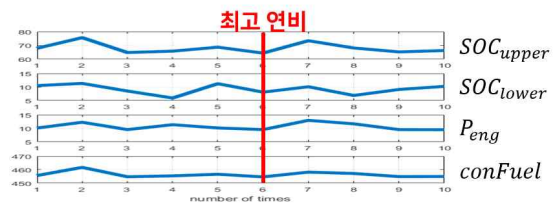


그림 17. 유전 알고리즘 10회 결과

GA	SOC_{upper}	SOC_{lower}	P_{eng}	conFuel
평균	68.02	9.18	10.66	456.40
분산	14.17	3.36	1.67	4.87
표준편차	3.76	1.83	1.29	2.21

표 4. 유전 알고리즘 평균, 분산, 표준 편차

유전 알고리즘은 전역적 해를 구할 수 있지만 그 해의 정확성은 보장하기 힘들다. 이를 확인하기 위해 동일한 조건에서 유전 알고리즘을 10회 시행한 결과는 그림 18과 표 4에 나타나 있다. 이에 대한 평균, 분산, 표준 편차를 보면 평균값과 매우 가깝게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다.

여기서 구한 최고 연비는 표 5와 같다.

설계 변수	값
SOC_{upper}	80 → 64.37 [%]
SOC_{lower}	30 → 8.08 [%]
P_{eng}	15 → 9.53 [kW]
$conFuel$	517.80 → 454.66 [g]

표 5. 최적화 결과(최고 연비)

최적화 결과 초기 값 대비 12.2%의 연비 개선 효과를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 병렬형 하이브리드 자동차의 도시 주행 연비를 개선하기 위해 차량을 모델링 하고 규칙 기반 제어 전략에 따른 EV ↔ HEV 모드 제어 로직을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 연료 소모량은 시뮬레이션 결과를 통해 비선형적인 다변수함수임을 확인 할 수 있었고 연비를 개선하기 위한 최적화 문제를 정식화 하고 유전 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하였다. 동일한 조건에서 유전 알고리즘을 10회 수행하여 최적화 결과의 신뢰도를 향상시켰고 최적화 결과가 초기 값 대비 12.2%의 연비 개선효과가 있음을 확인하였다.

References

- 1) Sangmin Byun, Namwook Kim, Wonsik Lim, Suk-Won Cha, "HEV Optimal Control Using Future Driving Information", KSAE Annual Conference pp.2866-2869, 2009.
- 2) Young-Hun Ki, Chun-Young You, Chan-Woo Moon, Gu-Min Jeong, Hyun-Sik Ahn, Do-Hyun Kim, "Comparative Study of Control Strategy for a Parallel Mild Hybrid Electric Vehicle", The Korean Institute of Electrical Engineers Annual Conference pp. 241-242, 2007
- 3) Wonki Kim, Shunghwa Lee, Hyeongcheol Lee, "Optimal Control Strategy of the parallel plug-in hybrid vehicle", KSAE Annual Conference pp.1231-1238, 2014.