

임무장비를 고려한 직렬형 하이브리드 차량의 추진시스템 최적화 연구

A Study on Optimization of Propulsion Systems for Series Hybrid Electric Vehicles Considering Mission Equipments

장명언* 김상만* 한규홍* 여승태*

Myeong-Eon Jang Sang-Man Kim Kyu-Hong Han Seung-Tai Yeo

ABSTRACT

In this paper, the study was conducted on the subject of the hybrid electric vehicles used by the military, and optimized the propulsion system for fuel economy considering energy supply to the mission equipments. For the analysis of the vehicles, a method based on the geometry and some assumptions was applied with basic vehicle dynamics. The sources of energy supply in the military hybrid electric vehicles are an engine, a battery and an ultra-capacitor. The optimal operation point among an engine, a battery and an ultra-capacitor can be found by minimizing energy consumption of driving power train and mission equipments. In the study, it was possible to find the optimal propulsion system by comparing fuel efficiency of the vehicles during the driving cycle.

Keywords : Optimization(최적화), Propulsion Systems(추진시스템), Mission Equipments(임무장비), Driving Cycle(주행 사이클)

1. 서론

군대에서 사용하는 하이브리드 차량은 직렬형 타입을 주로 사용하며, 임무장비를 탑재하여 임무 수행을 할 수 있다. 통신장비 등 임무장비에 에너지를 공급함으로써 기동성이 좋은 고효율의 에너지원으로서 역할을 담당할 수도 있고, 적과의 전투 시에 무소음 기동 등의 임무도 수행할 수 있어 유용한 군용장비가 될 것

으로 예측된다. 또한, 고유가 시대를 대비하여 고연비의 차량을 운영함으로써 전순기 동안의 차량 유지비를 절감할 수도 있기 때문에 선진국에서도 수십년 동안 연구를 계속해 오고 있다.

특히 미군은 내연기관 엔진차량(HMMWV)을 하이브리드 전기차량(HE-HMMWV)으로 대체하고자 막대한 재원을 투자하고 있으며, 그 목표는 다음과 같다^[1].

- 내연기관 엔진차량에 대비하여 연료 소비를 줄이고, 운영범위를 증대
- 차량 내/외부 부하를 위해 APU(Auxiliary Power Unit)와 같은 작동 능력을 갖음

† 2012년 10월 5일 접수~2013년 3월 15일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD) (기동사업단)

책임저자 : 장명언(jangmyeong@add.re.kr)

- 스텔스 모드로 조종할 때 소음과 열방출을 줄임
- 내연기관 엔진차량과 같은 일반적인 기능과 수송 능력을 유지

하이브리드 차량은 오늘날 자동차 산업에 있어서 고연비 및 배기가스 저배출을 위한 실행 가능한 해결책을 제공하고 있다. 지구 온난화 방지의 관점에서 탄소배출을 저감시키기 위한 환경 대책으로 하이브리드 차량에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 하이브리드 차량 개발을 위해 긴 시간과 많은 비용이 소요되는 시험평가를 대신하여 모델링, 분석, 설계를 촉진할 수 있는 시뮬레이션이 자주 요구되어 왔다^[2~5].

본 연구에서는 프로그램 범용 Tool인 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 차량의 수직항력 분석을 위해 기하학 및 스프링 모델에 근거한 차량 동역학 모델을 이용하였고, 다중 부하를 최적화하기 위해 슬립율에 따른 마찰력 변화 모델을 적용하였으며, 다중 동력원을 최적화하기 위해 Dynamic Programming (DP) 최적화 기법을 적용하였다. 본 연구의 2절에서는 적용된 차량시스템의 형상 및 제원을 소개하고, 3절에서는 최적화 시뮬레이션을 위한 방법을 제시하며, 4절에서는 개발된 프로그램으로 수행한 시뮬레이션 결과를 분석한다.

2. 차량 시스템

본 연구에서는 직렬형 하이브리드 4륜구동 전기차량을 대상으로 하며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 엔진, 배터리, 울트라커패시터(Ultra Capacitor)의 다중 동력원과 2개의 구동모터 및 임무장비로 구성되어 있고, 구동모터는 차량의 구동 및 회생 시에 이용한다. 본 연구에서 대상으로 하는 차량의 제원과 차량 내부의 추진시스템 및 임무장비의 제원은 Table 1과 같다.

3. 최적화 시뮬레이션 방법

가. 차량 동역학

본 연구에서는 축 차량에 개별적으로 연결된 모터 조합의 최적 운전점을 분석하기 위하여 4륜 구동 차량의 주행에 따른 각 축 수직항력, 추진력 및 주행 저항에 대하여 분석하였다.

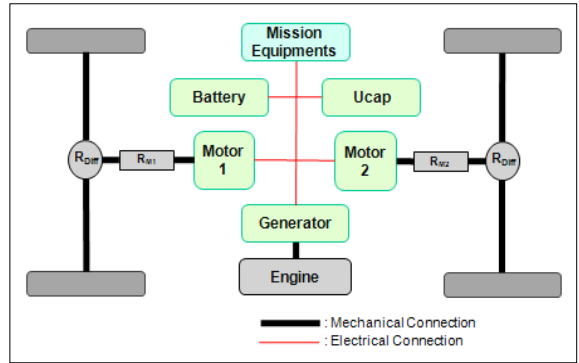


Fig. 1. 직렬형 하이브리드 차량의 추진시스템 형상 (4륜구동은 모터 2개, 2륜구동은 모터 1개)

Table 1. 차량 및 추진시스템/임무장비 제원

차량 제원	
Vehicle Weight	4 ton
Vehicle front area	3.5 m ²
Vehicle C.G. height	1.0 m
Length from C.G. to Front axis	2.0 m
Length from C.G. to Rear axis	1.3 m
Tire radius	0.45 m
추진시스템 및 임무장비 제원	
Engine 1. Max. Power	90 kW
Engine 2. "	120 kW
Battery 1. Capacity & Max. Power	30 Ah, 100 kW
Battery 2. "	60 Ah, 145 kW
Battery 3. "	90 Ah, 200 kW
Ultra-capacitor Capacity & Max. Power	7 Farad, 50 kW
Motor Max. Power	120 kW
Mission Equipment Power	10 kW

Fig. 2와 같이 각 축의 수직항력을 스프링 모델로 가정하여 미지수에 해당하는 각 축 수직항력 F_{z1} 과 F_{z2} 을 수직 힘 평형 및 모멘트 평형을 이용하여 식 (1) 및 (2)와 같이 계산하였다^[6].

$$F_{z1} = \frac{-F_a h_a - m \ddot{x} h - m g h \sin(\theta)}{l_1 + l_2} + \frac{m g l_2 \cos(\theta)}{l_1 + l_2} \quad (1)$$

$$F_{z2} = \frac{F_a h_a + m \ddot{x} h + m g h \sin(\theta)}{l_1 + l_2} + \frac{m g l_1 \cos(\theta)}{l_1 + l_2} \quad (2)$$

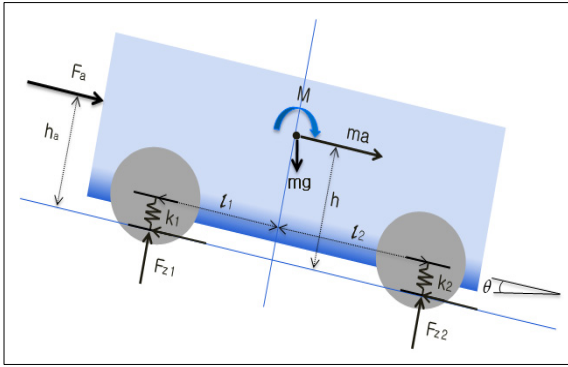


Fig. 2. 스프링 모델이 고려된 차량 동역학

나. 다중 부하 최적화

다중 부하 최적화를 위해 앞에서 계산된 차량 동역학 식과 주행 사이클을 이용하여 각 축의 수직항력 및 차량 부하 등을 계산한다. 다음으로 Fig. 3의 타이어 슬립율에 따른 마찰력 변화 모델을 적용하여 슬립율과 각 축의 추진력 관계를 산출한다⁷⁾.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 슬립율 0%에서 10%~15%까지는 타이어의 슬립율이 증가할수록 타이어 마찰력이 선형으로 증가함을 알 수 있다. 이때, 마찰력의 최대값은 지면의 상태에 따라 달라지며, 지면이 건조한 상태일수록 마찰력이 커짐을 알 수 있다. 따라서 슬립율 10%~15%까지는 타이어의 슬립율이 증가할수록 구동축에서 지면으로 전달하는 추진력이 증가하게 된다. 구동축에서 지면으로 전달하는 추진력은 타이어 슬립율에 의한 함수가 되기 때문에 모터의 출력 토크는 타이어의 슬립율에 의한 함수가 된다.

또한, 타이어의 슬립율은 식 (3)과 같이 차량의 주행 속도(V)와 축의 회전속도(rw)에 의하여 결정된다.

$$Slip(\%) = (1 - \frac{rw}{V}) \quad (3)$$

따라서 계산된 각 시간의 수직항력 및 차량 부하로부터 각 축의 슬립율에 따른 모터의 운전점을 결정할

수 있다. 차량 운전점이 결정되면 타이어 모델을 통해 모터의 구동 효율을 계산할 수 있으며, 이를 바탕으로 슬립율에 따른 다중 부하 에너지 소모량을 계산한다. 식 (4) 및 (5) 식을 통해 각 계산 시간의 다중 부하 에너지 소모량을 최소화하는 각 축의 슬립율 조합을 계산할 수 있으며, 이를 바탕으로 주어진 주행 사이클을 주행할 때의 차량의 최소 에너지 소모량을 계산할 수 있다.

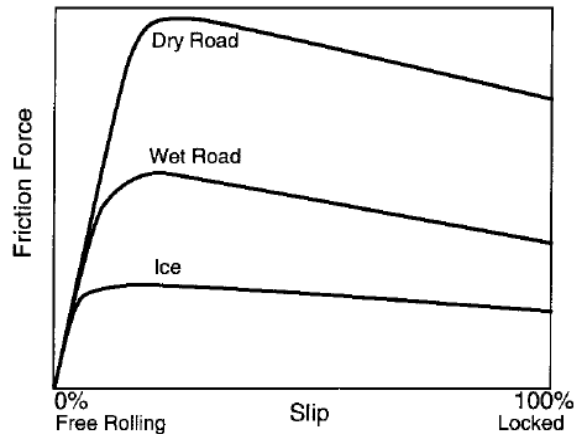


Fig. 3. 타이어 슬립율에 따른 마찰력 변화 모델

[구동시]

$$P_{total} = \frac{P_{mot1}(S_1)}{\eta_{mot1}(S_1)} + \frac{P_{mot2}(S_2)}{\eta_{mot2}(S_2)} \quad (4)$$

[제동시]

$$P_{total} = P_{mot1}(S_1)\eta_{mot1}(S_1) + P_{mot2}(S_2)\eta_{mot2}(S_2) \quad (5)$$

단, $0 \leq \eta_{mot} \leq 1$

다. 다중 동력원 최적화

본 연구에서는 엔진, 배터리, 울트라커패시터의 조합으로 구성되어 있는 차량의 다중 동력원 최적화를 위하여 Dynamic Programming(DP) 최적화 기법을 적용하였다.

Dynamic programming은 Bellman의 최적화 이론을 근거로 한 최적화 방법으로, 초기 조건과 말기 조건 및 다양한 제한 조건이 주어진 최적화 문제에서 이를 만족하는 최적의 경로를 찾는 최적화 방법이다. 이는 주어진 단계적 과정의 문제 혹은 단계적 과정으로 근사화할 수 있는 문제에 적용 가능하다⁸⁾.

일반적인 최적화 문제에서 가능한 모든 영역을 탐색하기 위하여 단계의 개수가 많아짐에 따라 계산량이 기하급수적으로 증가하는 것에 비하여, Dynamic programming을 적용한 최적화의 경우 주어진 단계의 수에 비례적으로 계산량이 증가하기 때문에 상대적으로 적은 계산을 통해 최적 경로를 찾을 수 있다는 장점이 있다.

일반적으로, Dynamic programming 이론에서의 최적화 문제는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (6)$$

식 (6)에서 제어변수 k 단계의 상태변수 x 와 제어변수 u 에 따라 다음 단계의 상태변수 $x(k+1)$ 가 정의되는 것을 알 수 있다.

Dynamic programming의 최적화를 위한 목적함수 J 는 N 개의 단계를 가진 상태 변수 x 와 제어 변수 u 에 따라 경로 비용 L 을 최소화하는 값의 합으로 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$J = \min \sum_1^N L(x(k), u(k)) \quad (7)$$

Dynamic programming은 이러한 최적화 문제의 정의를 바탕으로 식 (8)과 같이 $k+1$ 단계에서 최종 단계 N 까지의 최소 비용 $J_{k+1,N}^*(x(k+1))$ 을 알고 있을 경우 k 단계에서의 최소 비용 $J_{k,N}^*(x(k))$ 을 k 와 $k+1$ 단계에서의 비용 $L(x(k), u(k))$ 의 관계를 분석하여 계산하게 된다.

$$J_{k,N}^*(x(k)) = \min \{L(x(k), u(k)) + J_{k+1,N}^*(x(k+1))\} \quad (8)$$

이와 같은 정의를 바탕으로 초기 단계부터 최종 단계까지의 최소 비용 $J_{1,N}^*$ 을 계산하게 되며, 이러한 계산 방식은 최종 단계 N 부터 1까지 후방향(Backward)으로 이루어지게 된다.

본 연구에서 다중 동력원 최적화는 다중 부하 최적화 과정을 거쳐 각 시간의 최적 요구 동력원을 결정하게 된다. 이러한 요구 동력원을 Dynamic programming을 이용하여 최적화 작업을 수행한다. 이 때, 각 동력원 모델에 따라 SOC 변화량 및 엔진 연료 소모량을 바탕으로 최적화 작업이 수행된다. 최종적으로 결정된

최적 연료 소모량 등을 바탕으로 연비 및 성능 해석을 수행하게 된다.

4. 최적화 시뮬레이션 및 결과 분석

본 연구에서는 2절에서 기술한 제원을 가진 차량 시스템을 대상으로 3절의 차량 동역학 및 다중 부하 최적화, 다중 동력원 최적화 방법을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서의 시뮬레이션 조건은 엔진의 용량 변경, 배터리 용량 변경, 임무장비의 사용 유무, 울트라 커패시터의 사용 유무에 대하여, 전/후방의 모터 2개를 사용하는 4륜 구동과 후륜 모터만을 사용하는 2륜 구동 각각에 대하여 Fig. 4의 속도 프로파일을 갖는 주행 사이클 FTP-72를 따라 주행할 때의 최대 연비 성능을 비교하였다.

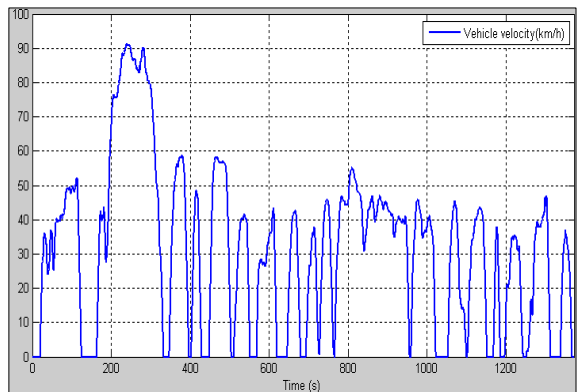


Fig. 4. 주행 사이클 FTP-72

주행 사이클 FTP-72는 미 연방정부의 자동차 배출 가스 인증에 사용되는 시험절차로서 UDDS(Urban Dynamometer Driving Schedule)로도 불리며, 도시지역 12.07 km의 거리를 최대속도 91.2 km/h, 평균속도 31.5 km/h로 주행하는 프로파일이다. 이 사이클은 다음과 같은 2단계로 나누어져 있으며, 2단계 시작은 엔진을 10분 동안 정지시킨 후 운전하게 되어 있다.

- 1단계 : Cold Start(0초~505초)
- 2단계 : Transient(505초~1369초, 864초간)

임무장비는 사용하지 않는 경우와 10 kW급 통신장

비를 50초에서 1300초까지 사용한 경우에 대하여 비교하였다.

시뮬레이션을 실제 차량과 유사하게 하기 위해 다음의 조건을 반영하였다.

- 엔진은 OOL(최적운전선도)상의 60 kW~100 kW 범위에서 출력
- 엔진 시동시 마다 에너지가 항상 3 kW 소요
- 모터/발전기 컨버터와 PCU 효율은 95% 적용
- 기어비는 7, 기어 효율은 85% 적용
- 배터리 SOC는 0.2~0.9 범위로 제한하며, 시뮬레이션 시작과 끝에서 0.7로 동일하게 유지
- 울트라캐패시터 SOC는 0.1~0.9 범위로 제한하며, 시뮬레이션 시작과 끝에서 0.6으로 동일하게 유지

Table 2는 시뮬레이션 연비 결과를 요약한 것으로 연료 1리터로 갈 수 있는 거리(km)를 나타낸 것이다. Table 2에서 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다. 더 좋은 연비 성능을 갖는 경우는

- 엔진 : 120 kW > 90 kW
- 배터리 : 1) 100 kW > 200 kW > 145 kW
2) 100 kW > 145 kW > 200 kW
- 울트라캐패시터 : 유 > 무
- 구동 : 4륜 > 2륜
- 임무장비 : 무 > 유 와 같이 분석되었다.

임무장비의 출력을 사용하지 않는 경우가 사용하는 경우에 비해 연비가 좋은 것은 직관적으로 쉽게 적절함을 판단할 수 있다.

4륜 구동을 사용하는 경우는 2륜 구동을 사용하는 경우에 비해 연비가 더 좋음을 본 결과에서 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 최적화된 제어 이론으로 연비를 계산함에 따라 산출된 결과이다. 하지만 실시간 차량 운행 시에는 전방과 후방의 구동모터를 액티브하게 제어하기가 어렵기 때문에 차량 안정성 및 출력 성능을 높이고자 3:7 또는 2:8의 고정된 비율로 전방/후방 구동모터 출력을 부가하게 되므로 연비면에서는 떨어지는 결과를 초래하게 된다. 따라서 각 추진시스템에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과를 분석하여 전방/후방 구동모터의 출력 부가 비율을 조정한다면, 차량 안정성 및 출력 성능과 연비 성능을 동시에 고려한 효율적인 추진제어가 가능할 것이다.

Table 2. 시뮬레이션 연비 결과(단위 : km/l)

1) 임무장비 : 없음

엔진	배터리	Ucap	2륜 구동	4륜 구동
90 kW	100 kW 30 Ah	없음	8.7376	8.7396
		7 Farad	8.8244	8.8274
	145 kW 60 Ah	없음	7.6819	7.6831
		7 Farad	7.7173	7.7177
	200 kW 90 Ah	없음	7.8491	7.8512
		7 Farad	7.9225	7.9277

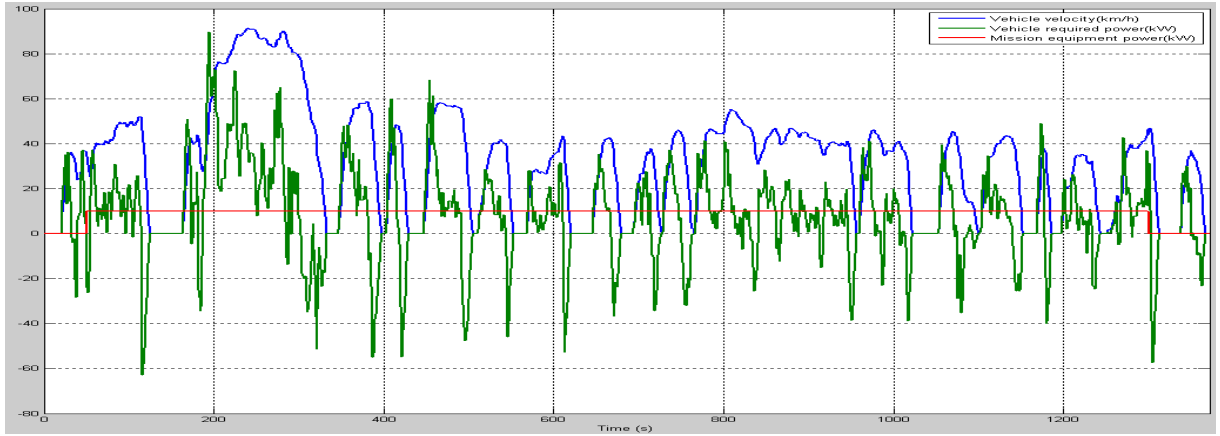
엔진	배터리	Ucap	2륜 구동	4륜 구동
120 kW	100 kW 30 Ah	없음	9.2034	9.2054
		7 Farad	9.3020	9.3037
	145 kW 60 Ah	없음	8.0183	8.0246
		7 Farad	8.0628	8.0631
	200 kW 90 Ah	없음	8.1942	8.1963
		7 Farad	8.2737	8.2800

2) 임무장비 : 10 kW

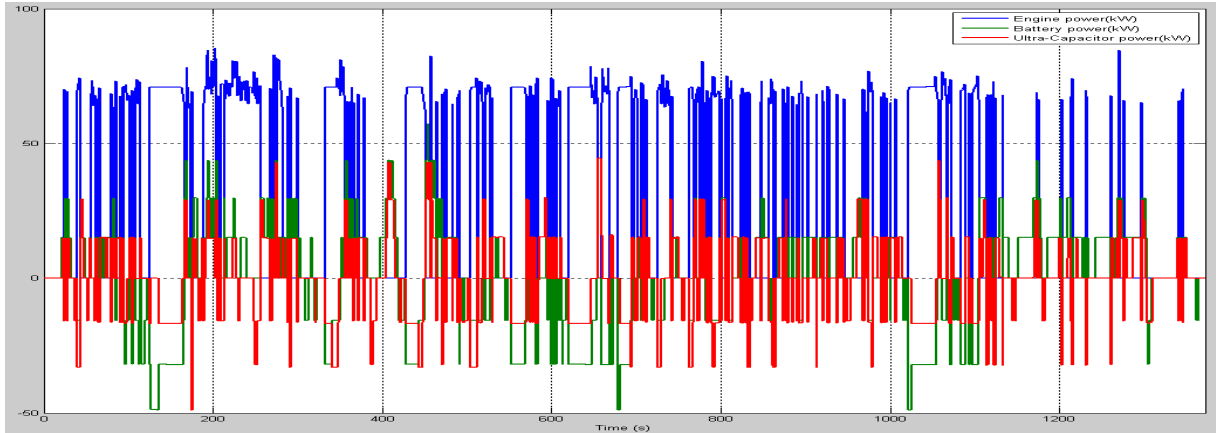
엔진	배터리	Ucap	2륜 구동	4륜 구동
90 kW	100 kW 30 Ah	없음	5.2398	5.2401
		7 Farad	5.2789	5.2797
	145 kW 60 Ah	없음	4.6077	4.6100
		7 Farad	4.6251	4.6265
	200 kW 90 Ah	없음	4.5533	4.5546
		7 Farad	4.5801	4.5851

엔진	배터리	Ucap	2륜 구동	4륜 구동
120 kW	100 kW 30 Ah	없음	5.5369	5.5383
		7 Farad	5.5848	5.5857
	145 kW 60 Ah	없음	4.8074	4.8097
		7 Farad	4.8248	4.8263
	200 kW 90 Ah	없음	4.7537	4.7544
		7 Farad	4.7810	4.7858

1) 차량 및 임무장비의 요구동력



2) 엔진, 배터리, 울트라커패시터의 소요동력



3) 전/후방 모터의 소요동력

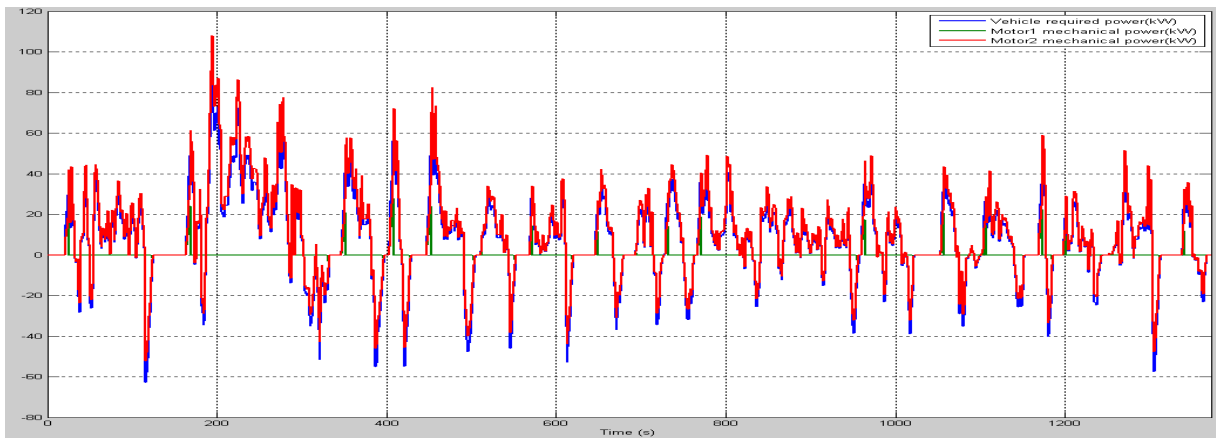


Fig. 5. 시뮬레이션 결과(임무장비 10 kW, 엔진 120 kW, 배터리 200 kW, Ucap 7 Farad, 4륜 구동 시스템)

울트라커패시터를 사용하는 것은 사용하지 않는 것보다 연비가 더 좋은데, 이는 에너지 충/방전 시에 울트라커패시터가 배터리 보다 저항값이 작아 에너지 충/방전 효율을 높일 수 있기 때문으로 판단된다. 따라서 실시간 차량 운행 시에 본 결과와 유사하게 울트라커패시터를 제어할 수 있도록 한다면 효율적인 에너지 제어가 가능할 것이다.

엔진과 배터리의 용량 변화에 따른 연비 성능은 엔진 120 kW, 배터리 100 kW 용량을 가진 추진시스템이 가장 좋은 연비 성능을 나타냈으나, 배터리 용량에 따른 일관성이 없기 때문에 대상 시스템의 특성에 따라 변경되므로 대상 시스템 설계 시에 최적화 시뮬레이션을 통하여 최적의 차량 및 구성품 사양을 선정하여 설계에 반영한다면 효율적인 차량을 운영할 수 있을 것이다.

본 논문 마지막에 있는 Fig. 5는 Table 2의 시뮬레이션 결과 중 한가지 경우(임무장비 10 kW, 엔진 120 kW, 배터리 200 kW, 울트라커패시터 7 Farad, 4륜 구동)에 대하여 주행 사이클 FTP-72에서의 차량 및 임무장비의 요구동력과 추진시스템의 소요동력 변화선도를 보여주고 있다. 이 변화선도는 추진시스템의 제원 및 특성에 따라 달라지는데, 본 논문에서는 앞서 정의된 추진시스템 제원으로 산출된 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

변화선도의 x축은 시간(second), y축은 동력(kW)이며, y축이 (+)이면 구동력, (-)이면 회생력이 차량에 작용된다. 차량의 속도가 증가하면 구동력이 커지며, 속도가 감소하면 모터가 발전기 역할을 하여 회생력이 발생한다.

엔진은 에너지를 발생시킬 수 있는 주 동력원이며, 배터리는 울트라커패시터 보다 큰 에너지를 발생시킬 수 있으므로 엔진/발전기와 효율을 고려하여 최적화 제어 이론에 따라 충방전을 한다. 회생시에 배터리는 울트라커패시터와 함께 차량의 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 충전한다. 울트라커패시터는 배터리 보다 내부저항이 작기 때문에 충/방전 시 에너지 손실이 적으나 에너지 저장량이 적기 때문에 짧은 주기의 고주파 영역에서의 충/방전에 효과적으로 사용할 수 있다.

이들 변화선도들은 추진시스템을 실시간 최적으로 제어하기 위한 참고자료로 사용할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 임무장비를 고려한 직렬형 하이브리드 차량을 대상으로 추진시스템 최적화 시뮬레이션을 수행하였다. 엔진의 용량 변경, 배터리 용량 변경, 임무장비의 사용 유무, 울트라커패시터의 사용 유무에 대하여, 4륜 구동과 2륜 구동 각각에 대하여 주행 사이클 FTP-72를 따라 주행할 때의 최대 연비 성능을 비교하였다.

시뮬레이션 결과, 임무장비를 사용하지 않는 경우, 4륜 구동의 경우, 울트라커패시터가 있는 경우에 더 좋은 연비 성능을 갖는 것으로 분석되었다. 엔진과 배터리 용량은 추진시스템에 따라 연비 성능이 달라지므로 대상 시스템 설계 시에 최적화 시뮬레이션을 통하여 최적의 구성품 사양을 선정할 필요가 있다.

또한, 시뮬레이션 결과로서 산출된 각 시간에 따른 차량 및 임무장비의 요구동력과 추진시스템의 소요동력 변화선도들은 실시간 추진시스템의 효율적인 제어에 이용할 수 있을 것이다.

References

- [1] H. Bargar, J. Li, D. Goering and J. Lee, "Modeling and Verification of Hybrid Electric HMMWV Performance", Industrial Electronics Society, 2003, IECON '03, The 29th Annual Conf. of the IEEE 2003, pp. 939~944, 2003.
- [2] A. Antoniou, J. Komyathy, J. Bench and A. Emadi, "Modeling and Simulation of Various Hybrid-Electric Configurations of the High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle(HMMWV)", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 56. No. 2, pp. 459~465, March 2007.
- [3] S. Bogosyan, M. Gokasan, D. Goering, "A Novel Model Validation and Estimation Approach for Hybrid Serial Electric Vehicle", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 56. No. 4, pp. 1485~1497, July 2007.
- [4] S. Fish and T. Savoie, "Simulation-Based Optimal Sizing of Hybrid Electric Vehicle Components for Specific Combat Missions", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37. No. 1, pp. 485~488, January

- 2001.
- [5] M. Ali, C. Kim, H. Shim, Y. Kim and C. Han, "Modeling and Simulation of Six Wheel Skid Steering Vehicle(6×6) for Development of Torque Control Algorithm", KSAE Conf. pp. 612~617, 2009.
- [6] Rajesh Rajamani, "Vehicle Dynamics and Control", Springer, pp. 95~122, 2006.
- [7] Thomas D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineering Inc., pp. 342~344, 1992.
- [8] Brett Bethke, "Approximate Dynamic Programming Using Bellman Residual Elimination and Gaussian Process Regression", 2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, pp. 745~750, 2009.
- [9] Y. Gao and M. Ehsani, "Parametric Design of the Traction Motor and Energy Storage for Series Hybrid Off-Road and Military Vehicles", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 21. No. 3, pp. 749~755, May 2006.