하이브리드 이륜차의 동력원 용량 매칭 및 연비평가

이 대 인¹⁾ · 박 영 일^{*2)}

서울과학기술대학교 대학원 기계시스템디자인공학과¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과²⁾

Component Sizing and Evaluating Fuel Economies of a Hybrid Electric Scooter

Daein Lee¹⁾ · Yeong-il Park^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical System Design Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 15 July 2011 / Revised 18 October 2011 / Accepted 18 October 2011)

Abstract : Recently, most of the countries started to regulate the emission of vehicle because of the global warming. The engine scooter is also one of the factor which cause the pollution. The hybrid system of a vehicle has many advantages such as fuel saving and emission reduction. The purpose of this study is to choose optimal size of engine, motor and battery for hybrid scooter system using Dynamic programming. The dynamic programming is an effective method to find an optimal solution for the complicated nonlinear system, which contains various constraints of control variables. The power source size of hybrid scooter was chosen through the backward simulator using dynamic programming. From the analysis, we choose the optimal size of each power source. To verify the optimal size of the power source, the Forward simulation was carried out. As a result, the fuel efficiency of hybrid scooter has significantly increased in comparison with that of engine scooter.

Key words : Hybrid electric scooter(하이브리드 이륜차), Fuel economy(연비), Dynamic programming(다이나믹 프로그래밍), Component sizing(용량 매칭), Simulation(시뮬레이션)

1. 서 론

최근 대기오염에 의한 지구 온난화의 진행이 가속화 되어가고 있고 이러한 오염물질은 내연기관 차량에서 배출되는 배기가스에서 많은 양이 배출되고 있다. 그 중 내연기관을 사용하는 이륜차도 마찬가지로 그 수의 꾸준한 증가로 인해 환경오염의 심각성이 커지고 있다. 이륜차에서 배출되는 오염물질 중 일산화탄소의 양은 50cc급 이륜차를 기준으로 하여 주행거리 1km당 일반승용차에 비해 8배, 탄

화수소는 140배에 달하는 것으로 나타났다. 이륜차의 오염물질 배출이 심한 이유는 2행정 사이클 엔진의 특성상 불완전 연소가 많고 배기가스 오염물질 저감장치가 자동차에 비해 허술하기 때문인데 이러한 유해성분은 인체에 직·간접적으로 영향을 주기 때문에 그 심각성이 크다고 볼 수 있다.¹⁾ 그렇기 때문에 이륜차시장에서도 적용 가능한 대체 동력원의 필요성이 제기 되고 있다. 현재로서는 전기 이륜차가 몇몇 국가에서는 상용화되어 사용되어 지고 있지만 전기이륜차의 동력성능, 배터리의 용량과 수명 그리고 충전시간 문제 등이 아직도 해결되어야

*Corresponding author, E-mail: yipark@seoultech.ac.kr

될 과제로 남겨져 있다. 그러므로 기존의 엔진이륜차에 모터를 장착하는 하이브리드 이륜차가 그 대안 중에 하나가 될 수 있으며 여러 종류의 Prototype이 소개되고 있고 일부에서는 양산 기종이 판매되고 있다.

하이브리드 시스템을 구성하기 위해서는 우선 하이브리드시스템을 구성하는 구성요소인 엔진, 모터, 배터리의 용량을 결정하는 작업이 중요하며, 하이브리드 시스템의 용량매칭은 연비 및 배기가스에 직접적인 영향을 미치는 요소이다.

일반적으로 배기가스의 양은 연료의 사용량에 비례하며 엔진의 배출가스에 대한 데이터 획득의 어려움 때문에 연비향상에 중점을 두고 하이브리드화 과정에 필요한 용량매칭을 수행하게 된다.

본 논문에서는 하이브리드 이륜차를 개발하기 위하여 연비향상을 중심으로 하이브리드 이륜차의 동력원인 엔진과 전동기의 적합한 용량기준을 최적화 기법을 이용한 후방향 시뮬레이션을 통하여 제시하고 선정된 동력원 용량을 전방향 시뮬레이션을 통하여 연비의 향상을 비교 검증하였다.

2. 하이브리드 이륜차 동력원 용량 설계

일반적으로 차량의 연비를 향상시키기 위해서는 주행제어 알고리즘의 개발과 함께 엔진, 모터, 배터리의 적절한 용량 선정 기법을 적용한 후 이에 적합한 주행제어 알고리즘을 개발하는 것이 필요하다.

따라서 본 장에서는 하이브리드 이륜차의 용량 선정 시 우선적으로 선정되어야 할 차량의 요구 성능에 대한 구속조건들을 선정을 통해 용량 조합 군을 결정하여 Table 1과 같은 50cc 2행정 이륜차를 기

Table 1 Properties of the target vehicle

Air density (kg/m ³)	1.204 (20°C, atm)
Frontal area, Af (m ²)	0.6
Air drag, Cd(-)	0.75
Rolling resistance	0.0068
Vehicle mass, (kg)	80
Gravity, g (m/s ²)	9.81
Angle, α (%)	9°, 15
Transmission gear efficiency, η_d	0.9
Final gear efficiency, η_t	0.85

준으로 하이브리드 이륜차의 최적의 용량을 선정하였다.²⁾

2.1 차량 최대 속도

먼저 최대 순항 속도를 유지 할 수 있는 동력을 기준으로 엔진의 최소 용량을 선정한다. 차량의 최대 순항속도 주행 시에는 충전을 할 수가 없으므로 엔진의 동력만으로 달성될 수 있어야 한다. 변속기 동력 전달 손실과 차량 부하를 고려하여 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{1}{\eta_d \cdot \eta_t} \cdot F_{veh} \times v_{veh} \\
 &= \frac{1}{\eta_d \cdot \eta_t} \cdot (F_a + F_r) \times v_{veh} \\
 &= \frac{1}{\eta_d \cdot \eta_t} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2 \right. \\
 &\quad \left. + C_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha) \right) \times v_{veh}
 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)으로 계산된 차량 순항 속도에 대한 엔진용량의 상한선과 하한선은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1 Engine power for maximum vehicle speed

2.2 등판성능

등판 성능의 경우 최대 탑승 인원을 고려하여 20km/h의 등속도로 15%의 경사도를 주행하는데 요구되는 동력을 식 (2)을 통해 계산하였다. 단 모터의 효율은 일정하다고 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 P_{total} &= F_g \times V_{veh} = m_v \times g \times \sin \alpha \times v_{veh} \\
 P_{total} &= \frac{1}{\eta_d \cdot \eta_t} \cdot P_e + \frac{1}{\eta_d \cdot \eta_t \cdot \eta_m} \cdot P_m
 \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 2 Required power of the engine and motor for uphill driving

차량 기준 경사도에 대한 엔진과 모터 용량은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2와 같이 엔진만으로 주행할 경우 약 4.3kW급 이상의 엔진이 필요하고, 모터만으로 구동할 경우 모터효율로 인하여 약 4kW급 이상의 모터 용량이 필요하게 된다.

2.3 가속성능

일반적으로 차량의 가속능력은 기준은 없지만 10sec 이내에 30km/h까지 도달 할 수 있는 엔진과 모터의 하한 기준을 선정하여 전방향 방식의 시뮬레이션을 통해 Full Throttle상황에서의 차량 가속 시간과 요구 동력량을 산출하였다. 차량의 가속 성능은 아래와 같이 식 (3)과 같다.³⁾

$$a = \frac{dV}{dT} = \frac{F_t + F_a + F_r}{M\delta}$$

$$= \frac{T_P i_0 i_g \eta_t / r_d - M_g f_r - 1/2 \rho_a C_D A_f V^2}{M\delta} = \frac{g}{\delta} (d - f_r) \quad (3)$$

2.4 모터 용량

모터의 용량을 선정함에 있어서 단품의 비용과 무게를 고려하였다. 모터의 경우는 출력 당 비용 (\$/kW)을 통한 최대 모터용량 기준을 고려하고 최대 무게 10kg을 넘지 않는 범위 내에서 최대 3kW의 용량을 가지는 모터용량을 선정하였다.

Fig. 3 Required power of the motor & battery in consideration of the cost

2.5 동력원 범위 및 배터리 용량 선정

앞서 2.1~2.4절의 내용을 통하여 계산된 엔진과 모터, 배터리의 최소, 최대 용량들의 제한조건을 Fig. 4와 같이 Feasible Region을 구성하였다.

Feasible Region 내에서 모든 용량 조합들을 계산할 수 있으나 이는 비현실적이고 실제 적용 불가능한 조합들이 발생할 수 있기 때문에 Table 2와 같은 실제 적용이 가능한 엔진과 모터의 각각 6개 후보군으로 Fig. 5와 같은 26개의 후보군을 선정하였다.

해석에 사용된 주행 사이클은 실제 이륜차의 주행 형태와 유사하다고 판단되는 ECE, Cudec congested, Inrets urban 1의 3종류의 주행모드를 사용하여 실제 이륜차의 요구동력을 유사하게 추종할 수 있게 하였다.

Fig. 4 Feasible region for component sizing of hybrid electric scooter

Table 2 Candidate size for power source

	Engine	Motor	Driving cycle
1	4.5kW	PM 0.5kW	Ece-15
2	4kW	PM 1kW	Cudec_congested
3	3.6kW	PM 1.5kW	Inrets_urban1
4	3.3kW	PM 2kW	
5	2.8kW	PM 2.5kW	
6	2.4kW	PM 3kW

Fig. 5 Feasible region and selected candidate set

Fig. 6 Driving cycle for simulation

배터리 용량은 최대 모터용량인 3kW급 모터에 대하여 충·방전 효율을 고려하여 Fig. 7과 같이 후방향 시뮬레이션을 이용한 SOC 추정 결과를 참고하여 선정하였다.

시뮬레이션 결과, SOC의 적정 작동범위가 45~75% 내에 있는 용량 중 비용을 고려하여 배터리 용량을 선정한다.

Fig. 7 SOC history for each battery power

3. 후방향 시뮬레이션을 통한 연비 도출

최적화 기법 중 하나인 다이나믹 프로그래밍(Dynamic Programming)을 이용한 후방향 시뮬레이터 (Backward Simulator)를 개발하고 시뮬레이션을

Fig. 8 Simulation results for fuel consumption (km/ℓ)

통해 26개의 조합에 대한 연비 평가를 수행하였다.

다이나믹 프로그래밍은 Bellman의 Hamiltonian-Jacobian Equation으로부터 출발하고 경로 이동에 소요되는 모든 비용 값을 계산해 최소의 비용이 소요되는 경로를 계산하는 최적화 방법이다.⁴⁾

Fig. 8과 같은 각 주행 사이클의 연비 평가 결과를 보면 연비효율은 다소 차이가 나지만 유사한 영역에서 최대 연비효율을 보이는 것을 알 수 있다. 엔진의 경우 2.4kW~2.6kW에서 가장 높은 연비 효율을 이고 엔진사양이 증가할수록 연비가 감소되는 경향을 보이고 있다. 모터의 경우는 엔진과 반대로 모터 사양이 2.5kW~3kW에서 가장 높은 연비 효율을 보이고 모터 용량이 작을수록 연비가 감소되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 모터의 용량을 증가시키면 효율이 좋아지지만 이에 따라 배터리 용량이 증가하여야 하므로 비용과 무게의 증가에 따라 제한을 받게 된다.⁵⁾

4. 전방향 시뮬레이션을 통한 연비 평가

본 절에서는 전방향 해석법을 적용한 전방향 시뮬레이터(Forward Simulator)를 Matlab Simulink로

구성하여 엔진이륜차와 앞서 선정된 동력원을 적용한 하이브리드 이륜차에 대한 시뮬레이션을 수행하여 연비 평가를 수행하였다.⁶⁾

4.1 엔진 이륜차의 연비평가

엔진 2.4kW이 적용된 엔진 이륜차의 전방향 시뮬레이터를 Fig. 9와 같이 개발하여 각 주행 사이클에 대한 차량의 성능에 대하여 분석하였다.

개발 시뮬레이터에 적용 엔진의 성능선도를 적용하여 각 주행모드별로 성능해석을 수행하였고 Fig. 10은 Cudec congested 모드의 주행결과이다.

엔진 이륜차의 주행은 주행 모드를 잘 추종하고 있으며, 각 주행모드별 연비는 ECE 주행 모드에서 11.73 km/ℓ, Cudec congested 주행 모드에서 10.3 km/ℓ, Inrets urban 1 주행모드에서 10.74 km/ℓ 이다.

4.2 하이브리드 이륜차의 연비평가

하이브리드 이륜차의 후방향 성능해석에서는 엔진과 모터를 사용하는 이륜차를 운행하는 주행 제어 전략이 필요하며, 이를 위해서 앞서 수행하였던

Fig. 9 Forward simulator for engine scooter

Fig. 10 Simulation results for engine scooter

Fig. 11 Backward simulation results of engine & motor speed

후방향 시뮬레이션 결과를 바탕으로 엔진과 모터의 작동 점을 추출하여 각 단품의 작동 영역을 분석하였다. 그리고 하이브리드 이륜차의 작동모드를 모터모드, 엔진모드, 하이브리드모드, 회생제동모드로 구별하여 각 모드별 작동 영역을 선정하였다.

Fig. 11은 후방향 시뮬레이션 결과에서 엔진과 모터의 주행 경로에 대한 동작속도를 나타낸다. 엔진

Fig. 12 Forward simulator for hybrid scooter

Fig. 13 Simulation results for hybrid scooter

Table 3 Simulation results on Fuel economy at each driving cycle

	Fuel economy (km/ℓ)		
	ECE	Cudec congested	Inrets urban 1
Engine scooter	11.7	10.3	10.7
Hybrid scooter	18.8 (60%)	16.2 (57.2%)	16.1 (50.1%)
Backward simulation	20.8 (77.4%)	17.4 (69%)	18.6 (73.3%)

은 이륜차가 가속할 때와 고속으로 주행 때 사용되고 모터의 경우는 전 영역에서 작동되는 것을 알 수 있다. 주행제어는 같은 패턴으로 엔진과 모터의 작동시키고 배터리 사용을 줄이기 위해 지속적인 고

속 주행 시에는 엔진만으로 주행하도록 하였다.

제어전략을 포함한 하이브리드 이륜차의 전방향 시뮬레이터를 Fig. 12와 같이 구성하였다.

하이브리드 이륜차의 주행은 주행 모드를 잘 추종하고 있으며, 각 주행모드별 연비는 Table 3과 같이 ECE 주행 모드에서 18.8 km/ℓ, Cudec congested 주행 모드에서 16.2 km/ℓ, Inrets urban 1 주행모드에서 16.1 km/ℓ이다. 이 결과는 후방향 시뮬레이션의 연비인 ECE 주행 모드에서 20.8 km/ℓ, Cudec congested 주행 모드에서 17.4 km/ℓ, Inrets urban 1 주행모드에서 18.6 km/ℓ 보다는 연비효율이 떨어지지만 엔진 이륜차보다는 50%~60% 연비 효율이 높아졌다.

ECE 주행 모드는 이륜차를 단순히 출발, 정지하는 모드이기 때문에 복잡한 주행 모드보다 연비가 높게 나타났고 동일한 제어 전략을 사용하는 경우에는 주행모드별로 차이가 나는 연비효율의 증가를 보이게 된다. 후방향 시뮬레이션은 다이나믹 프로그램을 이용하여 제어전략과 무관하게 엔진과 모터의 최적 운전점에서 운행하기 때문에 가장 높은 연비효율을 나타내게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 하이브리드 이륜차를 설계할 때 선행되어야 할 동력원의 용량 설계에 대한 연구이다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 하이브리드 이륜차는 엔진과 모터가 복합적으로 연비에 영향을 미치므로 다이나믹 프로그래밍이 적용된 후방향 시뮬레이터를 통해 최적의 연비 효율의 조합을 선정하였다. 시뮬레이션의 부담을 줄이기 위하여 먼저 제시되는 사양에 따라 Feasible Region을 정하고 사용 가능한 엔진과 모터의 용량을 대상으로 한다.
- 2) 용량 매칭 결과는 엔진은 용량이 증가할수록 연비가 감소되고 모터는 용량을 증가하면 연비가 좋아지지만 모터 용량 증가에 따라 배터리 용량이 증가하므로 비용과 무게의 증가하게 되어 제한을 받는다.
- 3) 하이브리드 이륜차에 대한 연비 평가를 수행하기 위하여 후방향 시뮬레이션 결과를 바탕으로

엔진과 모터의 최적 작동점을 추출하고 작동 영역을 분석한 제어 전략을 이용한 전방향 시뮬레이션을 수행하였다.

- 4) 하이브리드 이륜차는 엔진 이륜차에 비해 주행 모드에 따라 차이는 나지만 연비효율이 50%~60% 증가하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) D. I. Lee and Y. I. Park, "Component Sizing of a Hybrid Electric Scooter Using Dynamic Programming," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.2398-2401, 2011.
- 2) D. H. Lee, J. R. Jeong, C. W. Shin, Y. I. Park and S. K. Cha, "Component Sizing of a Heavy-duty Hybrid System Using Optimal Control Method," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.2893-2898, 2009.
- 3) B. David, Introduction to Control Theory, including Optimal Control, Ellis Horwood, New York, 1980.
- 4) D. E. Kirk, Optimal Control Theory. An Introduction, Prentice Hall, New Jersey, 1970.
- 5) N. W. Kim, D. H. Lee, S. Yang, Y. I. Park and S. W. Cha, "Optimization for Analyzing Fuel Consumption of HEV's," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.2042-2047, 2008.
- 6) J. Y. Jeong, D. H. Lee, C. W. Shin, W. S. Lim, Y. I. Park and S. W. Cha, "Analysis of Correlation of Fuel Efficiency and Cost Depending on Component Size of Heavy-duty Parallel Hybrid System," Transactions of KSAE, Vol.19, No.3, pp.73-82, 2011.