

플러그인 하이브리드 전기 트랙터에서 다양한 작업환경을 고려한 주행전략에 대한 연구[§]

강형목* · 정대봉* · 김민재* · 민경덕*†

* 서울대학교 기계항공공학부

Study of Energy Management Strategy Considering Various Working Modes of Plug-in Hybrid Electric Tractor

Hyungmook Kang*, Daebong Jung*, Minjae Kim* and Kyoungdoug Min*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received June 18, 2012 ; Revised September 27, 2012 ; Accepted October 4, 2012)

Key Words: PHET(플러그인 하이브리드 전기 트랙터), Strategy(주행전략), Working Mode(작업 환경), Tractor(트랙터)

초록: 농업용으로 사용되는 소형트랙터 개발의 최근 이슈는 친환경과 높은 연비이다. 소형 트랙터는 비닐 하우스 등 실내에서 작업이 가능하도록 설계 되므로 최근 전기 트랙터에 대한 수요가 증가하고 있다. 그러나 전기트랙터는 배터리 등 전기에너지 저장장치의 용량 및 크기공간의 제약으로 충분한 작업시간과 성능 확보에 한계가 존재한다. 따라서 최근 전기 트랙터와 내연기관 트랙터의 특징을 결합한 플러그인 하이브리드 트랙터에 대한 개발이 진행 중이다. 트랙터는 기본 주행 능력외에 PTO 를 통한 여러 작업을 수행 할 수 있어야 하며, 플러그인 하이브리드 트랙터에서는 각각의 작업에 대한 주행전략이 필요하다. 본 연구에서는 트랙터의 작업 모드를 개발하고 그에 대한 각 작업의 작업시간 능력 등을 확인하였다.

Abstract: In recent years, eco-friendliness and high fuel economy have become important issues for commercial tractors. Electric tractors are often required for operation in a greenhouse. However, the battery capacity limits the available operation time. To overcome this problem, a plug-in hybrid electric tractor is considered a reasonable alternative. This tractor has a basic driving ability and can operate in various working modes such as mower, rotary, loader, and trailing. This study focuses on the energy management strategy by considering various working modes.

1. 서 론

최근 석유고갈 문제 및 환경에 대한 사회적 관심이 증가하면서 자동차에 대한 소비자와 정부의 요구가 다각도에서 대두되고 증가하고 있다. 승용차에 적용되어 상용화에 이르고 있는 내연기관 외에 다른 동력으로 자동차를 구동시키는 기술들은 버스와 굴삭기 등 특수목적 자동차 들에게도 적용

이 진행되고 있다.^(1,2) 특수목적 자동차들은 기존의 승용차와는 다른 설계특성 및 사용특징을 가지고 있기에 각각 자동차에 맞는 새로운 제어 전략을 필요로 한다.

트랙터는 장시간 야외에서 사용될 뿐 아니라 다양한 활용 가능성에 맞게 비닐하우스 등 실내에서 사용되기도 한다.⁽³⁾ 실내에서 사용하기 위해서는 배출가스가 배출되지 않는 전기 트랙터(Electric Tractor)가 가장 이상적인 대안으로 제시되고 있지만 에너지 저장장치의 용량 문제로 충분한 작업시간이 확보되지 않고 있다. 따라서 최근 Plug-in 하이브리드 전기 트랙터에 대한 연구가 활발하며 양산을 위한 준비가 진행 중이다. 실내작업(비닐하우스) 및 짧은 작업에서는 전기트랙터로서 작업을 진행하며 장시간 작업에서는 내연기관이 구동 모

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부분
춘계학술대회(2012. 5. 17.-18., 재료연구소) 발표논문임

† Corresponding Author, kadmin@snu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

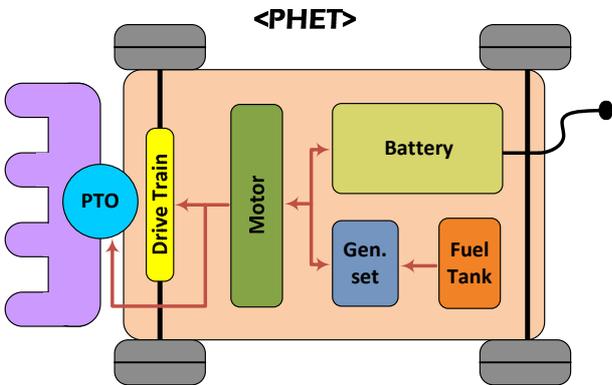


Fig. 1 The schematic diagram of PHET

터의 필요 동력을 생산하는 Hybrid 방식으로 PHET(Plug-in Hybrid Electric Tractor) 개발이 진행되고 있다.

자동차를 하이브리드화 하기 위해서는 여러 동력원들의 특성들을 통합적으로 고려하는 주행전략이 필요하다.⁽⁴⁾ 기존에 다양한 승용차와 특수 목적 자동차에 대해서 실험에 선행하여 신뢰성 높은 해석이 진행되어왔지만 하이브리드 트랙터에 대한 연구는 진행된 바가 없었다.

트랙터에서는 목적에 따라 다양한 작업을 수행하지만 작업에 대한 요구 출력 등 구동 요구조건이 비교적 정해져 있다. 그에 따라 PHET에서는 연료의 효율적 소비와 작업 수행시간 증가를 위해 작업에 적합한 주행전략이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 작업의 작업 모드를 개발하고 특성을 확인하였다. 시뮬레이션 모델링을 이용하여 최종적으로 각각의 작업에 적합한 주행전략을 개발하고 PHET의 작업능력을 확인하고자 하였다.

2. 배경

2.1 직렬형 하이브리드 트랙터 구성

Fig. 1 은 직렬형 플러그인 하이브리드 트랙터의 구성을 나타내는 개략도이다. 직렬형 타입으로 엔진은 구동축과 물리적으로 분리 되어 있다. 주행을 위한 요구출력과 PTO(Power take off: 동력인출장치)를 통한 작업 요구출력은 모두 모터가 담당하는 구조이다. 모터를 구동하는 에너지는 주로 외부에서 충전 가능한 배터리가 담당하고 있으며 배터리가 과다 방전된 경우 엔진과 발전기, 인버터 등으로 이루어진 발전계가 보조 전원을 공급한다. 플러그인 하이브리드 트랙터의 경우 주 에너지 공급원이 배터리에 저장되는 전기 에너지이기

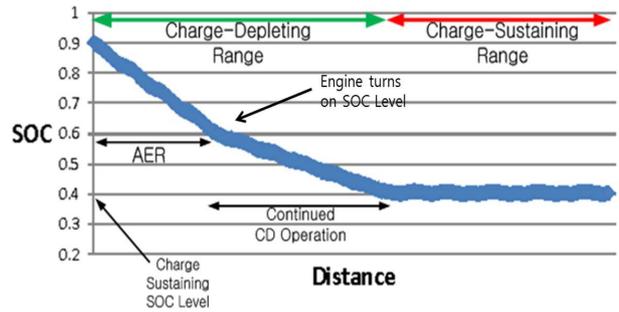


Fig. 2 The control parameter of Plug-in HEV

에 배터리는 일반 하이브리드 차량의 배터리에 비해 큰 용량으로 채택된다. 트랙터가 작업을 할 때에는 주행을 위한 주행 요구출력보다 PTO 에서 사용되는 작업 요구출력이 월등하게 크다.

2.2 플러그인 하이브리드 차량 제어 전략

플러그인 하이브리드 차량을 구동할 때 주 에너지원은 배터리의 전기 에너지이며 차량의 에너지 제어 전략 역시 이를 최대한 활용하는 방향으로 설정된다. 플러그인 하이브리드 차량의 주행 중 배터리가 주 에너지 공급원으로서 주행되는 구간을 Charge-Depleting (CD) Range, 연료가 주 에너지 공급원이 되어 주행되는 구간을 Charge-Sustaining (CS) Range 라 지칭한다. 특히 배터리 에너지만으로 이용하여 주행되는 구간을 All Electric Range(AER) 라 지칭하며 이 구간은 플러그인 하이브리드 차량의 장점을 극대화 할 수 있는 구간으로 마치 전기트랙터와 같이 주행을 하게 된다.⁽⁵⁾ 플러그인 하이브리드 트랙터에서 위 개념의 구간을 적용을 위한 SOC(State of Charge) 변화에 따라 엔진의 On/Off, 작동출력 등을 결정하는 SOC level 은 주요 제어변수이다. Fig.2 에 플러그인 하이브리드 차량에서 주행거리에 따른 SOC 변화에 대한 제어 개념을 정리하였다

3. PHET 의 제원

본 연구에서 목표로 하고 있는 PHET 의 기존 차량은 Fig.3 에 나타난 17kW 급 다목적 트랙터이며 기본 주행 외에 PTO 를 사용하여 Mower(잔디깎이), Rotary(밭 갈기), Loader(적재), Trailing(견인) 작업을 수행 할 수 있다.

17 kW 급 트랙터는 실내에서도 사용 할 수 있는 소형 트랙터로서 하이브리드화를 위하여 모터와 엔진, 배터리 등을 장치하는데 공간적 제약이 있다. 따라서 최대한 작은 크기의 부품을 사용하는



Fig. 3 17 kW (23 hp) Tractor

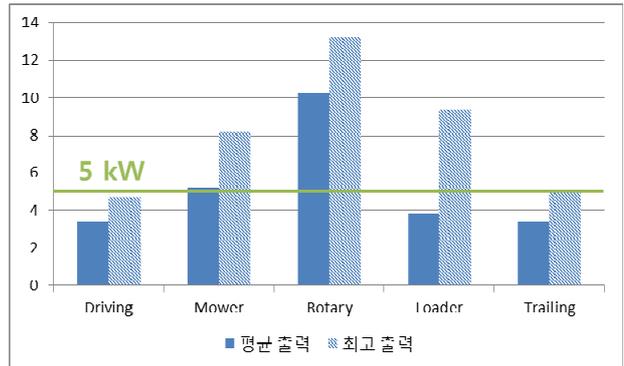


Fig. 5 The character of working modes

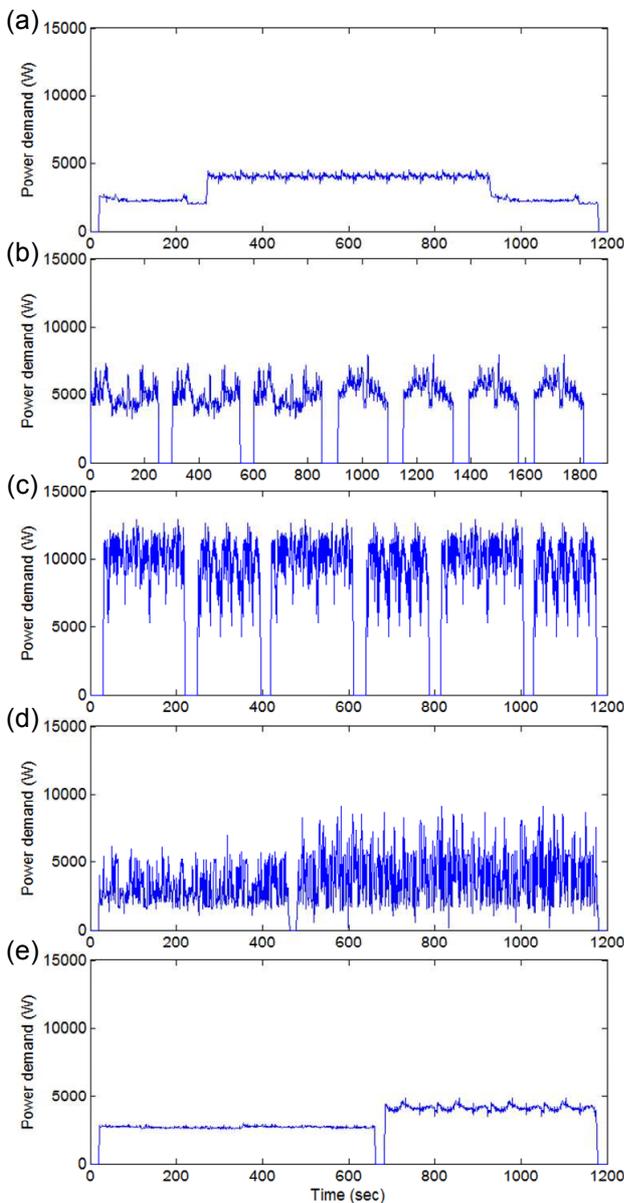


Fig. 4 working profile of (a) Driving (b) Mower (c) Rotary (d) Loader (e) Trailing

것이 유리하므로 최소 용량으로 모든 작업이 가능하도록 시스템을 구성하였다. PHET 는 구동 및 작업을 위해 17 kW 모터를 사용하며 추가적인 동력 생산을 위해 5 kW 급의 엔진 및 발전기를 사용한다. 배터리는 LiPb 60 Ah 급을 사용하고 외부 충전이 가능하도록 충전 장치가 구비되어 있다.

4. 작업 모드

4.1 작업 모드 개발

본 연구는 PHET 의 각 작업에 따른 성능 확인 및 주행전략을 제시하기 위해 각 작업에 대한 주행모드를 개발하였다. 작업 모드를 위해 동일한 출력을 내는 17 kW 급 내연기관 트랙터의 엔진 RPM 및 Torque 측정 데이터를 이용하였다. 트랙터의 작업에서 요구되는 출력은 주행이 아닌 PTO에서의 동력소모가 주 되므로 시간에 따른 요구 출력 형태로 개발하였다. 트랙터는 특정 작업에 대해 환경적 변동요인이 적으므로 개발한 작업 모드는 추후 트랙터 성능 파악 및 주행전략 개발에 기반이 될 수 있다. Fig. 4 에 기본 주행(Driving) 과 Mower, Rotary, Loader, Trailing 작업 총 5 가지의 작업 모드를 나타내었다

4.2 작업 모드 분석

Fig. 5 는 각 작업의 평균출력과 최고출력을 나타내며 5 kW 는 엔진과 발전기, 즉 발전계의 출력을 의미한다. Driving, Loader, Trailing 작업 등 3 가지 작업의 평균 요구 출력은 발전 가능 출력보다 작다. 해당하는 3 가지 작업은 SOC 를 유지하며 연료로만 주행하는 CS mode 로 운행 가능하다. 하지만 Mower, Rotary 작업에 대해서는 평균 요구 출력이 엔진의 최대 출력보다 높으므로 CS mode 운행이 불가능하다.

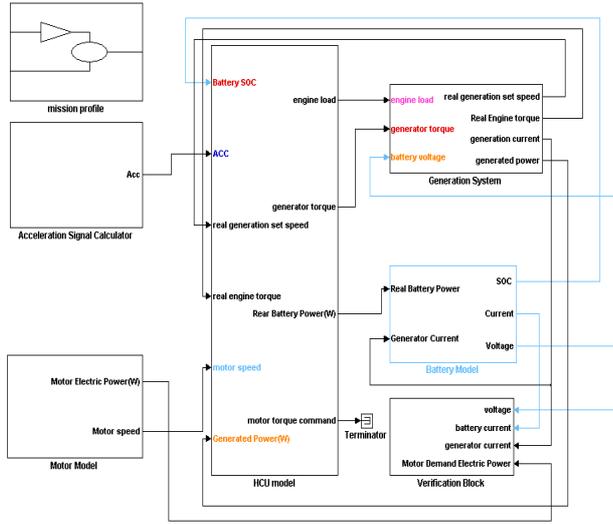


Fig. 6 The PHET simulation model

제한된 전기에너지와 구성 조건에서 최대한 작업능력과 시간을 확보하기 위해서는 각 작업에 적합한 주행전략이 필요하다.

5. 시뮬레이션 환경

본 연구에서 사용된 시뮬레이션 모델은 Mathworks®사의 Matlab® 과 Simulink® 기반에서 완성되었다. Fig. 6에 해당 시뮬레이션 모델을 나타내었다. 개선된 후방향(backward) 방식의 시뮬레이션 모델을 사용하였으며 시뮬레이션 모델은 제어전략이 포함되어 있는 Hybrid Control Unit(HCU) 모델 및 발전시스템, 배터리, 모터 모델을 포함하고 있다. SOC의 운용범위는 배터리 성능 및 수명을 고려하여 0.4 ~ 0.9로 제한하였으며 초기 SOC는 외부 충전을 통하여 항상 SOC 0.9에서 구동할 수 있다고 가정하였다.

6. 시뮬레이션 모델링

4.1 절에서 언급된 바와 같이 본 연구를 위해 개발된 트랙터 작업에 대한 주행모드는 시간에 따른 요구 출력형태로 되어있다. PHET 운행 성능 분석을 위한 모델은 주행전략에 따라 요구되는 출력의 분배를 위한 계산이 정확히 이루어지도록 개발되었다.

$$P_{demand} = P_{motor,mech} = P_{motor,elec} \times \eta_{motor} \quad (1)$$

$$P_{motor,elec} = P_{generator} + P_{battery} \quad (2)$$

직렬형 하이브리드 차량에서 구동을 위해 사용

되는 동력계는 오직 주행 모터이며 전기에너지 형태만을 통해 에너지를 공급받게 된다. 전기에너지는 주행전략에 따라 발전계 혹은 배터리를 통해 공급받는다.⁽¹⁾

$$Motor\ Efficiency = f(Speed, Torque) \quad (3)$$

구동모터의 효율은 모터의 속도와 토크에 따른 2차원 맵 형태로 입력하여 계산을 진행한다. 구동모터의 맵은 동일 용량 17 kW 모터의 실험 효율값을 사용하였다.

$$P_{engine} = \dot{m}_{fuel} / bsfc \quad (4)$$

$$P_{generator} = P_{engine} \times \eta_{generator} \quad (5)$$

발전계는 발전모터와 엔진으로 구성되어 있다. 연료의 화학에너지를 엔진에서 기계적 에너지로 변환하고 다시 발전모터를 통해 전기 에너지로 변환한다.⁽¹⁾

$$Generator\ Efficiency = f(Speed, Torque) \quad (6)$$

$$bsfc = f(Speed, Torque) \quad (7)$$

엔진의 효율을 의미하는 bsfc (Brake Specific Fuel Consumption: 제동 연료 소비율)와 발전모터의 효율은 각각의 속도와 토크에 따른 2차원 맵 형태로 입력된다. 맵 형태로 입력되는 수치는 동일 용량 구성품의 실험 결과값이다.

주행전략에 따라 발전계의 출력을 제외한 나머지 요구출력은 배터리로부터 얻어진다. 주행전략에 따른 발전계의 출력이 요구 출력보다 높을 경우 나머지 에너지량은 배터리로 저장된다. 배터리의 개회로 전압(V_{oc})과 내부저항(R_{int})은 배터리의 SOC의 함수로 나타내어지며 충전과 방전의 경우에 따라 다른 값을 갖는다. 시뮬레이션 모델에 사용되는 자료는 PHET에 적용되는 배터리의 실험 결과를 적용하였다.

$$R_{int}I^2 - V_{oc}I + P_{battery} = 0 \quad (8)$$

$$V = V_{oc} - R_{int}I \quad (9)$$

$$P_{battery} = IV \quad (10)$$

식 (8)을 이용하여 배터리에 흐르는 전류를 구한 후 내부저항을 고려한 작동 전압을 식 (9)를 사용해 구하게 된다. 최종적 배터리의 출력은 식 (10)을 이용하여 계산된다.

$$SOC_k = SOC_{k-1} + \Delta SOC \quad (11)$$

Table 1 Maximum time available for EV mode

Driving	Mower	Rotary	Loader	Trailing
132 min	108 min	52 min	123 min	135 min

$$\Delta SOC = \frac{\Delta E_{current}}{E_{battery}} = \frac{P_{battery} \Delta t}{E_{battery}} \cdot \frac{1}{3600} \quad (12)$$

배터리의 용량은 상수로 가정하였으며 배터리의 충전상태를 의미하는 SOC 는 위와 같이 정의하였다.⁽⁶⁾

모델링 방식은 개선된 후방향 시뮬레이션 방법을 사용하여 엔진 시동 상황에서 연료추가 소모 및 엔진 마찰 등을 고려하여 엔진의 동적 특성을 반영하였다.

7. 순수 전기트랙터 모드 가능시간

PHET 차량의 최대 장점은 초기 일정구간을 화석연료를 전혀 사용하지 않고 충전된 전기에너지만으로 주행 가능하다는 것에 있다. 이러한 구간을 AER 라고 부른다. 만약 운행 시간 및 작업 양이 작을 것으로 예측된다면 순수 전기트랙터 모드로 작업을 하는 것이 유리하다. 현재 개발중인 PHET 는 강제적으로 순수 ET 모드가 구현되도록 개발되고 있다. 시뮬레이션 모델을 사용하여 각 작업당 순수 전기 트랙터 모드의 경우 최대 작업시간을 Table 1 에 정리하였다. 각 작업에 대하여 엔진과 발전기를 사용한 발전 없이 배터리의 SOC 가 0.9 에서 0.4 까지 될 때까지의 시간을 계산하였다.

8. 작업 모드에 따른 주행전략

앞서 파악한 각 작업 모드의 특성을 바탕으로 각각의 작업 모드에 특성화 된 주행전략을 개발하였다. Fig. 7 은 기본적인 HCU 의 제어로직 순서도이다. 시뮬레이션 환경에서 살펴본 바와 같이 배터리의 성능 및 수명을 고려하여 SOC 가 0.4 이상 0.9 이하에서만 제어를 수행하도록 하였다. 우선 작업모드를 운전자가 입력을 해주면 그에 맞는 제어 변수들이 계수들이 정해지게 된다. 배터리의 SOC 가 현저히 낮거나 혹은 운전자가 가속한 운전을 요구할 경우 PHET 는 CS(Charge Sustain) mode 로 작업을 진행한다. CS mode 에서는 최대 출

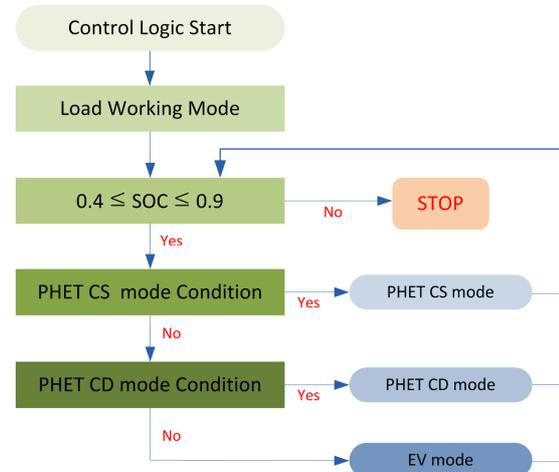


Fig. 7 The flow chart of HCU

력을 사용하며 효율적 에너지 소비가 아닌 트랙터의 지속적 작업 및 작업시간 증가를 위한 전략을 선택하였다. 발전계의 최대 출력을 사용할 정도의 가속한 운전 조건이 아니고 배터리가 일정 수준 미만이면 PHET 는 CD(Charge Depletion) mode 로 작업을 진행한다. CD mode 는 본격적인 Hybrid mode 라 할 수 있다. 배터리의 에너지를 일정 양 사용하면서도 엔진의 효율이 높은 OOL (Optimal Operation Line) 위에서 운전하며 PHET 의 작업시간도 늘리며 연료소비도 최소화하는 모드이다. 위와 같은 조건의 SOC 에 도달하지 않는다면 PHET 는 EV(Electric Vehicle) mode 로 작동한다. PHET 는 외부충전을 통하여 많은 양의 에너지를 배터리에 저장 할 수 있다. 적은 양의 작업은 화석에너지가 아닌 전기에너지만을 사용하여 작업 하도록 주행 전략을 설계하였다. 배터리의 SOC 가 일정 수준 이상에서는 충전효율이 방전효율에 비해 낮은 현상을 관찰 할 수 있으므로 이러한 배터리의 특성을 반영하여 EV mode 와 CD mode 를 구별하는 Engine turns on SOC level 을 설정하였다.

Fig. 8 에 주행전략을 적용 했을 때, 각 작업환경에 따라 SOC 변화추이를 나타내었다. 목표 작업시간은 최대 4 시간으로 트랙터가 하루에 최대로 작업하는 시간이다. 평균 요구출력이 발전기 출력보다 작은 5kW 미만인 Driving, Loader, Trailing 작업에서는 AER, CD 구간, CS 구간을 모두 구현하였지만 요구 출력이 높은 나머지 2 개의 작업에서는 최대로 작업시간을 높일 수 있는 전략을 선택하였다. Mower 작업에서는 CD mode 를 적용 할 때 다른 작업에 비해 발전계에서 높은 출력의 전기에너지를 생산해야 했고, Rotary 작업에서는 처음부

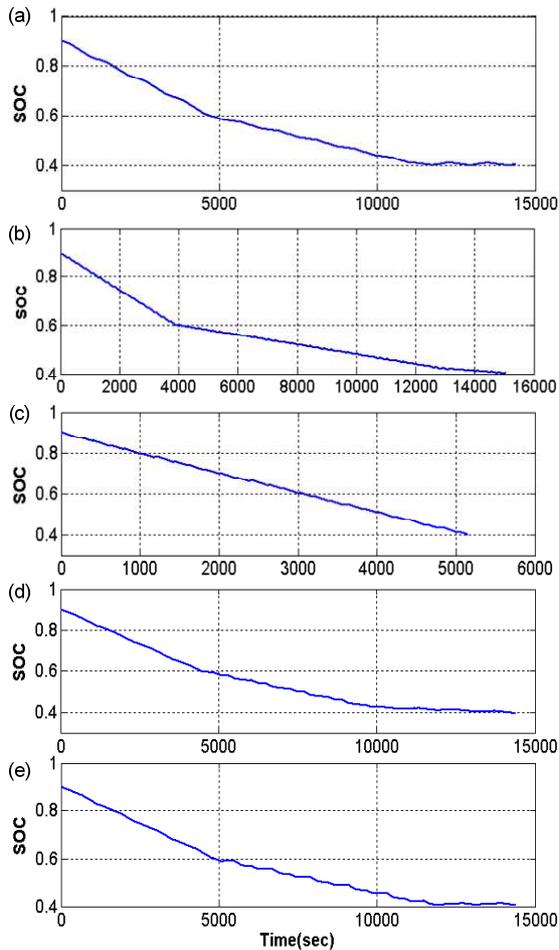


Fig. 8 SOC tendency at applying the each control strategy. (a) Driving (b) Mower (c) Rotary (d) Loader (e) Trailing

터 최대 출력으로 발전계를 구동하여도 최대 87 분 정도 밖에 작업이 불가능함을 확인 할 수 있었다. Rotary 작업을 지속적으로 수행하기 위해서는 작업 사이에 휴식 시간을 통한 충전시간 확보 등 다른 방법으로 작업을 진행해야 할 것이다.

결과적으로 시뮬레이션을 통해 평균 및 최대 요구출력이 발전기의 용량보다 큰 Rotary 작업을 제외하고 4 시간이상 연속적인 작업이 가능함을 확

인할 수 있었으며 Rotary 작업에서는 작업시간을 최대로 하는 주행전략을 개발하였다.

9. 결 론

본 연구에서는 17 kW 급 소형 PHET 에 대해 특성 및 다양한 작업을 고려하여 각각의 작업에 따른 주행전략을 개발하였다. 기본적으로 저장된 전기에너지를 최대한 활용하면서 주행가능시간을 최대한 늘릴 수 있는 전략을 제시하여 연료소비를 최소화 하였다. 5 가지 작업환경 중 4 가지 작업환경에서 충분한 시간을 작업 가능함을 확인하였고 작업능력 역시 충분하다는 것을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Jung, D., Min, K., Jo, Y. and Lim, Y., 2011, "Study on Optimization of Generation System in Series HEV Bus," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 8, pp. 773~779.
- (2) Choi, J., Kim, H., Yu, S. and Yi, K., 2011, "Development of Integrated Controller for a Compound Hybrid Excavator," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 6, pp. 1557~1563.
- (3) Choi, Y., Kim, Y.J. and Kang, B.Y., 2011, The Flow Analysis of the Mower for an Agricultural Tractor, *KSPE 2011*, pp. 1267~1268.
- (4) Xuan, D. J., Kim, J.W. and Kim, Y. B., 2011, "Optimal Operation Strategy Development for Fuel Cell Hybrid Vehicle," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 183~192.
- (5) Gonder, J., Simpson, A., Measuring and Reporting Fuel Economy of Plug-in Hybrid Electric Vehicles, 2006, EVS-22
- (6) Choi, D. and Yi, S., 1999, Simulation of the Powertrain for the Parallel Type Hybrid Electric Vehicle, *KSAE 1999*, pp. 742~747.