

농작업을 고려한 농업용 하이브리드 트랙터의 토크 지원 전략 개발[§]

최상천* · 송봉섭*† · 김용주**

* 아주대학교 기계공학과, ** LS Mtron LTD

Torque Assist Strategy for Hybrid Agricultural Tractor with Consideration of Field Operations

Sangchun Choi*, Bongsob Song*† and Yongjoo Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

** LS Mtron LTD

(Received June 27, 2013 ; Revised March 23, 2014 ; Accepted April 10, 2014)

Key Words: Torque Assist(토크 지원), Hybrid Tractor(하이브리드 트랙터), Working Load(작업 부하)

초록: 본 논문은 농작업 시 농업용 하이브리드 트랙터를 위한 토크 지원 전략을 제안한다. 일반적으로 농업용 트랙터는 베일러, 로타리 등 농작업 종류에 따라 필요한 토크의 크기가 다양하기 때문에 특수 목적을 위하여 출력이 큰 트랙터가 필요할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 연비개선보다는 작은 모터를 사용하여 특정 농작업에 필요한 적절한 토크 지원을 수행함으로써 동일한 사이즈의 기존 트랙터보다 다양한 농작업을 좀 더 효율적으로 수행할 수 있는 하이브리드 트랙터 개발을 목표로 한다. 이를 위한 토크 지원 전략을 제안하고 상용 차량 시뮬레이터인 Autonomie 를 기반으로 한 하이브리드 트랙터 모델을 이용하였다. 마지막으로 토크 어시스트 전략을 적용한 하이브리드 트랙터와 일반 트랙터에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 작업 효율과 연료 사용량을 검증하였다.

Abstract: This paper proposes a torque assist strategy for operating a hybrid agricultural tractor in the field. In general, different field operations such as baling and rotary tillage require different patterns and amounts of torque. Thus, a large agricultural tractor is used to improve the farming efficiency. Therefore, this research has the goal of developing a hybrid tractor that uses a small electric motor to provide additional torque for specific field operations. To achieve this objective, a rule-based torque assist strategy is proposed and validated for a simulation model in the Autonomie framework, which is a commercial simulation tool. Finally, the work efficiencies and fuel consumptions of a conventional tractor and the hybrid tractor with the proposed torque assist strategy are compared using simulations.

- 기호설명 -

ω_e : 엔진 속도
 ω_m : 모터 속도
 T_e : 엔진 토크
 T_{PTO} : PTO(Power Take- Off) 토크
 T_{tr} : 변속기 토크
 T_d : 바퀴축 구동토크
 η_g : 변속기와 최종 구동장치의 기어비

J_e : 엔진 관성 모멘트
 J_w : 바퀴 관성 모멘트
 v : 차량 속도 (km/h)
 T_{load} : 부하 토크
 T_m : 모터 지원 토크
 F_r : 구름 저항력
 F_a : 공기저항력
 F_{db} : 작업기에 작용하는 힘(drawbar force)
 r : 바퀴 반지름
 m : 트랙터 총 질량
 W : 작업기의 폭 (m)
 T : 쟁기 작업 시 깊이
 η_w : 작업 효율 (h/ha)
 μ_f : 평균 연료 사용량(L/sec)

§ 이 논문은 대한기계학회 동역학 및 제어부문 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 6. 4.-6., ICC 제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, bsong@ajou.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

최근 자동차 산업에서 이산화탄소 배출량 감소와 연료 효율 증가에 대한 하이브리드 기술이 성공을 거둠에 따라 건설기계나 농업용 트랙터분야로 연구가 확대되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 특수목적 차량은 일반 자동차와 목적이 다르기 때문에 그에 맞는 제어 전략이 필요로 한다. 농업용 하이브리드 트랙터의 경우 연비개선의 목적뿐만 아니라 베일러, 로타리 등 농작업 시 필요한 토크에 대해서 모터를 이용하여 추가적으로 지원함으로써 작업효율을 향상시키거나 사이즈가 더 큰 트랙터의 농작업을 수행할 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다.

하이브리드 기술이 이미 상용화에 성공한 하이브리드 자동차의 경우에서 크게 두 가지 관점으로 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 첫 번째는 모터를 포함한 전력시스템과 엔진을 적절히 구성하는 연구이며 두 번째로는 모터와 엔진 사이의 파워를 분산해주는 에너지 관리 전략(Energy management strategy) 이다. 하지만 이 두 가지 관점은 서로 독립적이지 않고 서로 상관관계를 가지고 있어서 동시에 두 가지 관점을 고려하면서 설계되고 있다. 더 나아가 두 가지 관점을 고려하며 설계하는 에너지 관리 전략 방법은 크게 규칙에 기반한 에너지 관리 전략(Rule-based energy management strategy)과 최적화에 기반한 에너지 관리 전략으로 나뉠 수 있다.^(5,6)

본 연구에서 고려되고 있는 병렬형 하이브리드 트랙터의 경우 단축형(Single-shaft)타입으로 엔진과 모터가 같은 축을 사용하는 방식이다.⁽⁷⁾ 전기 모터는 엔진과 같은 축을 사용하기 때문에 항상 같이 회전하지만, 토크 지원 모드와 충전 모드 일 경우에 자기장이 발생되어 토크를 지원하거나 충전하는 방식이다. Fig 1 에서 보는 바와 같이 엔진에서 발생된 엔진토크뿐만 아니라 전기모터에서 생성된 토크가 동시에 변속기와 Power Take-Off (PTO)에 전달되는 구조를 가지고 있다. 즉, Table 1 에서 구체적으로 명시했듯이 71kW 급 엔진을 가지고 있는 기존 트랙터에 7.4kW 급 소형모터를 추가적으로 장착하여 베일러나 파쇄작업과 같은 농작업 시 토크를 추가적으로 지원하여 작업효율을 높이는 것을 목적으로 설계되어 있다.

더 나아가 기존 트랙터를 개조하여 하이브리드 트랙터를 개발하고자 하며 이는 모터나 배터리를 포함하는 전력시스템을 추가할 수 있는 공간이 제한적임을 뜻한다. 뿐만 아니라 일반적으로 농업용 트랙터는 기어를 고정하고 제동 없이 농작업을 수

행함으로써 회생제동을 통한 배터리 충전이 어렵고 농작업의 종류에 따라 필요한 토크의 크기나 형태가 다양하여 이에 해당하는 적절한 모터 토크의 지원이 필요하다.

본 논문에서는 전부하 조건에서의 BSFC(Brake Specific Fuel Consumption) 곡선 기준으로 엔진 속도 대비 연료 소모량이 낮은 부분의 엔진 속도를 기준 엔진 속도로 설정하였으며, 트랙터 작업 속도가 저하되어 작업 효율이 감소하는 것을 모터 토크의 지원으로 기준 엔진 속도를 유지시켜 트랙터의 작업 효율 증가와 연료 소모량을 감소 시키는 것을 목적으로 한다. 즉, 다양한 농작업 시 기준 엔진 속도 범위가 유지될 수 있는 규칙에 기반한 토크 지원 전략을 제안하고자 한다. 또한 주요 농작업인 베일러, 파쇄 작업에 대한 실험 데이터를 바탕으로 시뮬레이션 환경을 구성하였으며 이를 기반으로 작업 효율과 연료 사용률 관점에서 제안된 토크 지원 전략에 대한 성능을 검증하고자 한다.

2. 하이브리드 트랙터 모델

2.1 트랙터 모델링

Fig. 1 과 같이 하이브리드 트랙터는 엔진과 모터에서 토크를 생성하고 유압펌프, PTO, 그리고

Table 1 Specifications of hybrid electric tractor

Components		Specifications
Engine	Rated power	71kW(@2300 RPM)
PTO	Rated power	28kW
Electric system	Motor-Generator	PMSM, 7.4kW(@2300RPM)
	Inverter/Convertor	7.5kW
	Battery	LiFePO4, 300V (10 Ah)
Chassis	Length × Width × Height	3,990 × 1,990 × 2,690 (mm)
	Weight	3,260 (kg)

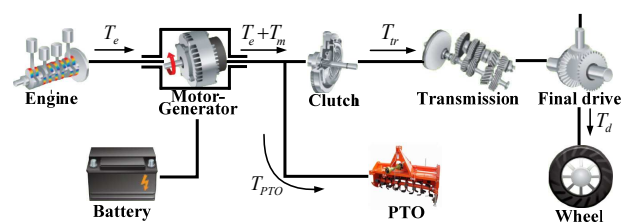


Fig. 1 Configuration of a single-shaft type parallel hybrid tractor

변속기를 통하여 토크가 분산된다. 유압펌프는 경운 및 로더의 승하강에 사용 되는 주 유압 펌프와 조향 및 유회에 사용되는 보조 유압 펌프로 구성된다. PTO는 트랙터로부터 구동 작업기에 회전력을 기계적으로 전달하여 베일러, 파쇄 작업등을 하는데 토크를 전달한다. 마지막으로 변속기에 전달된 토크는 바퀴에 전달되어 트랙터가 구동하는데 사용된다.

토크 지원 전략 알고리즘을 개발하고 검증하기 위하여 Fig. 2 와 같이 Autonomie 라는 시뮬레이션 프로그램을 이용한 트랙터 모델을 구성하였다.⁽⁸⁾ Autonomie 는 미국 아르곤 국립연구소에서 개발한 자동차 시뮬레이션 프로그램이며 Fig. 2 와 같이 하이브리드 트랙터 동력 전달계를 구성하였다. 엔진과 모터의 토크는 각각 변속기와 PTO 로 전달이 되며 다음과 같은 운동방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} J_e \dot{\omega}_e &= T_e + T_m - T_{PTO} - T_{tr} \\ &= T_e + T_m - T_{PTO} - \eta_g T_d \end{aligned} \quad (1)$$

다음으로 Chassis 블록은 다음과 같은 운동방정식이 사용되었다.

$$\left(m + \frac{J_w}{r^2} \right) \dot{v} = \frac{T_d}{r} - (F_r + F_a + F_{db} + F_{slope}) \quad (2)$$

실제 트랙터의 경우 외부로부터의 부하를 알 수 없기 때문에 식 (1)의 T_{PTO} 를 Fig. 3 과 같은 71kW 급 트랙터를 사용하여 베일러와 파쇄 작업 시 실험을 통해 얻은 데이터를 사용하였다. 다음으로 작업기 연결봉에 발생하는 부하인 F_{db} 는 파쇄, 파종, 경운 작업등을 할 때 발생된다. 이는 작업기의 종류와 작업 폭 및 깊이, 토양의 질, 그리고 주행 속도와 연관이 되어있다. 이를 모델링하기 위해서 다음과 같이 미국 농기계학회에서 제안하는 표준 모델을 사용하였다.⁽⁹⁾

$$F_{db} = X_i [A + Bv + C(v)^2] WT \quad (3)$$

여기서 X_i 는 토질의 성질 (입자의 크기)을 반영하는 보정상수이며, A, B, C 는 작업기 종류에 따른 보정상수이다. 이 보정 상수들은 작업 종류 및 조건에 따라서 15~50%의 오차를 가지고 있기 때문에 실험데이터를 기반으로 적절한 값을 찾아 사용하였다.

2.2 하이브리드 트랙터 모델 검증

제안된 트랙터 모델을 검증하기 위해서 Fig. 3 의 베일러 작업 시 엔진 속도와 변속기 토크 관점에서 모델 검증을 수행하였다. 즉, 실제 트랙터 주

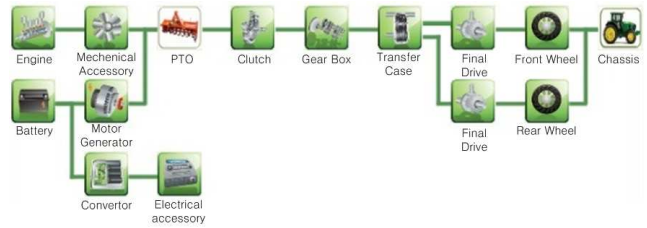


Fig. 2 Simulation model of a parallel hybrid tractor powertrain

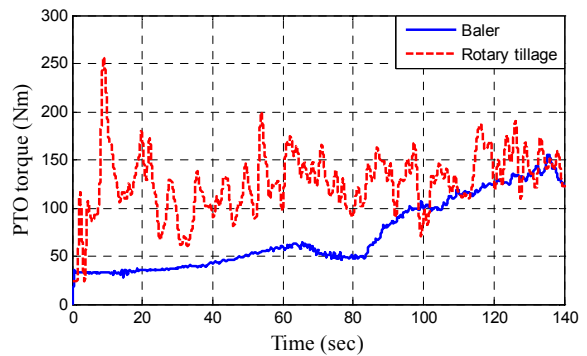


Fig. 3 Experimental measurement of PTO torque in baler and rotary tillage operations

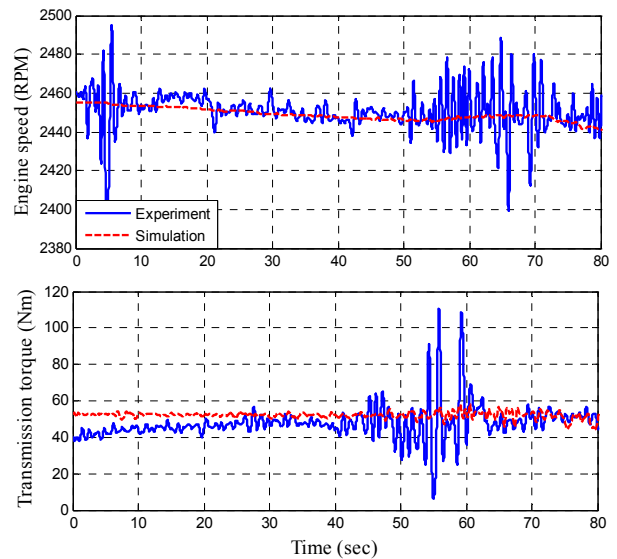


Fig. 4 Time responses of engine speed and transmission torque in baler operation

행 시 엔진 회전 속도와 변속기 축에 토크 센서를 부착하여 데이터를 획득하였고 동일한 기어 단수 L3 에서 엔진 속도와 변속기 토크를 비교하였다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 트랙터 모델이 실제 엔진 속도의 경향을 잘 보여주고 있음을 알 수 있다. 다만 시뮬레이션 모델에서는 엔진 토크 생성 모델로 엔진맵을 이용하고 있어서 엔진 속도가 빠르게 움직이는 과도(Transient) 상태까지는 모사하고 있지 못함을 알 수 있다. 더 나아가 엔진 속도

값에 측정 노이즈가 포함되어 있어 과도 상태 반응을 검증하는 방법에도 한계가 있다. 변속기 토크의 경우도 시뮬레이션 모델이 실제 변속기 토크 값의 경향을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만 이 또한 과도 상태를 표현하기에는 사용된 모델이 한계가 있음을 보여주고 있다.

3. 토크 지원 전략

농작업 시 병렬형 하이브리드 트랙터의 토크 지원을 위해서 세 가지 작동 모드로 설정하였다. 즉 엔진만이 작동되는 Normal 모드, 모터를 이용하여 토크를 지원하는 Assist 모드, 그리고 배터리를 충전하는 Charge 모드이다. 토크 지원 전략 알고리즘을 위해서는 각 모드 간의 스위칭을 결정하는 판단 알고리즘과 Assist 모드가 선정되었을 경우 모터가 연료 효율과 작업 효율을 제고하기 위해서 얼마의 토크가 지원되어야 하는지를 결정하는 알고리즘으로 구성이 되어 있다.

모드간의 선택을 위한 판단을 위해서 본 연구에서는 배터리의 충전 상태를 나타내는 SOC (State Of Charge)와 엔진 속도를 사용하고자 한다. 특히 엔진 속도만을 이용하는 이유는 본 논문에서 고려하고 있는 트랙터의 경우 기계식 엔진이 장착되어 있어 엔진 속도만을 측정하고 있으며 일반 승용차와 달리 많은 상태량을 측정하고 있지 않다는 한계점을 지니고 있다. 이러한 제한된 상황에서 규칙 기반(Rule-based)의 토크 지원 전략을 제안하고자 한다.

일반적으로 트랙터에서는 작업 효율을 높이고 연료 사용량을 줄이기 위해서 작업 단수(또는 기어비)를 높여 엔진 속도를 낮춰서 농작업을 한다.^(10,11) 즉, Fig. 5의 BSFC(Brake Specific Fuel Consumption) 곡선에서 보는 바와 같이 트랙터의 엔진속도가 감소하면 연료 소모량이 감소하나 약 1550 (rpm)이하로 떨어지면 연료 소모량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또 다른 고려사항으로 엔진 속도가 감소하게 되면 트랙터 속도도 느려져 동일한 면적에 대한 작업 효율이 감소된다. 이러한 사실에 근거하여 농작업 시 유지하고자 하는 엔진 속도 구간을 BSFC 곡선 상에서 연료 소모량 변화율이 가장 적은 1550~1800(rpm) 내의 구간으로 설정하였다. 다시 말해서, 원하는 엔진 속도 구간의 최소 값을 Assist 모드를 선정하는 엔진 속도(ω_{e_ast})로 정의하였으며 최대 값을 Charge 모드를 선정하는 엔진 속도(ω_{e_chg})로 정의하였다. 추가적으로 트랙터의 경우

Table 2 Fuel and work efficiency, change of SOC for $\omega_{e_chg} = 1800$ (rpm)

	ω_{e_ast} (rpm)	μ_f (L/h)	η_w (h/ha)	ΔSOC (%)
1	1550	15.1274	0.6628	-4.49
2	1600	15.0817	0.6610	-5.42
3	1650	15.0671	0.6590	-6.33
4	1700	15.0701	0.6568	-7.16
5	1750	15.1051	0.6520	-8.1

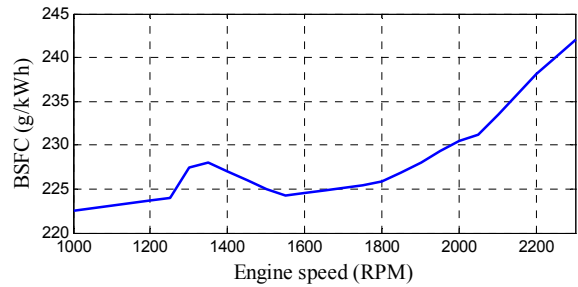


Fig. 5 BSFC curve of engine

농작업 중에 회생제동을 할 수 없기 때문에 지속적으로 모터 토크 지원이 필요한 상황에서 SOC가 낮아진 경우 Assist 모드에서 Normal 모드로 전환되어 배터리를 보호하도록 하였다.

모드간 선택을 위한 판단 알고리즘 내 설계인자를 결정하기 위해서 세 가지 효율을 고려하였다. 첫째로 연료 효율(fuel efficiency)은 Autonomie에서 산출되는 평균 연료 사용량(μ_f)을 사용하였고, 둘째로 작업 효율(work efficiency)은 다음과 같은 식(4)를 사용하였으며,⁽¹¹⁾ 마지막으로 Assist 모드 작동 시 SOC의 변화량을 고려하였다.

$$\eta_w (h/ha) = \frac{10}{v \times W} \quad (4)$$

우선 Fig. 3에서 소개된 베일러 작업에 대하여 모드 간 스위칭을 결정하는 판단 알고리즘의 설계인자(즉, ω_{e_ast} 와 ω_{e_chg})와 성능 효율간의 관계를 알아보하고자 한다. ω_{e_chg} 를 1800 (rpm)으로 고정된 상태에서 ω_{e_ast} 를 1550에서 1750 (rpm)까지 변화를 시키며 시뮬레이션을 수행한 후 위에서 언급된 세 가지 효율 관점에서의 성능을 Table 2와 같이 정리하였다. ω_{e_ast} 가 1550 (rpm)인 경우 가장 작업효율이 좋지 않으며 ω_{e_ast} 가 1750 (rpm)인 경우 Assist 모드 작동 시 가장 많이 SOC 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 또한 두 경우가 연료 효율 관점에서도 가장 안 좋은 경우라는 것을 확인할 수 있다. 이 두 경우를 제외한다면 ω_{e_ast} 가 증가할수록

Table 3 Fuel and work efficiency, change of SOC

	ω_{e_ast} (rpm)	ω_{e_chg} (rpm)	μ_f (L/h)	η_w (h/ha)	ΔSOC (%)
1	1600	1650	14.7924	0.6892	-7.2
2		1700	14.8935	0.6794	-6.28
3		1750	14.9899	0.6702	-5.79
4	1650	1700	14.8768	0.6766	-7.27
5		1750	14.9739	0.6679	-6.71
6	1700	1750	14.9787	0.6651	-7.7

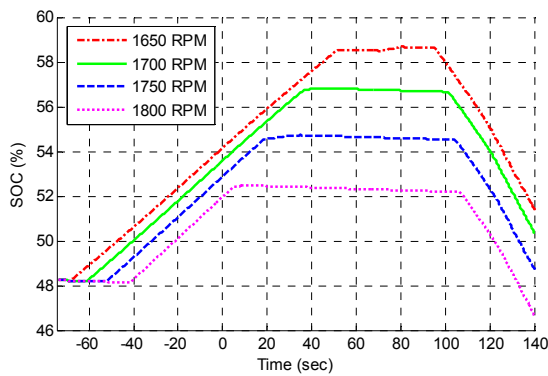


Fig. 6 Time response of SOC for $\omega_{e_ast} = 1600$ (rpm)

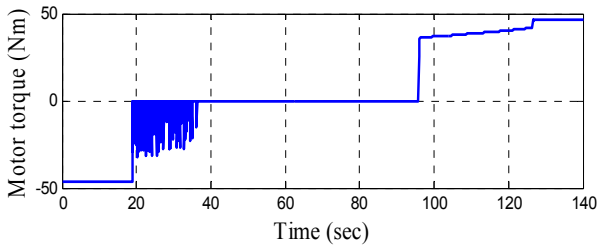


Fig. 7 Time response of motor torque in baler operation

작업효율을 좋아지나 SOC의 감소율이 커져서 이 두 가지 효율에 대한 최적화가 필요하다. 따라서 ω_{e_ast} 의 설정구간을 초기 1550 ~ 1800 (rpm) 구간에서 1600 ~ 1700 (rpm) 내의 구간으로 재설정하였다.

다음으로 ω_{e_ast} 를 재설정 구간의 최소값인 1600 (rpm)으로 설정 후 ω_{e_chg} 를 1650 ~ 1800 (rpm) 사이를 값을 사용하여 SOC의 변화량을 살펴보았다.

Fig. 6에서 0 초 이전 구간은 PTO가 작동되기 이전 구간을 뜻하며 대부분의 시간이 Charge 모드가 수행되는 구간이다. 또한 주어진 베일러 작업이 반복적으로 이루어질 경우 ω_{e_chg} 의 값이 1800 (rpm) 이상으로 설정된다면 SOC가 지속적으로 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 ω_{e_chg} 의 최대값을 1750 (rpm)으로 제한하였다.

ω_{e_ast} 와 ω_{e_chg} 의 구간 값과 최대값을 각각 설

Table 4 Working and fuel efficiency with respect to ω_{e_min} and ω_{e_max}

ω_{e_min} (rpm)	ω_{e_max} (rpm)	μ_f (L/h)	η_f (L/ha)	ΔSOC (%)
1690	1710	14.9067	0.6739	-7.09
1680	1720	14.9276	0.6721	-6.95
1670	1730	14.6476	0.6703	-6.82
1660	1740	14.9673	0.6680	-6.9

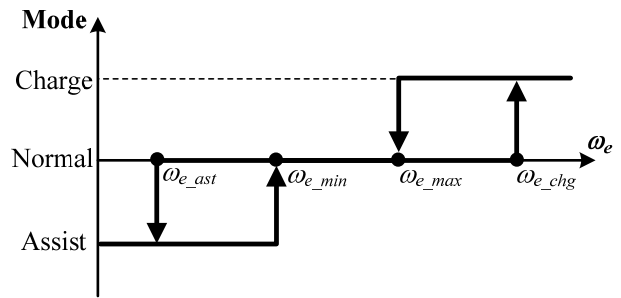


Fig. 8 Hysteresis for mode switches of torque assist strategy

정한 후 Table 3과 같이 다양한 구간에 대해서 세 가지 효율관점에서 시뮬레이션을 수행하였다. 세 가지 효율에 대해서 가장 효율이 낮은 두 가지 경우를 각각 삭제한다면 최종적으로 병립할 수 없는 세 가지 효율을 고려한 ω_{e_ast} 와 ω_{e_chg} 가 1650과 1750 (rpm)으로 선정되었다.

위에서 설계된 ω_{e_ast} 와 ω_{e_chg} 의 값을 사용하는 경우 Fig. 7에서 보는 바와 같이 약 20 초에서 37 초 사이에 Charge 모드와 Normal 모드간의 빈번한 스위칭이 생기는 문제점을 확인할 수 있다. 이를 해결하기 위해서 Fig. 8에서와 같이 히스테리시스 (hysteresis)를 이용한 스위칭 방법을 사용하였다.

ω_{e_ast} 와 ω_{e_chg} 가 각각 1650, 1750 (rpm)으로 설정되어 있으므로 히스테리시스를 위한 ω_{e_mi} 과 ω_{e_max} 를 Table 4와 같이 순차적으로 히스테리시스의 폭을 달리 설정하여 빈번한 스위칭의 발생 유무와 세 가지 성능 효율에 대해서 정리하였다. Table 4에서 확인할 수 있듯이 ω_{e_ast} 와 ω_{e_min} 사이 그리고 ω_{e_chg} 와 ω_{e_max} 의 간격이 좁을수록 작업 효율이 우수하게 나타났다. 작업 효율이 가장 우수한 경우를 선택한다면 ω_{e_min} 과 ω_{e_max} 를 각각 1660, 1740 (rpm)으로 설정하였다. 마지막으로 Fig. 9는 설정된 값을 기반으로 히스테리시스를 사용하여 빈번한 스위칭 현상이 사라진 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 Assist 모드가 선택될 경우 얼마의 모터 토크를 지원해야 하는지를 결정해야 한다. 엔진 토크와 부하 토크를 안다고 가정을 한다면

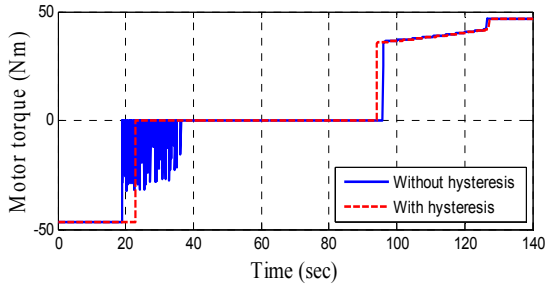


Fig. 9 Time response of motor torque with hysteresis

다음과 같이 필요한 모터 토크를 정의할 수 있다. 모터 토크 지원은 부하 토크의 크기가 엔진 토크보다 큰 상황에서 발생되기 때문에 식 (5)에서 모터 토크는 항상 0 보다 큰 값으로 출력된다.

$$T_m = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{load} - T_e \leq 0 \\ T_{load} - T_e & \text{if } 0 < T_{load} - T_e < T_{m_max} \\ T_{m_max} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 엔진 토크는 엔진 맵을 이용하여 예측할 수 있고 부하 토크의 경우 추가적으로 센서를 장착하거나 토크 예측 알고리즘을 사용할 수 있다.⁽¹⁴⁾

4. 시뮬레이션 결과

제안된 토크 지원 전략의 성능 검증을 위해서 농작업의 종류로 베일러와 과쇄 작업을 선정하였다. 엔진 크기가 같은 일반 트랙터와 Table 1 에서 설명한 바와 같이 모터가 추가적으로 장착된 농업용 하이브리드 트랙터를 대상으로 작업 효율과 연료 사용량을 분석하였다. 베일러와 과쇄 작업을 위해서 Fig. 3 에서 보는 바와 같은 PTO 토크가 부과되었다.

베일러 작업 시 트랙터 기어를 M2 단으로 설정하였으며 연료 소모율과 작업 능률과 밀접한 차량 주행 속도에 대하여 일반 트랙터 모델과 하이브리드 트랙터를 Fig. 10 에서 비교하였다. 베일러 작업의 경우 PTO 토크가 점진적으로 커짐을 알 수 있으며 Fig. 10 의 마지막 그림에서 보듯이 92 초 경에 모터 토크가 지원된다. 이로 인하여 주행 속도가 증가하고 연료 소모율로 감소함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 모터 토크의 지원을 통해서 엔진 속도의 변화 범위가 줄어들고, 더 높은 엔진 속도로 주행할 수 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로 시뮬레이션 결과를 작업 효율과 연료 효율 관점에서 Table 5 과 같이 요약하였다. 즉,

Table 5 Performance summary in baler operation

Performance	Type	Conventional	Hybrid
Work efficiency (h/ha)		0.6723	0.6680
μ_f (L/h)		15.1520	14.9673

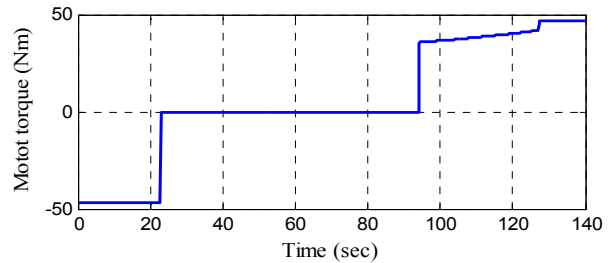
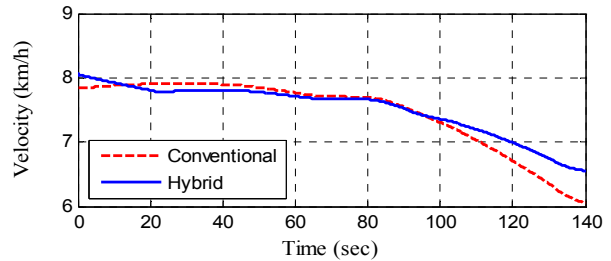
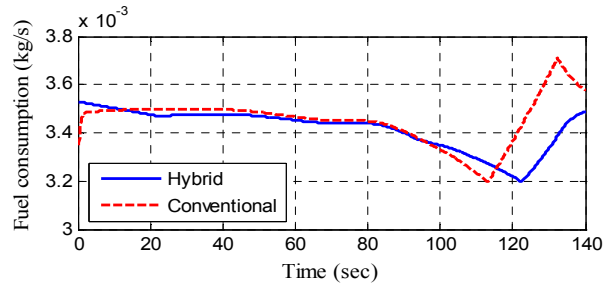


Fig. 10 Fuel consumption, velocity, and motor torque in baler operation on M2

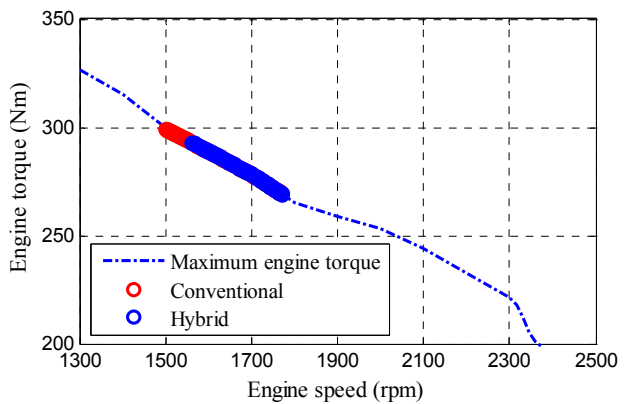


Fig. 11 Engine torque and speed in baler operation on M2

하이브리드 트랙터가 일반 트랙터에 비하여 약 0.6% 작업 능률이 증가하고 약 1.2%의 연료사용

Table 6 Performance summary in rotary tillage operation

Performance \ Type	Conventional	Hybrid
Work efficiency (h/ha)	0.7021	0.6743
μ_f (L/h)	15.1972	14.6829

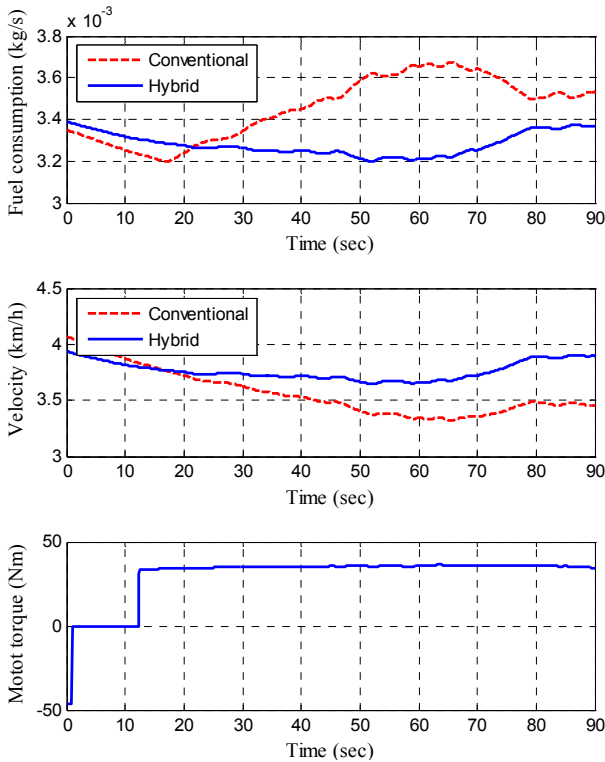


Fig. 12 Fuel consumption, velocity, and motor torque in rotary tillage operation on M1

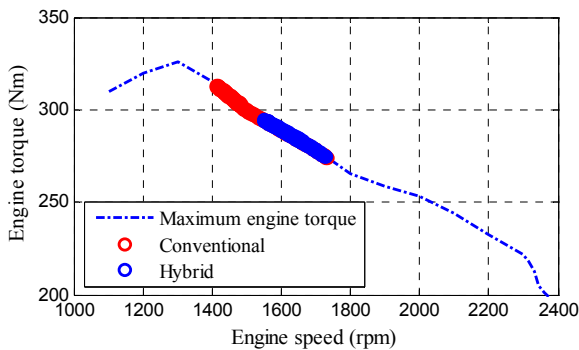


Fig. 13 Engine torque and speed in rotary tillage operation on M1

량이 감소되었다. 베일러 작업과 같이 PTO의 토크가 천천히 점진적으로 커지는 작업의 경우 작업 효율과 연료 효율 관점에서 소폭 개선됨을 확인하였다.

다음으로 Fig. 3에서 보는 바와 같이 PTO 토크

가 크고 시간에 따른 변화율도 큰 파쇄작업에 대한 토크 지원 전략의 성능을 검증하고자 한다. 트랙터 기어를 M1 단으로 설정을 하고 시뮬레이션을 수행하였다. 이 작업에서는 지속적으로 큰 부하가 작용하기 때문에 Fig. 12과 같이 모터 토크가 지속적으로 토크를 지원 해주게 된다. 이로 인하여 주행속도가 향상되고 연료 소모율이 감소되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 하이브리드 트랙터의 엔진 속도 범위가 일반 트랙터의 범위보다 적음을 확인할 수 있다.

파쇄작업에 대하여 작업 능력과 연료 효율 관점에서 Table 6과 같이 정리하였다. 단위 면적당 작업시간이 일반 트랙터에 비해 하이브리드 트랙터는 약 4%의 작업 효율이 증가하고 연료 사용량은 일반트랙터에 비해 약 3.4% 감소되었다. 파쇄작업의 경우 베일러 작업과 다르게 더 큰 PTO 토크를 요구하며 이러한 농작업의 경우 모터 토크 지원을 통해서 작업 효율과 연료 효율 관점에서 상대적으로 더 크게 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

3. 결론

본 논문은 엔진속도를 고려한 토크 지원 알고리즘을 설계하고 모터 토크 지원을 통하여 작업 효율과 연료 사용량 관점에서 성능을 개선시킬 수 있음을 보였다. 농작업의 종류에 따라 성능 개선 폭이 달라짐을 확인할 수 있었고 특히 PTO 토크가 큰 농작업의 경우 모터 토크 지원을 통해서 더욱 큰 폭으로 성능 개선을 할 수 있음을 확인하였다. 향후 실제 농업용 하이브리드 트랙터에 적용을 하여 실험적으로 검증하고자 한다.

후기

이 논문은 2013년도 지식경제부 기술혁신사업의 재원으로 IT 융합농기계 종합기술지원사업(No. R09-4)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

- (1) Yoo, S. B., Hwang, C. M. and Joh, J. S., 2012, "A Study on the Energy Management Control of Hybrid Excavator," *J. of KSPE*, Vol. 29, No. 12, pp. 1304~1312.
- (2) Gong, J., He, Q., Zhang, D. Zhang, Y. and Liu, X., 2012, "Power System Control Strategy for Hybrid Excavator Based on Equivalent Fuel Consumption," *Proc. IEEE. Conf. on Mech. Auto*, pp. 1097~1102.

- (3) Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K. and Sharifi, A., 2010, "Optimal Power and Energy Modeling and Range Evaluation of a Solar Assist Plug-in Hybrid Electric Tractor," *Trans. of the ASABE*, Vol. 53, No. 4, pp. 1025~1035.
- (4) Kim, H. G., Choi, J. W., Yoo, S. J. and Yi, K. S., 2011, "Development of Power Management Strategies for a Compound Hybrid Excavator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 12, pp. 1537~1542.
- (5) Lee, H. D., Koo, E. S., Sul, S. K. and Kim, J. S. 2000, "Torque control strategy for a Parallel-Hybrid Vehicle using Fuzzy Logic," *IEEE Int. Mag.* 33-38.
- (6) Sundstrom, O., Guzzella, L. and Soltic, P., 2010, "Torque-Assist Hybrid Electric Powertrain Sizing: From Optimal Control Towards a Sizing Law," *IEEE*, Vol.18, No. 4, pp. 837~849.
- (7) Ehsani, M., Gao, Y. and Emadi, A., 2007, *Modern Electric Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicle*, CRC Press, New York, pp. 123~144.
- (8) AUTONOMIE Ver. 1210., Available via <http://www.autonomie.net>, 2010.
- (9) ASABE Standards. D497.7, Agricultural Machinery Management Data, Available www.asabe.org, 2011.
- (10) Grisso, R., Pitman, R., Perumpral, V. J., Vaughan, D., Roberson, T. G. and Hoy, M. R., 2009, "Gear Up and Throttle Down to Save Fuel," *Virginia Cooperative Extension*, pp. 442~450.
- (11) Park, S. H., 2010, "Development of Energy Saving Technology for Tractor in Agricultural Works," NAAS, pp. 276~288.
- (12) Choi, C. H., 2012, "Development of Working cycle for Performance Evaluation of Tractor Field Operation," Mastet's thesis Sungkyunkwan University.
- (13) Kang, H. M., Jung, D. B., Min, K. D. and Kim, M. J., 2013, "Study of Energy Management Strategy Considering Various Working Modes of Plug-in Hybrid Electric Tractor," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 2, pp. 181~186.
- (14) Kim, Y. J., Song, B. S. and Kim, J. H., 2013, "Load Torque Estimation for a Parallel Hybrid Agricultural Tractor in Field Operations," *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 10, pp. 1865~1868.