

Original Article

Open Access

베일러 작업 시 트랙터 소요동력 분석

김용주¹ · 이대현¹ · 정선옥^{2*} · 박승제³ · 최창현⁴

¹LS엠트론(주) 중앙기술연구소, ²충남대학교 바이오시스템기계전공, ³전북대학교 생물산업기계공학과,
⁴성균관대학교 바이오메카트로닉스

Analysis of Power Requirement of Agricultural Tractor during Baler Operation

Yong Joo Kim¹, Dae Hyun Lee¹, Sun-Ok Chung^{2*}, Seung-Jae Park³, Chang Hyun Choi⁴

¹LS Mtron LTD., Anyang, 431-080, Korea

²Dept. of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

³Division of Bioresource System Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, 561-756, Korea

⁴Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

(Received: August 2th, 2011; Revised: August 9th, 2011; Accepted: August 16th, 2011)

Abstract

Purpose of this study was to analyze power requirement of an agricultural tractor for baler operation. First, a power measurement system was developed and installed in a 75 kW agricultural tractor. Strain-gages with a telemetry system were used to measure torques of transmission and PTO input shafts. An engine tachometer was used to measure rotational speed of transmission and PTO input shafts. The measurement system also included pressure sensors to measure pressure of hydraulic pumps, an I/O interface to acquire the sensor signals, and an embedded system to determine power requirements. Second, field experiments were conducted at two PTO speed levels, and proportion of utilization ratio of rated engine power and power consumption of major parts (transmission input shaft, PTO input shaft, main hydraulic pump, and auxiliary hydraulic pump) were analyzed. Results of usage proportion of engine power for PTO speed level 1 and 2 were 4.1 and 2.2%, 31.5 and 16.3%, 49.6 and 59.7%, 14.4 and 20.8%, and 0.4 and 1.0%, respectively, for ratio of measured engine power to rated engine power of less than 25%, 25 ~ 50%, 50 ~ 75%, 75 ~ 100%, and greater than 100%. The results showed that the usage proportion increased in the range with the ratio of power requirement to rated engine power of over than 50% when the PTO gear was shifted from P1 to P2. Averaged engine power requirement for baling operation, tying and discharging operation, and total operation were 43.3, 37.3, and 42.0 kW and 49.0, 37.0, and 47.4 kW, respectively, for PTO speed level 1 and 2. Paired t-test showed significant difference in power consumption of engine, transmission input shaft, and PTO input shaft for different PTO speed levels. Therefore, the power consumption of engine for baler operation increased when the PTO gear was shifted from P1 to P2. It was indicated that the power requirement of tractor was affected by the PTO rotational speed for baler operation.

Keywords : Agricultural tractor, Power requirement, Baler operation

*Corresponding author: Sun-Ok Chung

Tel: +82-42-821-6712; Fax: +82-42-823-6246

E-mail: sochung@cnu.ac.kr

1. 서론

최근 정부지원 트랙터의 용자대수는 2010년 12,902대로 2009년 13,251대 보다 2.6% 감소하였으나 용자비용은 각각 같은 기간 3,554억원에서 3,836억원으로 약 8% 증가하였는 바, 이는 트랙터의 수요패턴이 벼농사 위주의 중소형 모델 보다는 축산용을 비롯한 대형 모델로 변화되었기 때문으로 이러한 국내 트랙터 시장의 대형화 추세는 지속될 것으로 전망되고 있다(RDA, 2010). 트랙터의 대형화 추세로 국내 농업 기계 회사는 대형 모델 개발에 박차를 가하고 있으며, 특히 국제경쟁력 및 해외시장 확보를 위해서는 고효율의 대형 트랙터 개발이 필요한 실정이다.

트랙터의 작업은 견인동력을 이용하는 플라우 경운 작업, 유압동력을 이용하는 로더 작업, PTO 동력을 이용하는 로타리 작업 등으로 구분할 수 있다. 고효율 트랙터 개발을 위해서는 동력전달 계통에 대한 최적 설계가 중요하며, 이를 위해서는 주요 포장작업에 따른 변속기 등 트랙터 주요 구성요소의 부하특성 및 소요동력을 분석하는 것이 필요하다(Han et al., 1999). Gerlach(1966)는 플라우 경운 시 변속기 입력축의 부하 스펙트럼을 분석한 결과, 최대 토크는 엔진 정격 토크의 2.5배를 넘지 않는다고 보고하였으며, Grubisic(1994)는 부하 스펙트럼을 이용하여 동력라인을 설계하고 검증하는 방법을 제시하였다.

국내의 경우, Kim 등(1998)은 트랙터의 도로 운반 작업, 플라우 경운, 로타리 경운에 따른 변속기 입력축의 부하 가혹도를 평가하였으며, 도로 운반 작업 대비 플라우 경운과 로타리 경운의 부하 가혹도가 각각 1.6배와 94.7배 높다고 보고하였다. 최근에는 트랙터 설계를 위한 부하 분석과 더불어 효율 향상을 위한 소요동력 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, Park 등(2010)은 OECD 시험기준의 국내 적용 가능성을 제시하기 위해 플라우 경운 및 로타리 경운의 PTO 출력과 연료소모량을 측정하여 OECD 트랙터 시험기준과 비교

하였다. Kim 등(2011b)은 플라우 경운, 로타리 경운, 로더 작업에 따른 소형 트랙터(30 kW)의 소요동력을 분석한 결과, 로타리 경운의 소요동력이 트랙터 정격출력과 비교하여 최대 94%, 평균 82%로 가장 높게 나타났으며, 이때 PTO의 소요동력은 전체 소요동력의 약 72%로 로타리 경운 시 대부분의 동력은 PTO에서 소요된다고 보고하였다. Kim 등(2011a)은 또한 로타리 작업 시 PTO 부하 가혹도를 평가하였다. 국내 트랙터의 부하 및 소요동력 분석에 관한 연구는 모두 소형 트랙터의 농작업을 대상으로 수행되었으며, 아직까지 대형 트랙터의 소요동력 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다. 특히 최근 급격히 증가하고 있는 베일러 작업의 트랙터 소요동력에 대한 연구는 보고되고 있지 않다. 베일러 작업은 조사료의 처리, 운반 및 저장에 용이하도록 수확 및 결속을 하는 대표적인 축산 작업으로 소요동력 분석을 통한 에너지 효율 향상이 필요하다.

따라서 본 연구는 75 kW급 대형 트랙터의 에너지 효율 향상을 위한 기초 자료를 확보하기 위하여 수행되었으며, 구체적인 목표는 1) 75 kW급 트랙터 엔진 동력의 주요 소모 요소인 구동부, PTO, 주 유압장치, 보조 유압장치의 동력 계측 시스템을 개발하고, 2) 베일러 작업 시 각 동력 소모 요소의 부하특성 및 소요동력을 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시 트랙터

본 연구에서는 표 1과 같이 크기 4,000(L) × 2,677(W) × 2,640(H) mm, 무게 3,260 kg의 4륜구동 대형 트랙터를 사용하였다. 트랙터의 엔진 동력은 주로 견인을 위한 구동부, 작업기 구동을 위한 PTO, 작업기 승하강을 위한 주 유압장치, 운할 및 조향을 위한 보조 유압장치로 전달된다. 엔진 정격출력은 2,500 rpm에서 75 kW로 이때 PTO 출력은 65 kW이며,

Table 1 Specifications of the tractor used in the study

Item	Specification
Length × Width × Height (mm)	4,000 × 2,677 × 2,640
Weight (kg)	3,260
Engine	Rated power (kW) 75 @2500 rpm
Transmission	Type Manual
	Efficiency (%) 90
PTO	Rated power (kW) 65
	No. of pump 2 (main pump, auxiliary pump)
Hydraulics	Max. pressure (MPa) 20.6
	Pump displacement (cm ³ /s) 20 cc/rev (main pump) 10 cc/rev (auxiliary pump)
	Volumetric efficiency (%) 95

변속기는 기계식 수동변속기로 이론 동력전달효율은 약 90%이다. 유압펌프는 엔진 직결 방식으로 주 및 보조 유압펌프 모두 최대 20.6 MPa까지 압력 토출이 가능하고 엔진의 회전 속도에 따른 이론 토출량은 주 유압펌프가 20 cc/rev, 보조 유압펌프가 10 cc/rev로 작업기 조작을 위한 주 펌프에 더 많은 동력이 분배되고 있음을 알 수 있다. 엔진 냉각을 위한 냉각팬 및 워터펌프는 엔진 직결방식으로 엔진 구동과 동시에 구동되나 엔진 정격 출력대비 2.5%(2 kW) 수준으로 미비하므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

나. 동력 계측 시스템

1) 변속기 및 PTO 입력축

구동부 및 PTO의 부하는 엔진으로부터의 동력이 각각 변속기와 PTO로 최초 전달되는 변속기 입력축과 PTO 입력축에서 측정하였다. 변속기 및 PTO 입력축의 소요동력은 식 (1)과 같이 각각의 토크 및 회전수를 이용하여 측정하였으며 (Ryu, 2004), 회전속도는 엔진 회전축과 변속기 및 PTO 입력축의 회전 속도가 동일하므로 트랙터 자체에 내장되어 있는 엔진 속도계(tachometer)를 사용하였다. 변속기 및 PTO 입력축의 토크 신호는 유선 센서 시스템을 이용하기에는 공간적 제약이 있어 그림 1과 같이 무선 통신으로 결선의 제한이 없어 센서 장착이 용이한 텔레메트리(telemetry) 시스템을 이용하였다.

엔진으로부터의 동력은 모두 플라이휠(flywheel)에 전달되고 플라이휠의 동력은 댐퍼(damper)와 결합된 PTO 입력축과 PTO 입력축을 감싸고 있는 변속기 입력 중공축(hollow shaft)으로 나뉘지므로 변속기 입력축의 토크는 중공축 외부에 스트레인게이지(CEA-06-250US-350, MicroMeasurement Co., USA)를 부착하여 측정하였다. 이때 스트레인게이지는 토크 신호의 분해능 향상을 위해 중공축 외부 둘레의 4개 지점에 균일한 간격으로 부착하였다. PTO 입력축 토크는 댐퍼

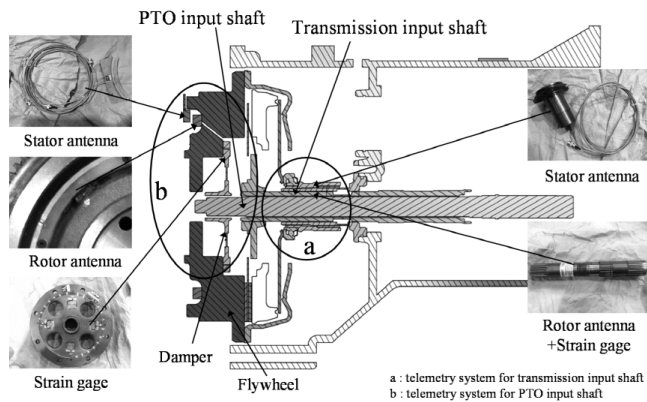


Fig. 1 Telemetry systems for torque measurement of transmission and PTO input shafts.

와 변속기 입력축을 결합하는 스플라인(spline)의 동력전달효율을 100%로 가정하여 변속기 입력축의 토크 측정방법과 마찬가지로 총 4개 지점의 댐퍼 토크를 측정하였다. 스트레인게이지를 통해 측정된 변속기 및 PTO 입력축의 토크 신호는 각각의 회전부 안테나(rotor antenna)와 연결되어 20 kHz의 라디오 통신으로 고정부 안테나(stator antenna)에 무선으로 전송되고 다시 데이터 수집장치에 전송하도록 구성하였다.

변속기 및 PTO 입력축 토크 센서의 교정은 엔진 플라이휠 부분을 분리한 후 외팔보(cantilever)를 축에 연결한 상태에서 하중을 변화시키며 실시하였다. 트랙터 설계 시 변속기 및 PTO 입력축에 걸리는 최대 토크를 고려하여 100 Nm 간격으로 -500 ~ 500 Nm의 범위에서 수행하였다.

$$Power_{axle} (kW) = \frac{2\pi \times T \times N}{60,000} \quad (1)$$

Where, T : Torque, Nm

N : Rotational speed, rpm.

2) 유압장치

유압장치의 소요동력은 식 (2)와 같이 유압 펌프의 토출 압력, 유량, 체적 효율을 이용하였다(Kim, 2004). 유압펌프의 토출 압력은 그림 2와 같이 주 및 보조 유압펌프에 각각 압력 센서(P6A, HBM, Germany)를 장착하여 측정하였고 유량은 유압펌프 회전속도와 각각의 펌프에 대한 이론 토출량을 이용하여 계산하였으며, 유압펌프의 회전속도는 엔진 회전속도와 비례하므로 엔진 속도계의 측정값을 이용하여 산출하였다 (Kim et al., 2011b).

$$Power_{pump} (kW) = \eta_v \times \frac{P \times Q}{104,081} \quad (2)$$

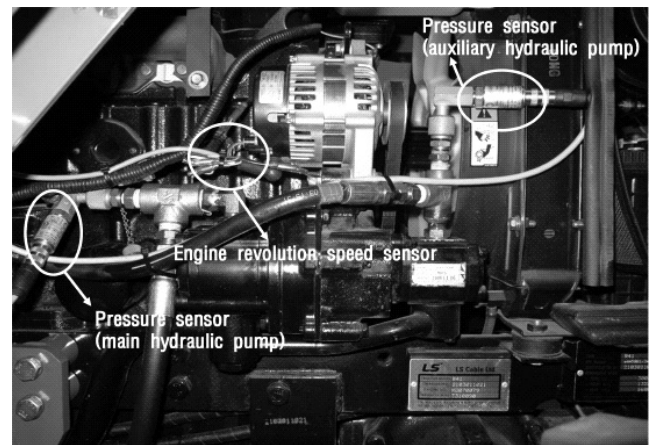


Fig. 2 Pressure and engine speed sensors used for hydraulic pumps (Reproduced from Kim et al. (2011b)).

Where, η_v : Volumetric efficiency,
 P : Hydraulic pump pressure. MPa,
 Q : Hydraulic pump displacement, cm^3/s .

3) 통합 데이터 수집장치

그림 3과 같이 주요 구성요소의 소요동력 측정을 위한 엔진 회전속도, 변속기 및 PTO 입력축 토크, 주 및 보조 유압 펌프 유압 신호의 총 5개 신호 측정이 가능한 데이터 수집장치(QuantumX MX840, HBM, Germany)를 구성하였다. 토크 및 압력 신호의 측정은 채널당 19.2 kHz의 샘플링 속도와 24 bit의 분해능을 가지는 아날로그 입력채널을 이용하였으며, 엔진 회전속도는 채널당 1 MHz의 속도로 상승펄스(rising edge) 신호 측정이 가능한 디지털 입력채널을 이용하였다. 측정된 센서 신호는 파이어와이어(firewire) 통신으로 실험용 노트북에 전송하였으며, 이때 계측 프로그램은 사용된 데이터 수집장치와 연동되어 측정이 용이한 Catman (version 3.1, HBM, Germany)을 이용하여 개발하였다.

다. 베일러 포장 시험

1) 시험 포장

시험 포장은 전북 완주에 위치한 논을 대상으로 하였으며, 토양 조건 분석을 위해 4지점에서 토성 및 수분 함량을 위한 토양 샘플 채취, 원추 관입지수 측정을 3회 반복하였다(Park and Lee, 2003). 토성과 수분 함량은 전라북도 농업기술원에 의뢰하여 미국 농무부(USDA)법과 오븐법에 따라 분석하였고 원추 관입지수는 soil compaction meter(SC900, Spectrum Technology, E Plainfield, USA)를 이용하여 0 ~ 25 cm 깊이에서 5 cm 간격으로 측정하였다. 시험 포장 조건은 표 2에 요약한 바와 같이 토성은 사양토, 수분 함량은 16.1%, 원추 관입지수는 깊이에 따라 998 ~ 1,611 kPa 범위로 나타났다.

2) 시험 방법

베일러 작업은 조사료의 처리, 운반, 저장이 용이하도록 조사료를 베일로 만드는 과정으로 그림 4와 같이 트랙터가 이동하며 조사료를 걷어올리며(pick-up) 절삭(chopper)을 하는

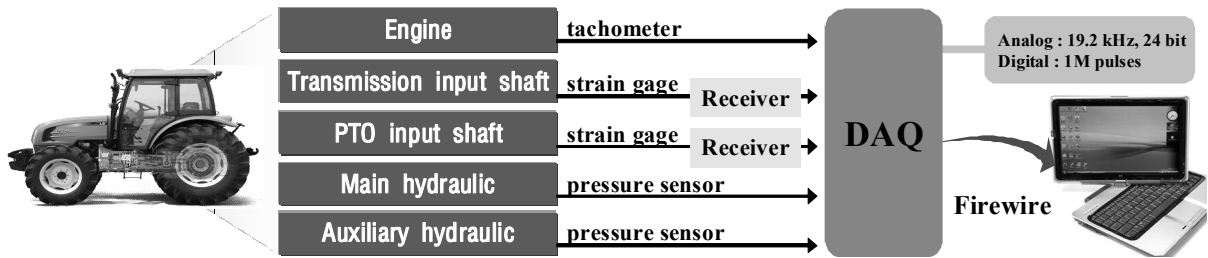


Fig. 3 Schematic diagram of power measurement system of the tractor.

Table 2 Site description of the experimental field

Soil type	Field size (m)	Water content (wb, %)	Cone index (kPa) by depth					
			0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm
Sandy loam	120 × 50	16.1	998	1,120	1,901	1,611	1,547	1,428

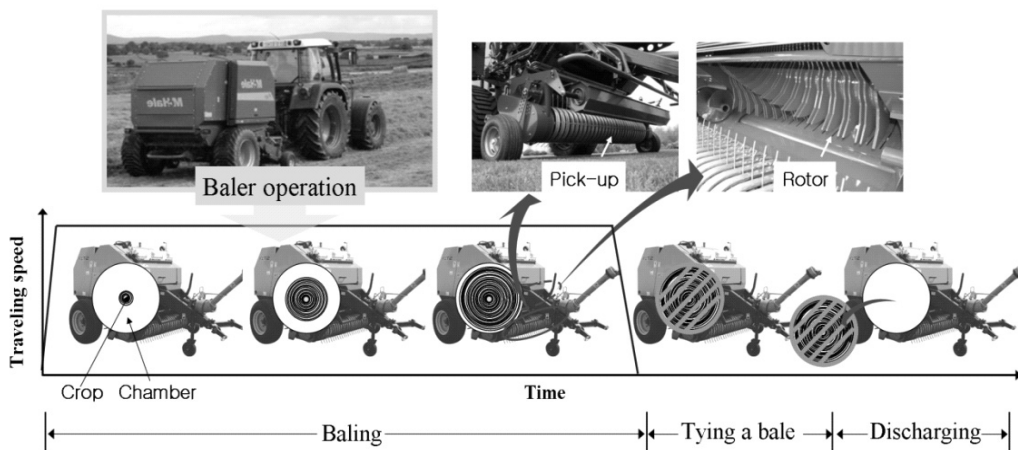


Fig. 4 Process of baler operation by agricultural tractor.

베일 형성(baling) 구간, 챔버 내에 베일이 가득 차면 트랙터를 정지시켜 베일을 끈으로 결속하는 베일 결속 구간(tying), 챔버를 열어 수확물을 배출하는 배출 구간(discharging)으로 구분된다.

베일러 작업은 숙련된 작업자를 추천받아 2011년 5월에 수행하였으며, 베일직경이 1.25 m, 수확장치의 길이가 2,000 mm, 절삭 칼날의 수가 15개인 원형 베일러(F550, MCHale, Ireland)를 사용하였다. 이때 시험 작물은 이탈리아라이그라스(italian ryegrass)로 하였으며, 임의로 5개의 시료를 뽑아 오븐법에 따라 함수율을 측정된 결과 평균 13.8%로 나타났다.

트랙터의 작업속도는 5.4 km/h (부변속 L단, 주변속 4단)로 설정하였으며, 실험은 PTO 변속 단수 1단(585 rpm), 2단(756 rpm)의 2수준에 대해 각각 3회 반복하였다. 베일러 작업 시 트랙터 소요동력 분석은 엔진의 동력 사용비율과 트랙터 주요 구성요소의 소요동력을 이용하였다. 엔진의 동력 사용비율은 측정된 엔진 소요동력을 크기 순서대로 정렬한 후에 엔진 정격의 25% 간격으로 나누어 전체 작업 시간 중 차지하는 비율을 계산하였다. 트랙터 주요 구성요소의 소요동력은 베일러 작업 구간을 베일 형성 구간과 베일 결속 및 배출 구간, 전체 작업 구간으로 구분하여 각각의 평균값과 최대값을 계산하였다. 또한 PTO 단수가 소요동력에 미치는 영향을 분석하기 위해 통계분석 프로그램인 SAS(version 9.1, SAS Institute, USA)를 이용하여 유의수준 5% 이내에서 쌍차 t검정(paired t-test)을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 토크 센서 신호 교정

변속기 입력축 및 PTO 입력축의 토크 센서 교정 결과는 그림 5와 같이 모두 -500 ~ 500 Nm 토크 측정 범위에서 결

정계수(r^2)가 0.99 이상으로 높게 나타나 장착된 토크 센서를 이용하여 트랙터의 변속기 입력축 및 PTO 입력축 토크 측정이 선형적으로 가능함을 알 수 있다.

나. 부하 특성 및 소요동력 분석

베일러 작업 시 동력 측정 결과 사례를 그림 6에 나타내었다. 베일러 작업 시 소요동력을 동일한 PTO 단수에 대해 반복 측정 결과 유사하게 관찰되었으며, PTO 1, 2단의 소요동력은 부분적으로 PTO 2단이 1단에 비해 다소 높게 나타나는 구간도 있었으나 큰 차이를 구분하기는 어려웠다. 엔진 소요동력은 PTO 입력축의 소요동력이 가장 높은 비중을 차지하여 PTO 입력축의 소요동력과 유사한 경향을 보여주었다. 베일 형성 구간에서는 챔버 내 수확물의 증가에 따라 PTO 입력축의 동력이 증가하여 엔진 소요동력이 약 25 ~ 80 kW 범위에서 지속적으로 증가하였으며, 베일 결속 및 배출 구간에서는 트랙터의 정지와 챔버로 유입되는 수확물이 감소하여 소요동력도 감소함을 알 수 있다. 배출을 위한 챔버 개폐 시에는 챔버 내 무게 감소로 PTO 입력축의 소요동력이 급감하였고 엔진 소요동력도 동일한 경향을 보여 주었다.

변속기 입력축은 트랙터를 구동하는 순간에 가장 큰 소요동력을 보여 주었으며, 베일 형성 구간에서는 5 ~ 30 kW의 범위로 나타났다. 또한 트랙터가 정지하는 베일 결속 및 배출 구간의 소요동력은 PTO 구동에 따른 진동에 의하여 약 1 kW 미만의 차이가 관찰되었다. 주 유압펌프는 베일 형성 구간에서 베일러의 수평유지를 위해 유압회로를 작동시킴에 따라 3 ~ 4 kW의 범위로 비교적 낮게 나타났고 베일 배출을 위한 챔버 개폐 시 최대 약 13 kW 정도로 증가하였다. 보조 유압펌프는 수확물이 직선경로에 위치하지 않으므로 베일 형성 구간에서는 잦은 조향 작업에 의하여 소요동력이 2 ~ 6 kW 범위로 나타났으며, 베일 결속 및 배출 구간에서는 별도의 조향이 필요하지 않기 때문에 약 2 kW 미만의 낮은 소요

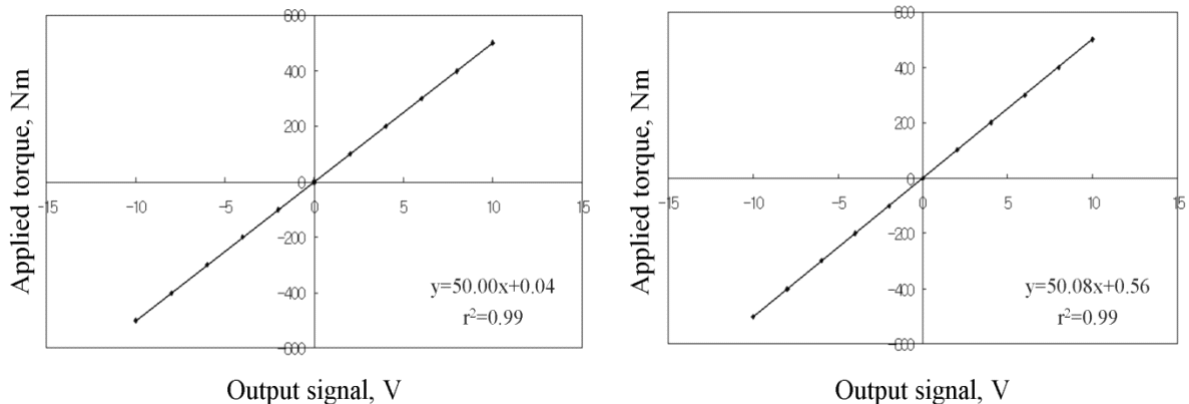


Fig. 5 Calibration results of torque sensors for transmission (left) and PTO (right) input shafts.

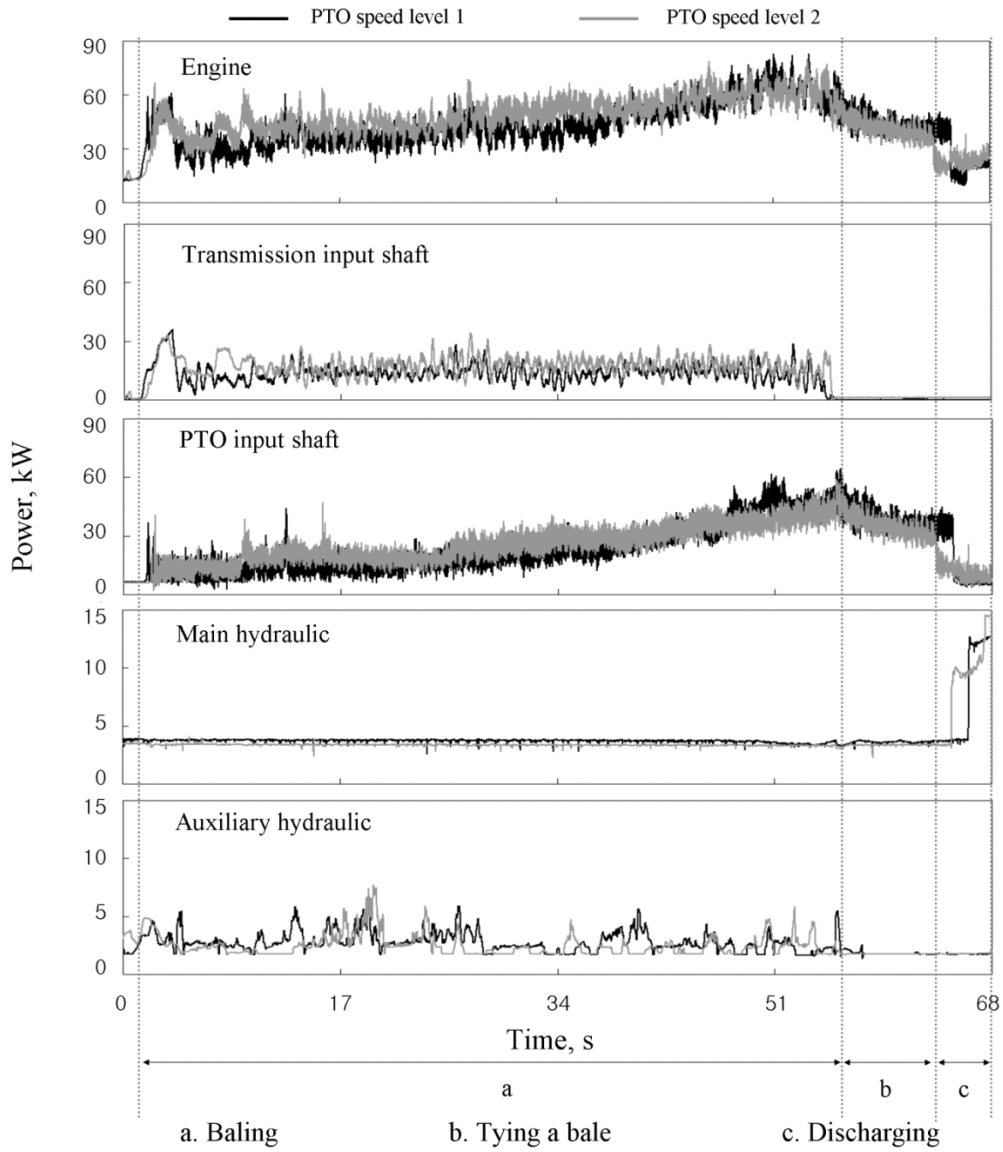


Fig. 6 Example of measured levels at power consumption parts during baler operation.

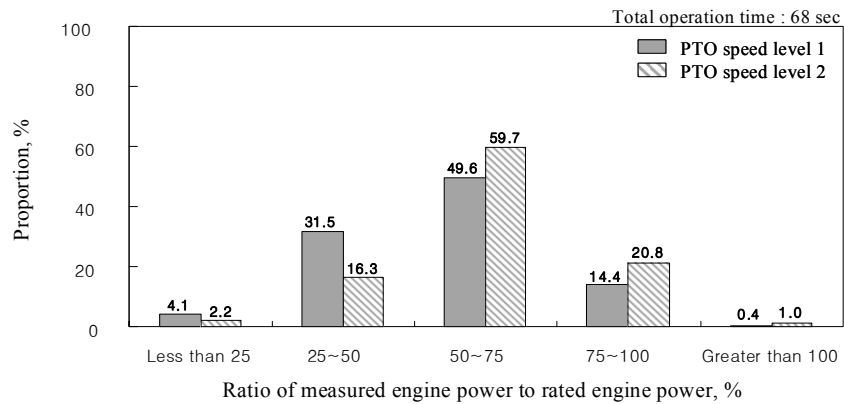


Fig. 7 Proportion of used engine power ratio during baler operation.

동력을 보여 주었다.

베일러 작업 시 트랙터엔진 소요동력 사용비율은 그림 7에

요약하였다. 엔진 정격대비 소요동력의 사용비율 25% 이

하인 작업시간이 PTO 1, 2단에서 각각 4.1%와 2.2%이었고,

25 ~ 50% 범위에서는 각각 31.5%와 16.3%로 나타났으며, 50 ~ 75% 범위에는 각각 49.6%와 59.7%로 나타나 대부분의 소요동력이 이 구간에 집중됨을 알 수 있다. 또한 엔진 정격 75 ~ 100% 범위의 소요동력 사용비율은 PTO 1단이 14.4%, PTO 2단이 20.8%로 PTO 2단이 더 높게 나타났으며, 100% 이상의 범위에서는 각각 0.4%와 1.0%로 나타났다. PTO 단수에 따른 소요동력 사용비율은 대부분의 동력이 사용되는 50 ~ 75% 미만까지는 PTO 1단에서, 그 이상에서는 PTO 2단이 더 높게 나타나 PTO 단수가 증가할수록 큰 동력이 상대적으로 더 많이 사용됨을 알 수 있다.

트랙터 주요 구성요소의 소요동력을 세부적으로 고찰하기 위하여 PTO 단수에 따른 변속기 입력축, PTO 입력축, 주 유압장치, 보조 유압장치의 소요동력을 표 3과 같이 베일 형성 구간, 베일 결속 및 배출 구간, 전체 작업 구간으로 구분하여 요약하였다. 베일 형성 구간에서 엔진 소요동력은 PTO 1, 2단에서 각각 평균 43.3 kW와 49.0 kW로 최대 80.9 kW와 82.3 kW로 나타났다. PTO 입력축의 평균 소요동력은 PTO 1, 2단에서 각각 23.3 kW(엔진 동력의 53.8%)와 25.1 kW(엔진 동력의 51.2%)로 엔진 소요동력의 절반 정도를 차지하였으며, 수확물이 챔버에 가득차는 순간의 최대 소요동력은 PTO 1단에서 61.7 kW, PTO 2단에서 63.0 kW로 나타났다. 베일러 견인을 위한 변속기 입력축의 평균 소요동력은 PTO 1, 2단에서 각각 13.5 kW(엔진 동력의 31.2%)와 17.2 kW(엔진 동력의 35.1%)로 PTO 입력축 다음으로 나타났으며, 베일러 작업을 위해 트랙터를 구동하는 순간의 최대 소요동력은 PTO 1단에서 35.3 kW, PTO 2단에서 34.4 kW로 나타났다. 주 유압펌프의 평균 소요동력은 PTO 1단에서 3.7 kW(엔진 동력의 8.5%), PTO 2단에서 3.6 kW(엔진 동력의 7.3%)로 나타났으며, 최대 소요동력은 각각 3.9 kW와 4.1

kW로 평균값과 큰 차이를 보이지 않았다. 보조 유압펌프의 평균 소요동력은 PTO 1단에서 2.8 kW(엔진 동력의 6.5%), PTO 2단에서 3.1 kW(엔진 동력의 6.4%)로 주요 구성요소 중 가장 낮게 나타났으나, 최대 소요동력은 각각 5.9 kW와 7.8 kW로 주 유압펌프보다 높게 나타났으며 수확을 위한 선회 작업에 따라 소요동력 변동이 크게 나타남을 알 수 있다.

베일 결속 및 배출 구간에서 엔진의 소요동력은 PTO 1, 2단이 각각 평균 37.3 kW와 37.0 kW, 최대 70.7 kW와 63.6 kW로 전체적으로 베일 형성 구간보다 낮은 소요동력을 보여 주었다. PTO 입력축의 평균 소요동력은 PTO 1, 2단이 각각 30.2 kW(엔진 동력의 81.0%)와 28.3 kW(엔진 동력의 76.5%)로 베일 형성 구간 보다 높게 나타났으며, 이는 챔버 내부의 수확물 무게 및 결속에 따른 부하가 높기 때문으로 판단된다. 변속기 입력축의 소요동력은 트랙터의 정지에 따라 PTO 1, 2단에서 각각 평균 0.1 kW(엔진 동력의 0.3%)와 1.2 kW(엔진 동력의 3.2%), 최대 1.7 kW와 1.4 kW로 나타났다. 주 유압펌프의 평균 소요동력은 PTO 1단에서 5.0 kW(엔진 동력의 13.4%), PTO 2단에서 5.6 kW(엔진 동력의 15.1%)로 나타났으며, 배출 작업을 위한 챔버 개폐로 최대 소요동력은 각각 12.7 kW와 14.6 kW까지 상승되었다. 보조 유압펌프의 평균 소요동력은 PTO 1단에서 2.0 kW(엔진 동력의 5.3%), PTO 2단에서 1.9 kW(엔진 동력의 5.2%)로 베일 형성 구간과 마찬가지로 다른 구성요소보다 낮게 나타났으며, 특히 트랙터 정지 시에는 별도의 조향 작업이 없으므로 윤회를 위한 최소 동력만이 소요됨을 알 수 있다.

베일러 작업 전체 구간의 엔진 소요동력은 PTO 1, 2단이 각각 평균 41.8 kW와 47.4 kW로 최대 80.9 kW와 82.3 kW로 나타났다. 또한 각각의 구성요소에 대한 최대 소요동력은 주 유압장치를 제외하고는 모두 베일 형성 구간에서 나타났

Table 3 Measured power consumption of tractor major parts during baler operation (N=3)

PTO speed level	Period		Power consumption (unit : kW)				
			Transmission input shaft	PTO input shaft	Main hydraulic	Auxiliary hydraulic	Engine
1	Baling	Max.	35.3	61.7,	3.9	5.9	80.9
		Avg.	13.5 (31.2%) ¹⁾	23.3 (53.8%)	3.7 (8.5%)	2.8 (6.5%)	43.3 (100%)
	Tying and discharging	Max.	1.7	55.4	12.7	2.1	70.7
		Avg.	0.1 (0.3%)	30.2 (81.0%)	5.0 (13.4%)	2.0 (5.3%)	37.3 (100%)
	Total	Max.	35.3,	61.7	12.7	5.9	80.9
		Avg.	11.2 (26.8%)	24.1 (57.7%)	3.9 (9.3%)	2.6 (6.2%)	41.8 (100%)
2	Baling	Max.	34.4,	63.0	4.1	7.8	82.3
		Avg.	17.2 (35.1%)	25.1 (51.2%)	3.6 (7.3%)	3.1 (6.4%)	49.0 (100%)
	Tying and discharging	Max.	1.4,	56.5	14.6	2.2	63.6
		Avg.	1.2 (3.2%)	28.3 (76.5%)	5.6 (15.1%)	1.9 (5.2%)	37.0 (100%)
	Total	Max.	34.4	63.0,	14.6	7.8	82.3
		Avg.	14.3 (30.2%)	26.3 (55.5%)	4.0 (8.4%)	2.8 (5.9%)	47.4 (100%)

¹⁾ Ratio of measured power to engine (total) power

으며, 전체 소요동력 대비 각각의 구성요소의 소요동력 비율은 30 kW급 트랙터를 이용하여 로타리 경운 작업을 대상으로 수행한 Kim 등(2011b)의 선행연구 결과와 차이를 보였다. 변속기 입력축의 평균 소요동력은 PTO 1, 2단에서 각각 11.2 kW(엔진 동력의 26.8%)와 14.3 kW(엔진 동력의 30.2%)로 나타났으며, 이는 선행연구 결과인 3.7 kW(엔진 동력의 15.1%)보다 높아 변속기 입력축은 로타리 작업 보다 베일러 작업 시 더 큰 동력이 소요됨을 알 수 있다. PTO 입력축의 평균 소요동력은 PTO 1, 2단에서 각각 24.1 kW(엔진 동력의 57.7%)와 26.3 kW(엔진 동력의 55.5%)로 나타났으며, 이는 선행연구 결과인 17.1 kW(엔진 동력의 69.5%)보다 다소 낮은 수치로 PTO 입력축은 베일러 작업 보다 로타리 작업 시 더 큰 동력이 소요됨을 알 수 있다. 주 유압장치 및 보조 유압장치의 평균 소요동력은 PTO 1단에서 각각 3.9 kW(엔진 동력의 9.3%)와 2.6 kW(엔진 동력의 6.2%), PTO 2단에서 각각 4.0 kW(엔진 동력의 8.4%)와 2.8 kW(엔진 동력의 5.9%)로 나타나 선행연구 결과인 로타리 작업 시 주 유압장치 2.3 kW(엔진 동력의 9.3%)와 보조 유압장치 1.5 kW(엔진 동력의 6.1%)와 유사하였다.

PTO 단수 설정이 베일러 전체 작업의 소요동력에 미치는 영향을 분석하기 위해 트랙터 동력 소모 주요 구성요소를 대상으로 쌍차 t검정을 수행한 결과는 표 4와 같다. 변속기 입력축의 소요동력은 유의수준 5%에서 PTO 단수에 따라 차이를 보였으며, 이는 PTO 단수가 높을 경우 수확속도가 증가하여 트랙터의 견인력이 증가하였기 때문으로 판단된다. PTO 입력축의 경우에도 유의수준 5%에서 PTO 단수에 따른 차이가 나타났으며 PTO 2단이 1단에 비해 소요동력이 더 높게 나타났다. 이는 PTO 2단의 경우 단위 시간당 조사료 수확량이 더 많으므로 작업기 내로 유입되는 조사료의 절삭 및 압축에 따른 PTO 부하가 상대적으로 더 커지기 때문인 것으로 사료되었다. 주 유압펌프 및 보조 유압펌프의 경우 유의수준 5%에서 PTO 1, 2단의 소요동력 차이는 나타나지 않았다. 엔진 소요동력은 PTO 1, 2단에서 각각 41.8, 47.4 kW로 유의수준 5%에서 차이가 나타났으며 베일러 작업 시 PTO 2단

이 PTO 1단에 비해 소요동력이 더 높게 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 75 kW급 대형 트랙터의 에너지 효율 향상을 위한 기초 연구로써 트랙터 엔진 동력의 주요 소모 요소인 구동부, PTO, 주 유압장치, 보조 유압장치의 동력 계측 장치를 개발하고, 베일러 작업 시 동력 소모 요소의 소요동력을 분석하였으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 트랙터 동력 계측 시스템은 75 kW급 4륜구동 대형 트랙터에 장착되었으며, 구동부, PTO, 주 및 보조 유압장치의 소요동력 측정이 가능하도록 개발하였다. 구동부와 PTO의 동력은 엔진으로부터의 동력이 최초로 전달되는 변속기 입력축과 PTO 입력축에서 측정하였으며, 동력 측정을 위해 스트레인게이지와 텔레메트리 시스템을 이용하여 토르크를 측정하였고 회전수 측정은 엔진 속도계를 이용하였다. 또한 주 및 보조 유압펌프의 소요동력은 토출 압력, 유량, 체적 효율을 이용하여 계산하였으며, 토출 압력은 주 및 보조 유압펌프 각각에 압력센서를 장착하여 측정하였다.
- (2) 엔진의 소요동력 사용비율은 측정된 엔진 소요동력을 엔진 정격을 기준으로 25% 간격으로 나누어 전체 작업 시간 중 차지하는 비율을 계산하였으며, 그 결과 PTO 1단과 2단에서 25% 이하가 각각 4.0%, 2.2%, 25 ~ 50%가 각각 31.5%와 16.3%, 50 ~ 75%가 각각 49.6%, 59.7%로 나타나 베일러 작업 시 대부분의 소요동력이 이 구간에 집중됨을 알 수 있다. 또한 엔진 정격 75 ~ 100% 범위의 소요동력 사용비율은 PTO 1단이 14.4%, PTO 2단이 20.8%로 PTO 2단이 더 높게 나타났으며, 100% 이상의 범위에서는 각각 0.4%와 1.0%로 나타났다.
- (3) PTO 단수에 따른 변속기 입력축, PTO 입력축, 주 및 보조 유압장치의 소요동력을 베일 형성 구간, 베일 결

Table 4 Comparison of power consumption of major parts by PTO speed level

(N=3)

Major parts	Power consumption (kW)				t-value
	PTO speed level 1		PTO speed level 2		
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	
Transmission input shaft	11.2	0.72	14.3	1.13	3.29*
PTO input shaft	24.1	0.92	26.3	1.35	2.97*
Main hydraulic	3.9	0.37	4.0	0.22	1.02
Auxiliary hydraulic	2.8	0.19	2.8	0.25	0.90
Engine (total)	42.0	1.65	47.4	2.01	3.53*

* p<0.05

속 및 배출 구간, 전체 작업 구간으로 나누어 분석한 결과 모든 구간에서 구성요소 중 PTO 입력축이 가장 높은 비중을 차지하였으며, PTO 1단의 엔진 평균 소요동력은 베일 형성 구간, 베일 결속 및 배출 구간이 각각 43.3, 37.3 kW, 전체 구간의 평균 소요동력은 41.8 kW로 나타났다. PTO 2단의 엔진 평균 소요동력은 PTO 1단의 경우와 같이 베일 형성 구간이 49.0 kW로 베일 결속 및 배출 구간의 37.0 kW에 비해 높게 나타났다으며, 전체 구간이 47.4 kW로 나타나 PTO 2단이 PTO 1단에 비해 동력 소모가 더 큼을 알 수 있다. 또한 베일러 작업의 PTO 단수에 따른 소요동력 차이를 분석한 결과, 유의수준 5% 이내에서 변속기 입력축, PTO 입력축에서 소요동력의 차이가 나타났으며, 주 및 보조 유압펌프에서는 유의한 차이가 관찰되지 않았다. 엔진 소요동력은 PTO 1, 2단에서 각각 41.8, 47.4 kW로 유의수준 5%에서 차이가 나타났다.

Acknowledgments

This work was supported by the Technology Innovation Program funded by the Ministry of Knowledge Economy.

참 고 문 헌

- Gerlach, A. 1966. Field measurement of tractor transmission forces. *Transactions of the ASAE* 9(5):707-12.
- Grubisic, V. 1994. Determination of load spectra for design and testing. *International Journal of Vehicle Design* 15(1): 8-26.
- Han, K. H., K. U. Kim and Y. G. Wu. 1999. Severeness of transmission loads of agricultural tractor for rotary operations in poorly drained paddy field. *Journal of Biosystems Engineering* 24(4):293-300. (In Korean)
- Kim, D. J. 2004. *Hydraulic Engineering*. Bookshill, Seoul, Korea. (In Korean)
- Kim, J. H., K. U. Kim, C. W. Choi, and Y. G. Wu. 1998. Severeness of transmission loads of agricultural tractors. *Journal of Biosystems Engineering* 23(5):417-426. (In Korean)
- Kim, Y. J., S. O. Chung, C. H. Choi and D. H. Lee. 2011a. Evaluation of tractor PTO severeness during rotary tillage operation. *Journal of Biosystems Engineering* 36(3):163-170. (In Korean).
- Kim, Y. J., S. O. Chung, S. J. Park and C. H. Choi. 2011b. Analysis of power requirement of agricultural tractor by major field operation. *Journal of Biosystems Engineering* 36(2):79-88. (In Korean).
- Park, S. H., Y. J. Kim, D. H. Im, C. K. Kim, S. C. Jung, H. J. Kim, J. S. Lee and S. S. Kim. 2010. Characteristics of tractor PTO power and work loads. *Journal of Biosystems Engineering* 35(1):15-20. (In Korean)
- Park, W. Y. and K. S. Lee. 2003. Prediction of bulk type trailer capacity in consideration of soil physical properties of paddy field. *Journal of Biosystems Engineering* 28(1):1-10. (In Korean)
- RDA. 2010. *Symposium on the Energy Saving Technology and Diffusion for Low Carbon Green Growth*. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Ryu, K. H. 2004. *Tractor Engineering Principles*. Munundang, Seoul, Korea. (In Korean)