

## 트랙터 전동라인의 전동효율 특성 분석

# Characteristics of Power Efficiency of Tractor Driveline

류일훈 정희원 I. H. Ryu	김대철 정희원 D. C. Kim	김경욱 정희원 K. U. Kim
-------------------------	-------------------------	-------------------------

### ABSTRACT

According to the field test, the transient power transmission efficiency of a tractor driveline fluctuated in a range of 56 to 86% and the mean value was about 72.5%. Therefore, the constant efficiency model commonly used for a simulation of power performance was not proper for predicting such a variable efficiency. In order to predict power efficiency more accurately, new concepts of the maximum efficiency and drag torque were introduced and a new model based on the these concepts was proposed. The difference between measured and model-predicted efficiencies was about 1.5% in average with a standard deviation of 1.1%. The new power efficiency model was expected to enhance the accuracy of predicting power transmission efficiencies of tractor drivelines.

**Keywords** : Power driveline, Transmission efficiency, Drag torque, Agricultural tractor.

### 1. 서 론

트랙터에서 엔진의 고속-저토크 동력은 변속기와 전동라인을 통하여 저속-고토크의 동력으로 전환되어 최종 구동축과 동력취출축으로 전달된다. 이러한 동력 전환과 전달 과정에서는 항상 동력 손실이 일어난다. 즉, 트랙터에서 전동라인의 최대 전동효율은 85~89% 정도이므로 전동라인에서 최소한 11~15% 정도의 동력 손실이 일어난다(Hahn, 1996). 작업 상태에서는 동력 손실이 보통 20~30%에 이르는 경우도 있다(Hahn, 1996). 이러한 동력 손실은 전동 토크와 운전 속도의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Reiter, 1990).

최근까지 전동라인의 전동효율에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 전동라인 모형에서는 일반적으로 전동효율은 전동 토크와 속도에 관

계없이 일정하다고 가정하는 등가효율 모형(constant efficiency model)이 이용되어 왔다. Lucas(1984)는 수동 변속 차량의 토크를 측정하여 전동효율을 구하고, 평균 전동효율은 90%로 높았으나, 순간 전동효율은 70~100% 범위에서 변동이 심하다고 보고하였다. Taborek(1957)은 자동차의 총전동효율은 각 부품에 대한 전동효율의 곱으로 나타낼 수 있다고 하였다. 전동라인의 각 부품에 대한 전동효율은 클러치가 99%, 감속비가 큰 기어가 95%, 감속비가 작은 기어가 98%, 차동장치가 95%, 베어링 또는 조인트가 98~99% 정도이고, 이를 조합한 전동라인의 총 전동효율은 고속에서 90%, 저속에서 85%, 초저속에서는 75~80% 정도라고 하였다. Reiter(1990)는 전동 토크, 엔진 속도, 기어 변속이 전동효율에 미치는 영향을 연구하였으며, 전동 손실에는 전동 토크에 비례하는 부분

This paper was submitted for publication in October 2001: reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2001. The authors are Il H. Ryu Graduate Student, Dae C. Kim Graduate Student and Kyeong U. Kim Professor, School of Bioresources and Material Engineering Seoul National University 441-744 Suwon Korea. The corresponding author is Kyeong U. Kim. Professor School of Bioresources and Material Engineering Seoul National University 441-744 Suwon, Korea. e-mail: <kukim@plaza.snu.ac.kr>.

과 그렇지 않은 부분이 존재한다고 하였다.

본 연구에서는 트랙터의 전동라인을 대상으로 실제 작업 상태에서 전동라인의 입력과 출력 토크 및 입력과 출력 속도를 측정하여 전동효율의 변화 특성을 구명하였으며, 또한 이러한 특성을 이용하여 전동효율의 특성을 모형화할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 보다 정확한 전동효율의 모형화는 전동라인의 시뮬레이션과 성능 예측의 신뢰도를 높이는데 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 시험 트랙터

전동효율의 특성을 구명하기 위하여 본 연구에서 사용한 시험 트랙터는 중량이 17.1 kN이고 정격출력과 속도가 각각 30 kW, 2,600 rpm인 중형 트랙터이였으며, 전동라인은 클러치, 수동 기어 박스, 차동기어, 최종 감속기어, 최종 구동축으로 구성된 것이었다. 클러치의 형식은 단판 건식이였으며, 기어 박스는 주변속 4단(1, 2, 3, 4), 부변속 4단(High, Mid, Low, Low Low)으로 전후진 각각 16단으로 구성된 것이었다. 전후진 변속과 주변속 3, 4단은 싱크로 메시 형식이였으며, 다른 변속 단수는 모두 상시물림식으로 된 것이었다. PTO 변속은 4단으로 구성되어 있으며, 차동장치는 기계식으로 차동 잠금장치가 설치되어 있고, 최종 감속기어의 감속비는 5.5:1이였다. 표 1과 그림 1은 각각 시험 트랙터의 제원과 전동라인을 나타낸 것이다.

### 나. 측정 방법

작업 상태에서 트랙터의 전동라인에 대한 전동효율을 결정하기 위하여 전동라인 입력축 토크, 엔진 속도, 최종 구동축 토크, 최종 구동축 속도를 각각 측정하였다. 그림 2는 시험 트랙터의 전동라인에 설치된 계측 장치와 계측 회로를 나타낸 것이다.

전동라인의 전동효율은 트레일러에 2 ton의 화물을 적재한 운반 작업을 대상으로 분석하였다. 운반 작업의 경우, 정속 주행 상태에서는 부하 수준이 낮으나 출발할 때는 부하가 크다. 이는 트레일러와 화물의 무게에 의한 관성 부하가 크기 때문이다. 주행은 경사도가 2~3° 내외인 비포장 농

Table 1 Specifications of test tractor

Specifications	
Type	Diesel 4 cycle
No. of cylinders	4
Rate power/speed	30 kW/2600 rpm
Wheel base	1900 mm
Tire Front/Rear	8×18 4PR/13.6×28 6 PR
Speed Min./Max.	0.36/25.6 km/h
T/M For./Rev.	16/16

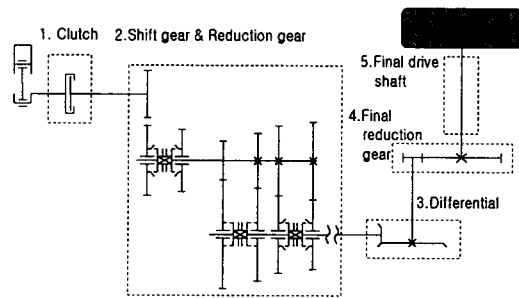


Fig. 1 Transmission of test tractor.

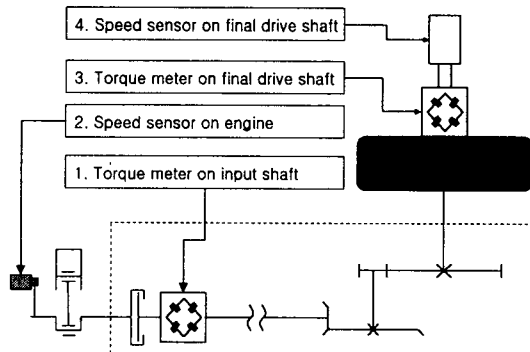


Fig. 2 Measuring instruments installed in driveline of test tractor.

로에서 실시하였다.

트랙터의 엔진은 무부하 상태에서 회전 속도가 2,600 rpm이 되도록 가속 장치를 설정하였으며, 주행 중에는 이 회전 속도를 유지할 수 있도록 하였다. 그림 3은 전동라인 입력축과 최종 구동축의 토크와 속도를 측정할 때의 운반작업 상태를 나타낸 것이다.

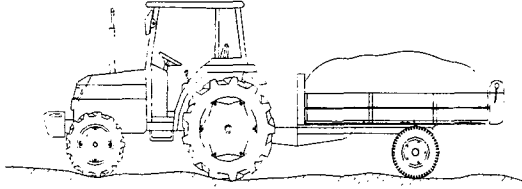


Fig. 3 Power efficiency test.

Tabel 2 Specification of measuring devices

Instruments	Specifications
Input torque meter	Accuracy 0.29% FS Measuring range 0-400 N.m Telemetry system
Axle torque meter	Accuracy R/L 0.31/0.56% FS Measuring range 0-5400 Nm
Rotary encoder	Resolution 360 pulses/rev Measuring range 0-5,000 rpm
Engine speed sensor	Generator pulse counter RC filter
Data logger	Resolution 12 bit Analog sampling 76.8 kHz Memory 488 K No. of feq. channel 3

다. 측정 장치

본 연구에서 사용한 계측 장치는 김(1998)이 개발한 토크 미터와 계측 시스템을 이용하였으며, 각 계측 장치의 주요 제원은 표 2에서 같다. 데이터 입력 속도는 333 Hz로 하였으며, 15초 동안 각 센서 당 5,000개의 데이터를 기록하였다

라. 전동효율 계산 방법

일반적으로 속도는 토크에 비하여 상대적으로 측정 오차가 크다. 또한, 전동라인은 비틀림 강성이 크기 때문에 엔진 속도와 최종 구동축 속도 사이에는 선형적인 관계가 있다.

속도에 대한 측정 오차를 줄이기 위하여 전동효율을 계산할 때는 식 (1)에서와 같이 속도비 대신 변속비를 이용하였으며, 동력 계산에서는 측정된 엔진 속도와 최종 구동축 속도를 그대로 사용하였다.

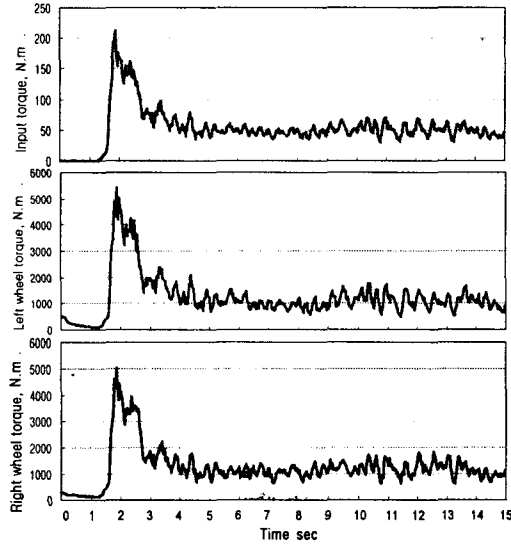


Fig. 4 Time histories of input shaft, left and right axle torques.

$$\eta_{measured} = \frac{T_{wheel} \cdot \omega_{wheel}}{T_{input} \cdot \omega_{engine}} \times 100 \quad (1)$$

$$= \frac{T_{wheel}}{T_{input} \cdot N} \times 100$$

여기서,

- $\eta_{measured}$  = 전동라인의 전동효율, %
- $T_{wheel}$  = 최종 구동축 토크, N.m
- $T_{input}$  = 전동라인 입력축 토크, N.m
- $\omega_{wheel}$  = 최종 구동축 속도, rad/s
- $\omega_{engine}$  = 엔진 속도, rad/s
- $N$  = 엔진에서 최종 구동축까지 감속비

3. 결과 및 고찰

그림 4는 변속 단수를 H1(10.3 km/h)으로 출발하였을 때 변속기의 입력축 토크, 좌측 구동축 토크, 우측 구동축 토크를 15초 동안 측정된 결과이다. 입력축 토크의 경우 출발 초기에는 200 N.m까지 증가하였으나 서서히 감소하여, 주행 중에서는 50 N.m 수준을 유지하였다. 트랙터 엔진의 정격 토크가 112 N.m이고, 최대 토크가 130 N.m이었으므로, 출발시 토크는 정격 토크의 약 1.8배로서 과부하 상태이었다. H1단에서 전동라인의 감속비가 62.6이었으므로 최종 구동축 토크의 크기는 입

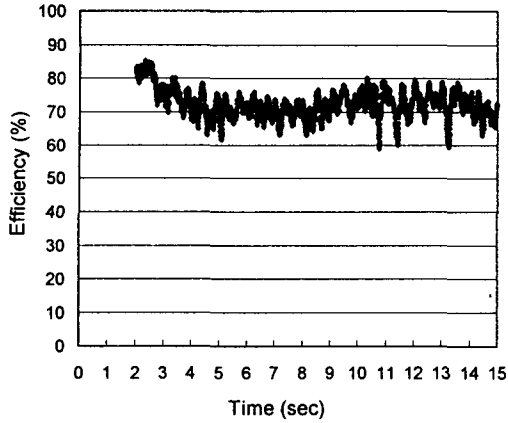


Fig. 5 Time history of power efficiency.

력축 토크의 31.3배가 되었다. 입력축 토크와 좌우 구동축 토크의 변화는 유사한 형태를 나타내었으며, 시험 트랙터가 직진하였기 때문에 좌우 구동축 토크의 변화 형태와 크기도 일치하였다.

그림 5는 그림 4의 결과를 이용하여 구한 시간 함수의 전동효율을 나타낸 것이다. 출발 초기에는 전동 상태가 불안정하였기 때문에 클러치가 완전히 결합되기 이전의 데이터는 사용하지 않았다. 15초 동안의 평균 전동효율은 72.5%이었으나, 순간 전동효율은 56%에서 86%까지 변화되었으며 변동 범위는 30%이었다. 즉, 작업중인 트랙터에서 전동라인의 전동효율은 변화 폭이 크게 나타났다. 따라서 변화를 고려하지 않고 전동효율을 일정한 상수로 가정할 경우에는 전동 성능 예측에서 큰 오차가 발생할 것으로 예상된다.

그림 6은 변속기의 입력축 토크와 구동축 토크 사이의 관계를 구명하기 위하여 이를 각각 X, Y 축에 도시한 것이다. 구동축 토크는 좌, 우 구동축 토크를 더한 것으로 하였다. 그림 6에서 출력 토크가 0인 경우에도 입력 토크가 나타나는 것은 구동축에 부하가 작용하지 않더라도 입력축에는 항상 일정한 크기의 저항 토크가 작용하고 있음을 나타낸다. 저항 토크의 크기는 정격토크의 8% 정도이고, 운반 작업의 정상 부하 토크인 50 N.m의 17% 정도이었다. 이러한 저항 토크는 전동효율에 큰 영향을 미치며 특히, 전달하는 토크의 크기가 작을수록 그 영향은 더욱 증가된다. 따라서 전동효율은 저항 토크의 크기를 고려하여 예측하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

저항 토크,  $T_{drag}$ 는 전동 토크와 회전속도에 관

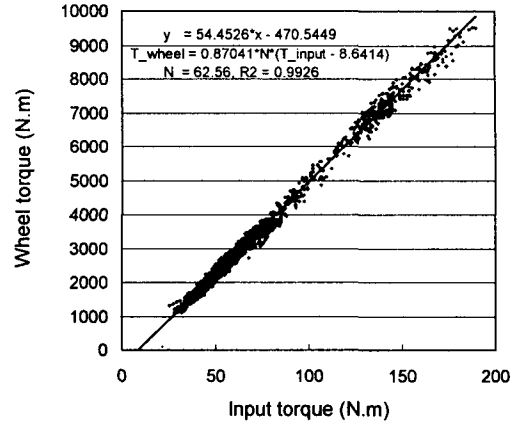


Fig. 6 Linear relationship between input shaft and driving axle torques.

계없이 항상 일정하므로 최대 전동효율을  $\eta_{max}$  라고 하면 최종 구동축 토크는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{output} = \eta_{max} N (T_{input} - T_{drag})$$

여기서,

$N$  = 전동라인의 감속비

$\eta_{max}$  = 전동라인의 최대 전동효율, %

$T_{drag}$  = 전동라인의 저항 토크, N.m

$T_{input}$  = 전동라인 입력축 토크, N.m

따라서, 전동라인의 전동효율  $\eta$ 은 식 (2)에서와 같이 저항 토크와 최대 전동효율로써 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{T_{output}}{NT_{input}} = \eta_{max} \left(1 - \frac{T_{drag}}{T_{input}}\right) \quad (2)$$

$$\text{if } T_{input} \geq T_{drag}$$

$$= 0 \quad \text{if } T_{input} < T_{drag}$$

최대 전동효율과 저항 토크는 그림 6의 입력축과 최종 구동축 토크의 선형 회귀식을 이용하여 구할 수 있다. 최대 전동효율은 회귀식의 기울기를 감속비로 나눈 것과 같고, 저항 토크는 x축의 절편과 같다. 최대 전동효율은 저항 토크가 0인 경우 또는 전동 토크가 대단히 큰 경우의 전동효율로서, 전동 토크에 비례하는 동력 손실을 나타낸다. 저항 토크는 전동라인을 구동하기 위한 최소한의 토크로서 크기가 일정하고 전동 토크에는

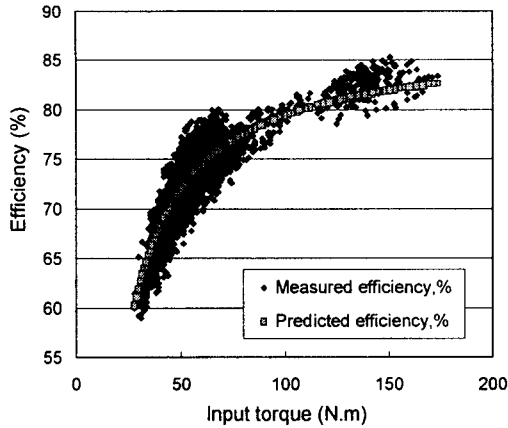


Fig. 7 Measured and predicted power efficiencies versus input torque.

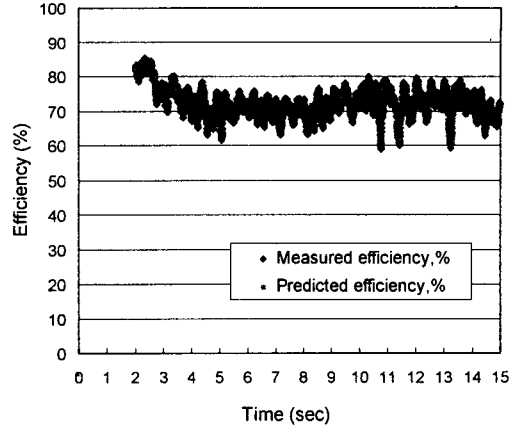


Fig. 8 Time histories of measured and predicted power efficiency of driveline.

Table 3 Torque loss under various load conditions

Input torque, N.m (state)	Torque loss (N.m)		
	By drag torque	At maximum efficiency	Total
8.6 (idle)	8.6(100%)	0.0( 0%)	8.6
50 (normal)	8.6( 61%)	5.4( 39%)	14.0
112 (rated)	8.6( 39%)	13.4( 61%)	22.0

영향을 받지 않는다. 저항 토크는 오일의 점성, 기어와 베어링에 작용하는 마찰력에 의하여 발생되며, 전동라인의 속도와 오일 온도의 영향을 받는다.

시험 트랙터에서 측정된 데이터에 의하면 H1단에서 저항 토크는 8.6 N.m이고 최대 전동효율은 87.0%인 것으로 나타났다. 그림 7은 입력 토크의 크기에 따라 측정된 전동효율과 식 (2)로써 예측한 전동효율을 비교하여 나타낸 것이다. 측정치와 예측치는 비교적 잘 일치하였다. 즉, 전동 손실은 저항 토크에 의한 불변 성분과 전동 토크에 의한 가변 성분의 합으로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

표 3은 전동 토크의 크기에 따라 시험 트랙터의 토크 손실을 나타낸 것이다. 저항 토크에 의한 손실과 최대 전동효율에서 발생된 손실을 구별하여 나타내었다. 수동 변속기에서는 속도 손실이 없기 때문에 토크 손실은 직접적으로 동력 손실을 나타낸다. 정격출력에서 저항 토크에 의한 손실은 총

손실의 39%를 차지하였으며, 무부하 상태에서는 100%를 차지하였다. 따라서 전동효율은 저항 토크의 크기를 고려하여 분석해야 할 것으로 판단된다.

그림 8은 시간에 따른 측정 전동효율과 예측 전동효율의 변화를 나타낸 것이다. 변화의 경향은 잘 일치하였다. 15초 동안의 측정된 5,000개의 데이터를 이용하여 각 측정 시점에서 측정 전동효율과 예측 전동효율 사이의 차이를 구하고 이를 분석하였다. 측정 전동효율과 예측 전동효율의 차이는 평균이 1.5%이었으며, 표준편차는 1.1이었다. 따라서 저항 토크가 포함된 전동효율 예측식은 실제 작업중인 전동라인의 전동효율을 보다 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

저항 토크에 의한 불변 성분의 동력 손실과 전동 토크에 의한 가변 성분의 동력 손실을 고려한 이러한 개념의 전동효율 모형식 (2)는 평균 개념의 등가 전동효율 모형보다 이론적이고 또한 실제 현상을 보다 잘 설명하고 있다. 그러나 전동라인의 성능을 예측하기 위한 시뮬레이션 등에서 식 (2)를 사용하기 위해서는 먼저 최대 전동효율과 저항 토크를 결정하여야 한다. 입력 토크는 보통 기관의 성능 곡선에서 입력 속도에 따라 주어지기 때문에 쉽게 구할 수 있다. 최대 전동효율과 저항 토크는 많은 데이터가 축적되지 않은 경우에는 실험에 의해서만 결정할 수 있으나, 각종 형태의 전동라인에 대한 데이터가 축적되면, 그 형태와 특징에 따라 그 값을 결정하여 사용할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

트랙터 전동라인의 전동효율과 그 특성을 분석하기 위하여 운반 작업 상태에서 각각 변속기 입력축과 최종 구동축의 속도와 토크를 측정하고 전동 효율을 구하였다. 작업 상태에서 전동효율은 56%에서 86%까지 변화되는 것으로 나타났다. 이러한 전동효율의 가변성은 지금까지 등가 전동효율 모형을 기본으로 한 성능 예측에서 많은 오차를 유발할 것으로 판단된다. 전동라인의 전동 손실은 저항 토크에 의한 불변 성분과 전달 토크에 의한 가변 성분으로 이루어져 있으며, 정격 출력에서 저항 토크에 의한 동력 손실은 전체 동력 손실의 39%를 차지한 것으로 나타났다. 따라서, 저항 토크는 전동라인의 전동효율에 큰 영향을 미치며, 이러한 영향은 전동 토크의 크기가 작을수록 더욱 증가하였다.

최대 전동효율과 저항 토크를 정의하고, 전동 손실의 불변 성분과 가변 성분을 고려하여 전동라인의 전동효율을 보다 정확하게 예측할 수 있는 모형을 개발하였다. 개발된 예측 모형으로 구한 전동효율과 실측한 전동효율의 차이는 평균 1.5%이었으며, 표준편차는 1.1이었다. 따라서 최대 전동효율과 저항 토크를 고려한 전동효율 예측 모형은 전동라인의 성능 분석과 예측의 정확도를 크게 높일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. Hahn, R. H. and D. C. Landeck. 1996. ASAE Standards 43th Edition. American Society of Agricultural Engineers. USA, pp. 326-331.
2. Kim, D. C. 1998. Analysis of load spectrum of tractor drive line. Unpublished MS thesis. Seoul National University.
3. Lucas, G. G. 1984. Road vehicle performance. Gordon and breach science publishers.
4. Reiter, H. 1990. Verluste und Wirkungsgrade bei Traktorgetrieben. Fortschr-Ber. VDI Reihe 14 Nr. 46. Dusseldorf: VDI-Verlag 1990.
5. Taborek, J. J. 1957. Mechanics of vehicles. Penton Publishing Co.