

# 농업용 트랙터의 연료 소비량 예측 모델

김수철 김경욱 김대철

## Modeling of Fuel Consumption Rate for Agricultural Tractors

S. C. Kim K. U. Kim D. C. Kim

### Abstract

A mathematical model was developed to predict the fuel consumption rate consumed by agricultural tractors under arbitrary loaded conditions. The model utilizes the measured data on the fuel consumptions at the full load and at the rated engine speed with partial loads, which can easily be obtained from the official OECD tractor test reports. It was found from the analysis of the measured fuel consumption data that the fuel consumptions at two different speeds does not change with power. The model was developed based on this fact and validated with the measured data of the 159 tractor test reports.

The fuel consumptions predicted by the model were compared with those measured under the partially loaded conditions specified in the official OECD tractor test code II. The percent errors of the predicted fuel consumptions were in a range from 0.36 to 2.86% which assured that the developed fuel consumption model can be used practically to predict the fuel consumptions at any speed and power combinations. It was also shown that the developed model predicts the fuel consumption rate better than the Grisso's model.

**Keywords :** Tractor, Fuel consumption, Prediction model

### 1. 서론

트랙터의 연료 소비량은 트랙터의 성능을 결정하는 중요한 성능 지표이다. 연료 소비량에 대한 신뢰할 수 있는 데이터는 OECD 시험 코드에 따라 시험한 트랙터의 시험 성적서에서 구할 수 있으며, OECD 시험 성적서는 전부하 상태와 특정 부분 부하 상태에서 측정된 연료 소비량을 제시하고 있다. 그러나 트랙터가 실제 사용되는 조건은 전부하 또는 특정 부분 부하 조건이 아니기 때문에 트랙터가 실제 소비하는 연료량도 전부하 상태 또는 특정 부분 부하 상태에서 측정된 연료 소비량과는 다르다.

실제 사용 조건에서 예상되는 연료 소비량을 구하기 위해서는 임의의 속도와 출력 수준에서 소비되는 연료량을 예측할 수 있는 예측식을 개발하여야 한다. Grisso 등(2006)은 OECD 트랙터 시

험 코드에 따라 견인 성능 시험에서 측정된 연료 소비량 데이터를 이용하여 연료 소비량을 예측할 수 있는 예측식을 개발한 바 있다. 그러나 견인 성능 시험에서는 시험소에 따라 연료 소비량을 측정하지 않는 경우가 있기 때문에 예측식을 적용할 수 없는 경우도 있다. 또한 Grisso의 예측식은 견인 성능 시험에서 측정된 연료 소비량 데이터만을 이용하기 때문에 보다 광범위한 가용 영역에서 엔진의 연비 특성을 반영하지 못하는 단점이 있다.

본 연구에서는 보다 광범위한 가용 영역에서 엔진의 연비 특성을 반영하기 위하여 주 PTO 시험 성적으로서 엔진의 전 부하 상태 및 정격 속도의 부분 부하 상태에서 측정된 연료 소비량 데이터와 그 특성을 이용하여 임의의 부분 부하 상태에서 예상되는 연료 소비량을 추정할 수 있는 예측식을 개발하고 이 예측식의 유효성을 입증하였다.

The article was submitted for publication on 2009-08-28, reviewed on 2009-12-18, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2010-01-20. The authors are Soo Chul Kim, Graduate Student, Kyeong Uk Kim, Professor, Seoul National University, Seoul, Korea, and Dae Cheol Kim, Senior Researcher, R&D Center Tongyang Moolsan Co. Ltd., Gongju, Korea. Corresponding author: K. U. Kim, Professor, Department of Biosystems and Biomaterial Science and Engineering, and Institute for Agricultural and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea; Fax: +82-02-873-2049; E-mail: <kukim@snu.ac.kr>.

## 2. 연료 소비량 예측식 개발

### 가. 트랙터 시험 성적서

예측식을 개발하기 위하여 사용한 트랙터 시험 성적서는 2000년부터 2007년까지 국내 농촌진흥청 농업공학부에서 시험한 143개의 트랙터에 대한 시험 성적서(NIAE, 2000~2007; NIAE, 2007 a and b)와 16대의 트랙터에 대한 OECD 시험 성적서(CEMAGREF, 2006 a and b; Central Farm Machinery Training & Test Institute, 2007; COTTEC, 2005 a, b, c, and d; COTTEC, 2007 and 2008; DLG-Testing Station for Agricultural Machinery, 2005 a, b, and c; Nebraska Tractor Test Laboratory, 2006; OECD, 2008; Silsoe Research Institute, 2005)이다. 엔진의 전부하 상태와 정격 속도의 부분 부하 상태에서 측정된 연료 소비량은 국내 시험 성적서와 OECD 시험 성적서에서 모두 제시하고 있으며, 정격 속도가 아닌 다른 속도의 부분 부하 상태에서 측정된 연료 소비량은 OECD 시험 성적서에만 제시하고 있다. 그림 1은 OECD 시험 성적서에서 연료 소비량을 제시하고 있는 전부하 상태,

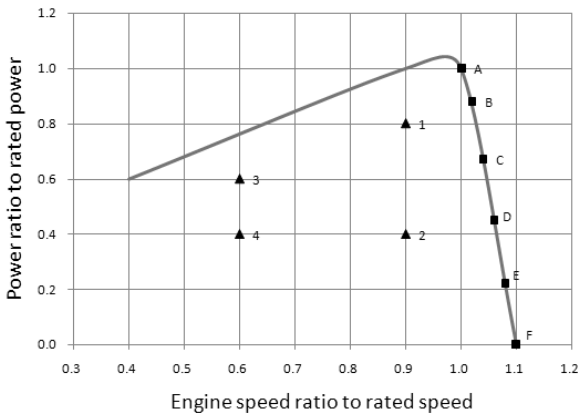


Fig. 1 Measuring points of fuel consumption for the OECD tractor test.

정격 속도의 부분 부하 상태 A, B, C, D, E, F 및 비정격 속도의 부분 부하 상태 1, 2, 3, 4를 나타낸 것이다. A, B, C, D, E, F점은 정격 속도에서 토크가 각각 최대 토크의 100%, 85%, 63.75%, 31.9%, 7.97%, 0%인 상태이고, 1, 2점은 정격 속도의 90%인 속도에서 출력이 각각 정격 출력의 80%와 40%, 3, 4점은 정격 속도의 60%인 속도에서 출력이 각각 정격 출력의 60%와 40%인 상태이다. 본 연구에서는 전부하 출력 상태와 10개 지점의 부분 부하 상태에서 측정된 기관 출력, 기관 속도, 연료 소비량을 이용하여 임의의 부분 부하 상태에서 연료 소비량을 추정할 수 있는 예측식을 개발하였다.

### 나. 정격 속도에서 부분 부하 상태의 연료 소비량

정격 속도의 부분 부하 상태, 즉 그림 1의 A, B, C, D, E,

F점에서 측정된 연료 소비량을 출력의 함수로서 나타내면 그림 2에서와 같이 연료 소비량은 출력에 비례한다. 즉, 정격 속도의 부분 부하 상태에서 연료 소비량은 출력의 1차 함수로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = aP + b \quad (1)$$

where, Q = fuel consumption, L/h

P = power, kW

a, b = coefficients

식 (1)의 상수 a, b는 출력과 연료 소비량의 관계를 나타낸 1차 회귀 직선의 기울기와 출력이 0일 때의 연료 소비량이다.

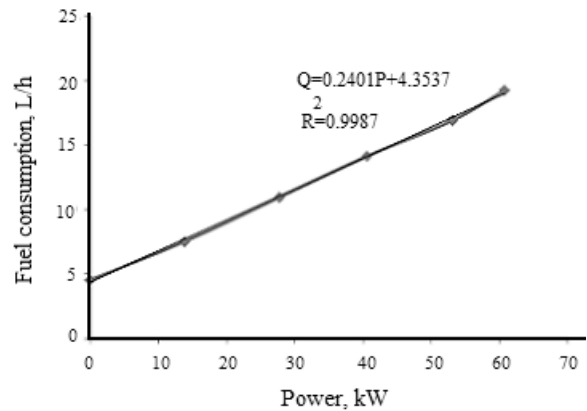


Fig. 2 Fuel consumption versus power at the rated speed.

식 (1)의 선형 관계를 다시 한 번 확인하기 위하여, 그림 3에서와 같이 본 연구에서 사용한 159대의 트랙터 시험 성적서에 보고된 그림 1의 A, B, C, D, E, F점에서 측정된 연료 소비량과 식 (1)로써 예측한 연료 소비량을 비교하였다. 총

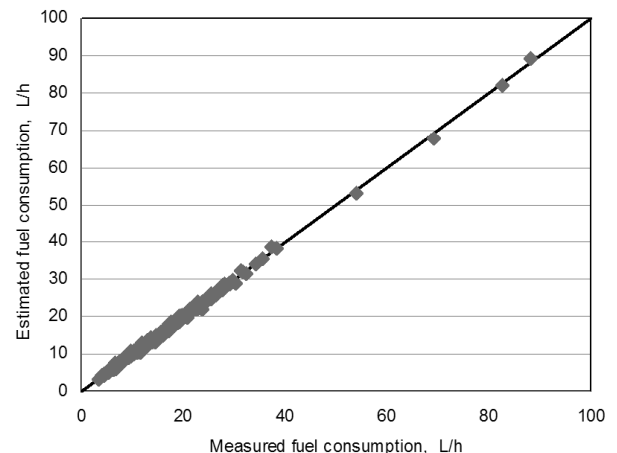
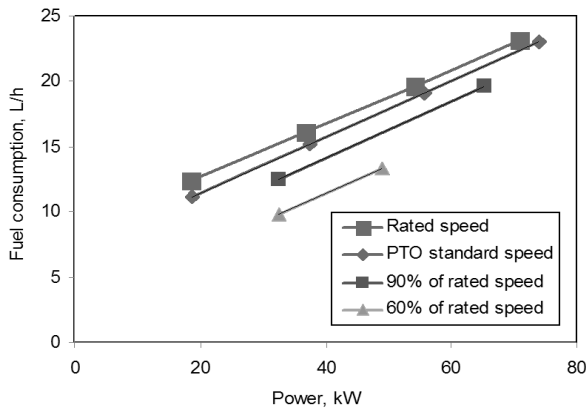


Fig. 3 Comparison between the measured and predicted fuel consumptions at rated speed.

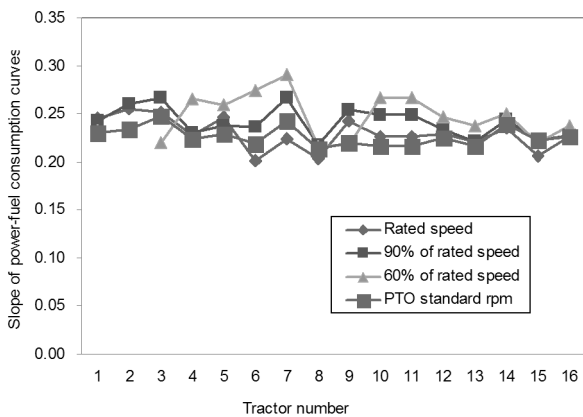
954개의 측정 연료 소비량에 대한 예측 연료 소비량의 상관 계수는 0.999로서 식 (1)의 유효성은 충분한 것으로 판단되었다.

**다. 비정격 속도에서 부분 부하 상태의 연료 소비량**

트랙터 16대의 OECD 시험 성적서를 이용하여 정격 속도, 정격 속도의 60% 속도, 정격 속도의 90% 속도, PTO 표준 속도에서 측정한 부분 부하 상태의 연료 소비량과 출력의 관계를 분석하였다. 그림 4에서와 같이 그림 1의 1, 2, 3, 4의 부분 부하 상태에서 측정한 연료 소비량은 출력에 비례하였으며, 출력-연료 소비량 선도의 기울기는 그림 5에서와 같이 0.2~0.3인 범위인 것으로 나타났다. 그러나 정격 속도와 PTO 표준 속도에서 평균 기울기는 각각 0.229와 0.226이고 정격 속도의 60%와 90%인 속도에서 평균 기울기는 각각 0.247과 0.241로서, 정격 속도의 60%와 90%인 속도에서 기울기가 더 크게 나타났다. 이는 정격 속도와 PTO 표준 속도에서는 전부하 상태에서 부분 부하 상태로 부하가 감소함에 따라 속도가 약간씩 증가하여 연료 소비량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.



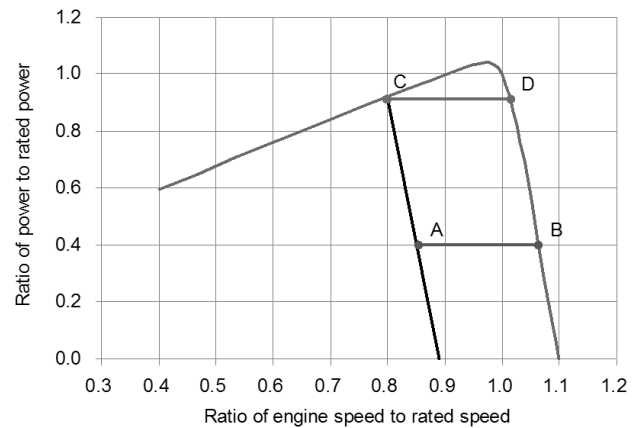
**Fig. 4** Fuel consumption versus power at various engine speeds.



**Fig. 5** Variations in slope of power-fuel consumption curves plotted using the OECD tractors test reports.

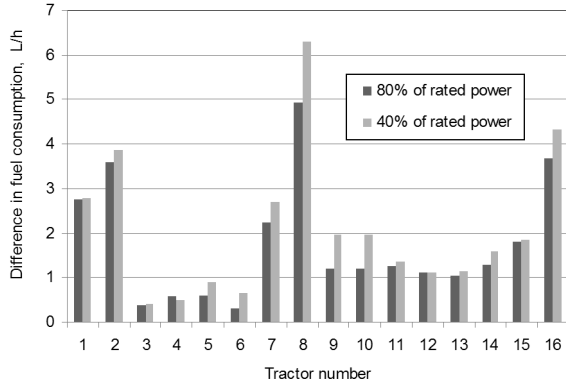
정격 속도에서 구한 출력-연료 소비량 선도의 기울기에 대한 비정격 속도에서 구한 출력-연료 소비량 선도의 기울기 비는 0.95~1.1 범위이었으나 특정 속도에서 부하 감소에 따른 속도 증가를 고려하면 이러한 비의 차이는 더욱 감소된다. 즉, 속도 변화에 따른 출력-연료 소비량 선도의 기울기에는 큰 변화가 없었다.

정격 속도와 비정격 속도에서 출력-연료 소비량 선도의 기울기가 같다고 하면 모든 부하 상태에서 두 속도의 차이에 의한 연료 소비량의 차이도 같다고 할 수 있다. 그림 6에서와 같이 정격 속도와 정격 속도의 80%인 속도에서 속도 차이에 의한 연료 소비량의 차이는 출력에 관계 없이 항상 일정하다는 것이다. 즉, A점과 B점의 연료 소비량 차이는 C점과 D점의 연료 소비량 차이와 같다는 것이다. 이를 다시 한 번 확인하기 위하여 그림 7에서와 같이 OECD 시험 성적서에서 제시한 그림 1의 1, 2, 3, 4점의 실측 연료 소비량과 같은 출력 상태의 정격 속도에서 측정한 연료 소비량의 차이를 비교하였다.

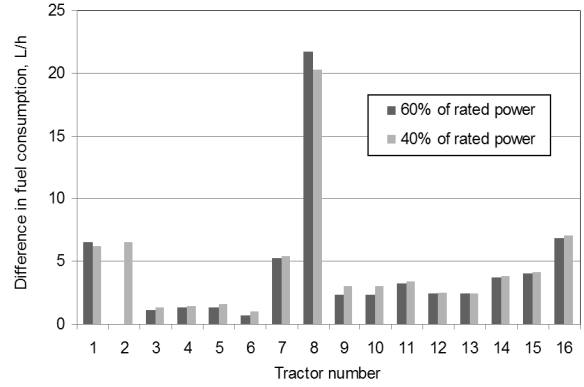


**Fig. 6** Difference in fuel consumptions by power at 100 and 80% of rated speeds.

그림 7(a)는 OECD 시험 성적서에서 제시하고 있는 그림 1의 점 1과 2 즉, 정격 속도의 90%인 속도에서 측정한 연료 소비량과 같은 출력 수준의 정격 속도에서 측정한 연료 소비량의 차이를 나타낸 것이고, 그림 7(b)는 점 3과 4 즉, 정격 속도의 60%인 속도에서 측정한 연료 소비량과 같은 출력 수준의 정격 속도에서 측정한 연료 소비량의 차이를 나타낸 것이다. 그림 7(a)와 7(b)에서와 같이 속도 차이에 의한 연료 소비량의 차이는 출력 수준에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 즉, 점 1의 경우에서와 같이, 속도가 정격 속도에서 정격 속도의 90%인 속도로 감소되었을 때 연료 소비량의 차이는 출력이 정격 출력의 80%일 때나 40%일 때나 거의 같다는 것이다. 그림 7(a)와 7(b)에 나타난 차이는 정격 속도에서의 연료 소비량이 실제로는 정격 속도보다 10% 범위 내



(a) Between 90 and 100% of rated speeds



(b) Between 60 and 100% of rated speeds

Fig. 7 Differences in fuel consumption by power.

에서 출력 수준에 따라 증가된 속도에서 측정된 것이기 때문이다.

이상에서 구명한 속도 차이에 의한 연료 소비량의 차이는 출력 수준에는 큰 영향을 받지 않는다는 사실을 이용하여 다음과 같은 순서로 임의의 출력 및 속도 수준에서 예상되는 연료 소비량을 추정하였다.

(1) 전부하 출력 선도에서 임의의 출력 및 속도점(그림 6에서 A점)을 지나고 정격 속도와 최대 속도 사이의 출력 선도(그림 6에서 BD)와 평행한 출력 선도(그림 6에서 AC)를 그린다.

그림 6에서와 같이 정격 속도에 대한 엔진 속도비  $n$ 을 수평축, 출력  $P$ 를 수직축으로 한 직교 좌표계에서 최대 출력점과 최대 속도점 사이의 속도-출력 선도 BD의 기울기를  $a_p$ 라고 하면 임의의 출력 및 속도점 A 즉,  $(n_A, P_A)$ 점을 지나고 기울기가  $a_p$ 인 속도-출력 선도 AC는 다음과 같이 표현된다.

$$P = a_p(n - n_A) + P_A \quad (2)$$

where.  $P$  = power, kW

$n$  = ratio of engine speed to rated speed, decimal

(2) 평행한 출력 선도와 전부하 출력 선도가 교차하는 점(그림 6에서 C점)을 구한다.

전부하 출력 선도는 정격 속도에 대한 속도비의 2차 함수로서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며(Jazar, 2008), OECD 시험 성적서에 제시된 전부하 출력 시험의 결과를 이용하여 상수  $k_1, k_2, k_3$ 를 구한다.

$$P = k_1 n^2 + k_2 n + k_3 \quad (3)$$

where,  $P$  = power, kW

$n$  = ratio of engine speed to rated speed, decimal

$$k_1, k_2, k_3 = \text{constants}$$

식 (2)와 (3)을 이용하여 A점을 지나는 출력 선도와 전부하 출력 선도가 교차하는 C점의 속도  $n_C$ 와 출력  $P_C$ 를 구하면 각각 다음과 같다.

$$n_C = \frac{-(k_2 - a_p) + \sqrt{(k_2 - a_p)^2 - 4k_1(k_3 + a_p n_A - P_A)}}{2k_1}$$

$$P_C = a_p(n_C - n_A) + P_A$$

(3) 전부하 상태의 연료 소비량 선도를 이용하여 C점에서 연료 소비량을 구한다.

전부하 상태에서 연료 소비량도 식 (4)에서와 같이 속도비의 2차 함수로서 나타낼 수 있으며(Jazar, 2008), OECD 시험 성적서에 제시된 전부하 상태의 연료 소비량 데이터를 이용하여 상수  $s_1, s_2, s_3$ 를 구한다.

$$q = s_1 n^2 + s_2 n + s_3 \quad (4)$$

where,  $q$  = fuel consumption, L/h

$n$  = ratio of engine speed to rated speed, decimal

$s_1, s_2, s_3$  = constants.

식 (4)를 이용하여 교점 C에서 연료 소비량  $q_C$ 을 구한다.

$$q_C = s_1 n_C^2 + s_2 n_C + s_3$$

(4) 정격 속도에서 연료 소비량 예측식 (1)을 이용하여 C점과 같은 출력 수준의 정격 속도(그림 6에서 D점)에서 연료 소비량을 구한다.

식 (1)을 이용하여 Fig. 6의 출력 선도 DB에서 C점의 출력 수준에 해당하는 D점에서 연료 소비량  $Q_D$ 를 구하면,  $P_D$

=  $P_C$ 이므로

$$Q_D = aP_C + b$$

가 된다.

(5) C점에서 연료 소비량과 D점에서 연료 소비량의 차이를 구한다.

C점과 D점에서 연료 소비량의 차이는

$$Q_D - q_C$$

가 된다.

(6) 연료 소비량 예측식 (1)을 이용하여 A점과 같은 출력 수준의 정격 속도에서(그림 6에서 B점) 연료 소비량을 구한다.

식 (1)을 이용하여 Fig. 6의 출력 선도 DB에서 A점의 출력 수준에 해당하는 B점에서 연료 소비량  $Q_B$ 는,  $P_B = P_A$ 이므로

$$Q_B = aP_A + b$$

이다.

(7) B점에서 연료 소비량과 A점에서 연료 소비량의 차이는 C점에서 연료 소비량과 D점에서 연료 소비량의 차이와 같다는 사실을 적용하여 A점에서 소비량을 구한다.

A점에서 연료 소비량을  $q_A$ 라고 하면 A점과 B점에서 연료 소비량의 차이는  $Q_B - q_A$ 이다. 따라서,

$$Q_B - q_A = Q_D - q_C$$

이고,  $q_A$ 를 구하면

$$q_A = Q_B - Q_D + q_C = a(P_A - P_C) + s_1 n_C^2 + s_2 n_C + s_3$$

가 된다. 또는

$$q_A = s_1 n_C^2 + (s_2 - a a_p) n_C + s_3 + a a_p n_A \quad (5)$$

where,  $q_A$  = fuel consumption under partially loaded condition A, L/h

$n_A$  = ratio of engine speed to rated speed at partially loaded point A, decimal

$a$  = slope of power-fuel consumption curve at rated speed, L/kW/h

$a_p$  = slope of speed-power curve passing through point A and parallel to the speed-power curve between the rated and maximum speeds, kW

$n_C$  = engine speed at the intersection point between the speed-power curve at full load, and the speed-power curve passing through point A and parallel to the speed-power curve between the rated and maximum speeds, decimal

$s_1, s_2, s_3$  = coefficients of second order speed-fuel consumption curve at full load

이다. 즉 식 (5)는 OECD 시험 성적서에 제시된 전부하 및 정격 속도에서 측정된 연료 소비량 데이터를 이용하여 임의의 부분 부하 상태인 A점에서 연료 소비량을 추정할 수 있는 예측식이다.

### 3. 예측식의 검증

#### 가. 검증 대상 트랙터

개발한 연료 소비량 예측식의 유효성을 검증하기 위하여, OECD 시험 성적서 중 MF 7495 트랙터를 대상으로 실측 연료 소비량과 식 (1)과 (5)로써 예측한 연료 소비량을 비교하였다. 표 1은 MF 7495의 전부하 출력 상태와 정격 속도의 부분 부하 상태에서 측정된 속도, 출력, 연료 소비량 데이터이다.

#### 나. 정격 속도의 부분 부하 상태

표 1의 정격 속도에서 부분 부하 상태인 6개의 지점의 출력과 연료 소비량 데이터를 이용하여 구한 직선 회귀식은 다음과 같다.

$$Q = 0.2477P + 9.1883 \quad (6)$$

따라서 식 (1)의 상수 a와 b는 각각

$$a = 0.2477, \quad b = 9.1883$$

이 된다. 식 (6)을 이용하여 예측한 부분 부하 상태의 연료 소비량은 표 2에서와 같고, 실측 연료 소비량에 대한 예측 연료 소비량의 퍼센트 오차는 0.05~3.89% 범위이었다. 이는 예측식 (6)의 유효성을 인정하는 데 충분한 것이었다.

#### 다. 비정격 속도의 부분 부하 상태

전부하 상태에서 측정된 표 1의 출력과 연료 소비량을 속도비의 함수로서 나타내면 그림 8에서와 같다. 또한 속도-출력 선도의 2차 회귀식과 속도-연료 소비량 선도의 2차 회귀

**Table 1** Measured fuel consumption and power at full throttle for MF 7495 tractor

Load	Engine speed, rpm	speed ratio to rated speed	Power, kW	Fuel consumption, L/h
Full load	1000	0.45	74.30	21.36
	1100	0.50	82.50	22.44
	1200	0.55	90.50	24.36
	1300	0.59	97.70	26.64
	1320	0.60	99.60	27.024
	1400	0.64	107.20	28.56
	1500	0.68	109.50	31.92
	1600	0.73	118.20	32.76
	1700	0.77	122.60	33.48
	1800	0.82	125.30	34.44
	1900	0.86	125.70	36.11
	1980	0.90	125.14	36.89
	2000	0.91	125.00	37.08
	2034	0.92	124.40	37.96
2100	0.95	122.50	38.16	
Partial load at rated speed	2201	1.00	117.10	38.51
	2235	1.02	101.1	34.21
	2264	1.03	76.4	28.06
	2288	1.04	51.7	21.37
	2313	1.05	26.2	15.67
	2335	1.06	0	9.56

**Table 2** Measured and Predicted fuel consumptions at the rated speed of MF 7495 tractor

Engine speed, rpm	Power, kW	Fuel consumption, L/h		Percent error, %
		Measured	Predicted	
2201	117.10	38.51	38.19	0.82
2235	101.1	34.21	34.23	0.06
2264	76.4	28.06	28.11	0.19
2288	51.7	21.37	21.99	2.92
2313	26.2	15.67	15.68	0.05
2335	0	9.56	9.19	3.89

식 즉, 식 (3)과 (4)는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$P = -291n^2 + 512.5n - 101.3 \quad (7)$$

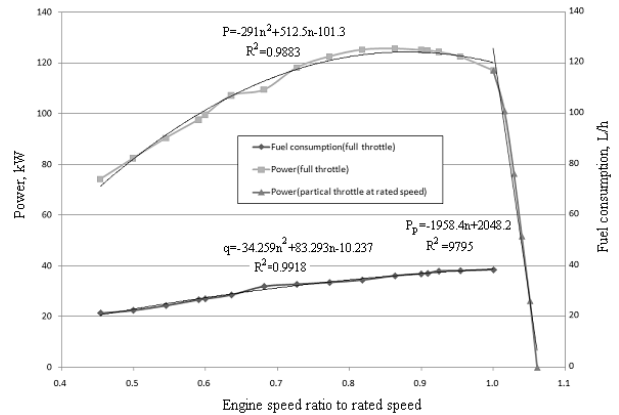
$$q = -34.259n^2 + 83.293n - 10.237 \quad (8)$$

따라서 식 (3)과 (4)의 상수는 각각

$$k_1 = -291, k_2 = 512.5, k_3 = -101.3$$

$$s_1 = -34.259, s_2 = 83.293, s_3 = -10.237$$

이 된다. 정격 속도와 최대 속도 사이의 출력은 속도에 비례하며, 속도-출력 선도의 1차 회귀식은  $P_p = -1958.4n + 2084.2$ 와 같다. 따라서 식 (2)의 기울기는  $a_p = -1958.4$ 가 된다.



**Fig. 8** Speed vs. power and fuel consumption at full load of MF 7495 tractor.

OECD 시험 성적서에서 연료 소비량이 측정된 그림 1의 점 1, 2, 3, 4의 속도비 및 출력을 각각  $(n_i, P_i) i = 1, 2, 3, 4$ 라고 하면

$$(n_1, P_1) = (0.9, 93.40 \text{ kW})$$

$$(n_2, P_2) = (0.9, 46.70 \text{ kW})$$

$$(n_3, P_3) = (0.6, 70.30 \text{ kW})$$

$$(n_4, P_4) = (0.6, 42.80 \text{ kW})$$

가 된다. 따라서 정격 속도와 최고 속도 사이의 속도-출력 선도에 평행하고 점 1을 지나는 속도-출력 선도는

$$P = a_p(n - n_1) + P_1 = -1958.4(n - 0.9) + 93.40 \quad (9)$$

이다. 식 (9)와 전부하 상태의 속도 출력 선도인 식 (7)이 교차하는 교점 C의 속도와 출력을 구하면 각각

$$\begin{aligned} n_C &= \frac{-(k_2 - a_p) + \sqrt{(k_2 - a_p)^2 - 4k_1(k_3 + a_p n_1 - P_1)}}{2k_1} \\ &= \frac{-(2470.9) + \sqrt{(2470.9)^2 - 4(-291)(-1957.36)}}{2(-291)} \\ &= 0.884 \\ P_C &= a_p(n_C - n_1) + P_1 \\ &= -1958.4(0.884 - 0.9) + 93.4 = 124.73 \text{ kW} \end{aligned}$$

이다. 식 (8)을 이용하여 C점의 연료 소비량을 구하면

$$\begin{aligned} & (-1958.4)(0.9) \\ & = 28.86 \text{ L/h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_C &= s_1 n_C^2 + s_2 n_C + s_3 = -34.259(0.884)^2 + 83.293(0.884) - 10.237 \\ & = 36.62 \text{ L/h} \end{aligned}$$

가 된다.

식 (6)을 이용하여 정격 속도에서 출력이 점 C의 출력과 같을 때 연료 소비량을 구하면

$$\begin{aligned} Q &= 0.2477P_C + 9.1883 = 0.2477(124.73) + 9.1883 \\ & = 40.084 \text{ L/h} \end{aligned}$$

이다. 따라서 점 C의 출력 상태에서 정격 속도와 정격 속도의 90%인 속도 사이의 연료 소비량 차이는

$$40.084 - 36.62 = 3.464 \text{ L/h}$$

가 된다. 또한 정격 속도에서 출력이 점 1의 출력과 같을 때 연료 소비량은

$$\begin{aligned} Q &= 0.2477P_1 + 9.1883 = 0.2477(93.4) + 9.1883 \\ & = 32.323 \text{ L/h} \end{aligned}$$

이다. 이제 점 1의 상태에서 예측 연료 소비량은

$$\begin{aligned} q_1 &= Q_B - Q_D + q_C = 32.323 - 40.084 + 36.62 \\ & = 28.859 \text{ L/h} \end{aligned}$$

가 되며, 식 (5)를 이용하면

$$\begin{aligned} q_1 &= s_1 n_C^2 + (s_2 - aa_p)n_C + s_3 + aa_p n_1 \\ &= (-34.259)(0.884)^2 + [83.293 - 0.2477 \\ & \quad (-1958.4)](0.884) - 10.237 + (0.2477) \end{aligned}$$

가 된다.

같은 방법으로 부분 부하점 2, 3, 4에서 예상되는 연료 소비량을 구하면 표 3에서와 같고, 실측 연료 소비량에 대한 예측 연료 소비량의 퍼센트 오차의 범위는 0.36~2.86%로서 정확도는 높은 편이었다. 따라서 본 연구에서 개발한 연료 소비량 예측식의 검증은 충분한 것으로 판단되었다.

#### 라. Grisso의 예측식과 비교

본 연구에서 사용한 트랙터 16대의 OECD 시험 성적서 중 Grisso의 예측식을 적용할 수 있는 성적서는 10대뿐이었다. 즉, 10대의 시험 성적서만 건인 성능 시험에서 측정한 연료 소비량 데이터를 제시하였다. 이 10대의 시험 성적서를 이용하여, 정격 속도 및 비정격 속도의 부분 부하 상태에서 Grisso의 예측식과 본 연구에서 개발한 예측식 (1)과 (5)가 예측한 연료 소비량과 같은 상태에서 실측한 연료 소비량을 비교하였다. 10대의 트랙터에 대한 시험 성적서의 측정 연료 소비량 데이터는 정격 속도의 부분 부하 상태에서는 60개, 비정격 속도의 부분 부하 상태에서는 40개이며, 각 측정치에 대한 예측치의 평균 퍼센트 오차 및 측정치와 예측치의 상관 계수는 표 4에서와 같다. 표 4에서와 같이 정격 속도의 부분 부하 상태에서 Grisso의 예측식이 예측한 연료 소비량의 퍼센트 오차는 5.05%로서 본 연구에서 개발한 예측식의 1.04%보다 4.01% 높았으며, 비정격 속도의 부분 부하 상태에서는 10.71% 높았다. 즉, 본 연구에서 개발한 예측식이 Grisso의 예측식보다 예측 정확도가 높은 것으로 나타났다. 이는 Grisso의 예측식이 건인 성능 시험에서 측정한 연료 소비량 데이터만을 이용한 데 비하여 본 연구에서 개발한 예측식은 전부하 상태 및 정격 속도의 부분 부하 상태에서 측정한 연료 소비량 데이터를 이용하였기 때문에 보다 광범위한 운전 영역의 연비 특성을 반영하였기 때문인 것으로 판단된다.

**Table 3** Predicted fuel consumptions and percent errors at non-rated speeds with partial loads for MF 7495 tractor

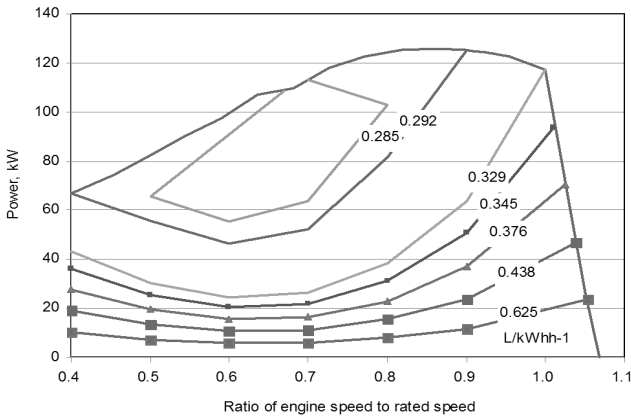
Load point, i	Measured			Predicted		
	$n_i$ ratio to rated speed	$P_A$ , power kW	Fuel consumption, L/h	$n_C$ , ratio to rated speed	Fuel consumption, L/h	Percent error
1	0.9	93.40 (80% of rated power)	28.65	0.884	28.86	0.74
2	0.9	46.70 (40% of rated power)	16.19	0.860	16.65	2.86
3	0.6	70.30 (60% of rated power)	19.56	0.585	19.49	0.36
4	0.6	42.80 (40% of rated power)	13.49	0.573	13.14	2.56

**Table 4** Comparison of percentage errors by the developed and Grisso models

Main PTO test	Partial load at rated speed		Partial load at non-rated speed	
	Coefficient of correlation	Average percent error	Coefficient of correlation	Average percent error
Developed model	0.9998	1.04	0.9987	4.27
Grisso model	0.9975	5.05	0.9831	14.98

**마. 셸 선도**

그림 9는 개발된 예측식을 이용하여 구한 MF 7495 트랙터의 등연료 소비율 선도를 출력과 정격 속도에 대한 엔진 속도의 비로서 나타낸 셸 선도이다. 본 연구에서 개발된 예측식은 OECD 트랙터 시험 성적서에서 제시한 연료 소비량 데이터를 이용하여 임의의 부분 부하 상태에서 예상되는 연료 소비량 예측뿐만 아니라 등연료 소비율 선도를 제작하는 데에도 유용하게 활용할 수 있다.



**Fig. 9** Contour of equal specific fuel consumption for MF 7495 tractor.

**4. 요약 및 결론**

본 연구는 임의의 부분 부하 상태에서 트랙터의 연료 소비량을 예측할 수 있는 모형을 개발하기 위하여 수행되었다. 국내에서 수행한 143대의 트랙터 시험 성적서와 16대의 OECD 트랙터 시험 성적서의 연료 소비량 데이터를 분석하여 임의의 부분 부하 조건에서 연료 소비량을 예측할 수 있는 예측식을 개발하고 예측식의 유효성을 검증하였다. 예측식은 전 부하 상태와 정격 속도의 부분 부하 상태에서 측정된 연료 소비량 데이터를 이용하여 개발하였다.

본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 정격 속도의 부분 부하 상태에서 연료 소비량은 출력에 비례한다.
- (2) 전부하 상태에서 출력과 연료 소비량은 정격 속도에 대한 엔진 속도비의 2차 함수로서 나타낼 수 있다.

- (3) 속도 차이에 의한 연료 소비량의 차이는 출력의 영향을 받지 않는다.
- (4) 이상의 결과를 이용하여 개발한 부분 부하 상태의 연료 소비량 예측식은 다음과 같다.

$$q_A = s_1 n_C^2 + (s_2 - a a_p) n_C + s_3 + a a_p n_A$$

where,  $q_A$  = fuel consumption under partially loaded condition A, L/h

$n_A$  = ratio of engine speed to rated speed at partially loaded point A, decimal

$a$  = slope of power-fuel consumption curve at rated speed, L-kW/h

$a_p$  = slope of speed-power curve passing through point A and parallel to the speed-power curve between the rated and maximum speeds, kW

$n_C$  = engine speed at the intersection point between the speed-power curve at full load, and the speed-power curve passing through point A and parallel to the speed-power curve between the rated and maximum speeds, decimal

$s_1, s_2, s_3$  = coefficients of second order speed-fuel consumption curve at full load

- (5) 부분 부하 상태에서 예측한 연료 소비량의 퍼센트 오차는 0.36~2.86% 범위이었으며, 이는 개발한 예측식의 유효성을 인정하는 데 충분한 것이었다.
- (6) 본 연구에서 개발한 연료 소비량 예측식은 Grisso의 예측식보다 정확도가 높았다.
- (7) 개발된 연료 소비량 예측식과 OECD 트랙터 시험 성적서의 연료 소비량 데이터를 이용하여 등연료 소비율 선도를 작성할 수 있다.

**사 사**

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313- D01344)



## 참 고 문 헌

1. CEMAGREF. 2006a. OECD Performance Test of an Agricultural Tractor No. 15270. Groupement d'Antony Parc de tourvoie, BP 44, 92163 Antony cedex, France.
2. CEMAGREF. 2006b. OECD Performance Test of an Agricultural Tractor No. 15291. Groupement d'Antony Parc de tourvoie, BP 44, 92163 Antony cedex, France.
3. Central Farm Machinery Training & Test Institute. 2007. Report on Test in Accordance with OECD STANDARD CODE 2 for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractors No. T-589/1090/14/OECD, Central Farm Machinery Training & Test Institute, Budni-466, 455 MP, India.
4. COTTEC. 2005a. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 200505. China Official Tractor Test and Evaluation Center, Luoyang, Henan, China
5. COTTEC. 2005b. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 200506. China Official Tractor Test and Evaluation Center, Luoyang, Henan, China.
6. COTTEC. 2005c. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 200507. China Official Tractor Test and Evaluation Center, Luoyang, Henan, China.
7. COTTEC. 2005d. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 200508. China Official Tractor Test and Evaluation Center, Luoyang, Henan, China.
8. COTTEC. 2007. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 200701, China Official Tractor Test and Evaluation Center, Luoyang, Henan, China.
9. COTTEC. 2008. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 200704. China Official Tractor Test and Evaluation Center, Luoyang, Henan, China.
10. DLG-Testing Station for Agricultural Machinery. 2005a. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 2004-006. DLG Testing Station for Agricultural Machinery. Max-Eyth-Weg 1 D-64823 Gross-Umstadt, Germany.
11. DLG-Testing Station for Agricultural Machinery. 2005b. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 2004-007. DLG Testing Station for Agricultural Machinery. Max-Eyth-Weg 1 D-64823 Gross-Umstadt, Germany.
12. DLG-Testing Station for Agricultural Machinery. 2005c. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 2004-008. DLG Testing Station for Agricultural Machinery. Max-Eyth-Weg 1 D-64823 Gross-Umstadt, Germany.
13. Grisso, R. D., Roberson, G. T. and Vaughan, D. H. 2006. Method for fuel prediction for specific tractor models. ASABE Paper No. 061089. ASABE St. Joseph, Michigan, USA.
14. Jazar, R. N. 2008. Vehicle Dynamics, Theory and Applications. Springer Science+Business Media, LLC., New York, NY USA.
15. Nebraska Tractor Test Laboratory. 2006. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code 2 for the Official Testing of Agricultural Tractors No. 1861. Nebraska Tractor Test Laboratory, Lincoln Nebraska, USA.
16. NIAE. 2000~2007. Agricultural Machinery Test Report. National Institute of Agricultural Engineering. Suwon, Korea.
17. NIAE. 2007a. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 06-M-5-16. National Institute of Agricultural Engineering, Suwon, Korea.
18. NIAE. 2007b. Report on Test in Accordance with the OECD Standard Code for the Official Testing of Agricultural Tractor Performance No. 05-M-5-5. National Institute of Agricultural Engineering, Suwon, Korea.
19. OECD. 2008. Standard code 2 The Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance. OECD, Paris, France.
20. Silsoe Research Institute. 2005. OECD Restricted Standard Code for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance No. 2003-6648. Silsoe Research Institute, West Park silsoe MK45 4HS, UK.