

## ENGINEERING

# Development of simulation model for fuel efficiency of agricultural tractor

Wan-Soo Kim<sup>1</sup>, Yong-Joo Kim<sup>1</sup>, Sun-Ok Chung<sup>1</sup>, Dae-Hyun Lee<sup>1\*</sup>, Chang-Hyun Choi<sup>2</sup>, Young-Whan Yoon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>Department of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Gyeonggi 16419, Korea

<sup>3</sup>J&F Solution, Shinbanporo23gil 41, Seocho, Seoul 06509, Korea

\*Corresponding author: leedh18m@naver.com

## Abstract

The objective of this study is to predict the fuel efficiency of an agricultural tractor. The fuel efficiency of the tractor during rotary tillage was predicted using numerical modeling. A numerical model was developed using Simulation X. Based on tractor power flow, numerical modeling consisted of an engine, transmission, PTO (power take off), and hydraulics. The specifications of major components utilized in the numerical model were the same as those of a 71 kW tractor (field test tractor). The load that was inputted for fuel efficiency prediction into the simulation model was obtained from a field test. Fuel efficiency predictions were conducted by comparing field test results and simulation results. In addition, it was performed by dividing the rotary tillage and steering section. Main results are as follows: first, t-values of engine torque were measured to be 0.31 in the rotary tillage and 0.92 in the steering section. Second, t-values of fuel consumption were measured to be 0.51 and 5.41 in the rotary tillage and the steering section, respectively. Finally, t-values of fuel efficiency were measured to be 1.72 and 40 in the rotary tillage and the steering section, respectively. The results show no significant differences with t-values of less than 5% in the rotary tillage. But, it shows significant differences in the steering section. Therefore, simulation for accurate fuel efficiency prediction requires a suitable algorithm or detailed design of the simulation model in the steering section.

**Keywords:** agricultural tractor, fuel efficiency, rotary tillage, simulation x

## Introduction

트랙터는 국내 농업기계 중 86% (243,531 대)로 대부분을 차지하고 있으며, 유류 사용량은 345,000 kL로 난방기 다음으로 가장 높아 트랙터의 고효율화 및 연비 향상에 대한 기술 개발 필요성이 지속적으로 증대되고 있다(Kim et al., 2011).

고효율 트랙터 개발을 위해서는 연비의 정확한 평가가 필요하며, 이를 위한 방법으로 현재는 대부분 다이내모미터를 이용한 전부하 시험과 필드 테스트를 이용하고 있다(Kim et al.,



## OPEN ACCESS

**Citation:** Kim WS, Kim YJ, Chung SO, Lee DH, Choi CH, Yoon YH. 2016. Development of simulation model for fuel efficiency of agricultural tractor. Korean Journal of Agricultural Science 43:116-126.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.7744/kjoas.20160014>

**Editor:** Kee Woong Park, Chungnam National University, Korea

**Received:** December 23, 2015

**Revised:** February 23, 2016

**Accepted:** February 25, 2016

**Copyright:** ©2016 Korean Journal of Agricultural Science.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution Non-Commercial License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2015a). 전부하 시험은 최대 부하일 때를 기준으로 테스트하는 방식으로, 실제 트랙터 작업 조건의 반영이 어려우며, 필드 테스트의 경우 실제 작업을 통해 수행되지만 높은 비용과 시간, 인력 소모가 발생된다는 단점이 있다(Lee et al., 2015b). 따라서 기존 방식의 문제 해결이 가능한 연비 평가 방안이 필요한 실정이다(Andre, 2004; Yoon, 2012a). 최근 자동차와 건설기계 분야에서는 CAE (Computer Aided Engineering)라 불리는 시뮬레이션 해석 기술을 이용하여 차량의 성능을 사전에 평가하고 있다(Kim et al., 2010a; Kim et al., 2015b). 시뮬레이션을 이용한 성능평가는 차량을 대상으로 다양하게 활용되고 있으며(Kim et al., 2012; Kim et al., 2015c), 주로 개발 기술의 성능을 예측하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 주요 연구로, Shin 등(2015)은 자동차의 연비 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 시뮬레이션 모델을 이용하여 예측된 연비와 실도로 기반의 실차 연비와의 연비 분석을 실시한 결과 약 94%의 정확도를 나타냈다고 보고하였다. Lyu 등(2008)은 연비 개선을 위한 엔진 매핑 및 터보차저 개선안에 대해 연비 시뮬레이션을 시행하였다. 연비 시뮬레이션(V-SIM)은 자동차를 대상으로 연비 예측을 실시하였으며, 필드 시험 데이터와의 비교 분석을 통해 검증하였다. 이때, 검증 결과는 필드 시험 결과와 0.2%의 오차 범위 내로 나타났다고 보고하였다. Song 등(2009)은 자동차의 연비 특성을 포함한 전 차량 모델 기반의 상용 소프트웨어인 AVL사 Cruise를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 다양한 주행 상황과 자동차의 가속 특성 및 운전자 패턴을 조건으로 실시하였으며, 과도 구간의 엔진 성능 제어를 통해 연비 향상을 기대할 수 있을 것이라고 보고하였다.

트랙터는 자동차와 달리 주행 목적이 아닌 작업을 위한 차량이며, 주로 포장 시험지에서의 실차 시험을 통한 평가가 이루어지고 있다. 이에 대한 주요 연구로는, Park 등(2010b)은 트랙터 경운정지(쟁기, 로타리, 무논정지) 작업의 PTO 출력과 연료 소모량을 실차 테스트를 통해 측정하고 OECD 트랙터 시험기준과 비교하여 OECD 시험기준이 우리나라 트랙터 에너지 소비 효율 등급을 측정하는데 이용 가능한지 고찰하였다. Kim 등(2010b)은 트랙터의 연료 소비량을 예측할 수 있는 모델을 개발하여 엔진의 전부하 상태 및 정격 속도의 부분 부하 상태에서 측정된 연료 소비량 데이터와 그 특성을 이용하여 임의의 부분 부하 상태에서 예상되는 연료 소비량을 추정할 수 있는 이론식을 개발하고 유효성을 입증하였다. Park 등(2010a)은 경운정지 작업을 통하여 트랙터 농작업 부하를 계측하고, 트랙터 성능곡선을 이용하여 연료 소모량과 CO<sub>2</sub>의 상관관계를 분석하였다. 이때, 분석은 농작업 및 토양 종류에 따른 트랙터 출력, 연료 소모량 및 CO<sub>2</sub> 배출 특성에 대해 실시하였으며, 연료소비율과 CO<sub>2</sub> 배출량은 매우 유사한 경향을 나타낸다고 보고하였다. 최근 일부 트랙터 연구에서는 MATLAB/Simulink를 이용한 시뮬레이션 모델 개발에 관한 연구를 실시하였으나, 아직까지 연비 예측 시뮬레이션에 관한 연구개발은 미비한 실정이다(Yu et al., 2013).

따라서 본 연구는 시뮬레이션을 이용한 트랙터의 연비 예측을 위한 기초연구로써 기계식 변속기가 탑재된 트랙터 시뮬레이션 모델을 개발하고, Lee 등(2015a)의 로타리 부하 데이터를 이용하여 로타리 작업 시 작업구간에 따른 연비를 예측하였다.

## Materials and Methods

### 시뮬레이션 모델 개발

트랙터 시뮬레이션 모델은 Fig. 1과 같이 트랙터 동력전달계의 주요 구성요소인 엔진, 변속기, PTO, 주 유압, 보조 유압을 이용하여 구성하였으며, 동력 흐름은 엔진으로부터 발생되어 포장 부하에 따라 기어를 조정하여 작업 속도를 결정하는 변속기, 작업기에 동력을 제공하는 PTO (Power take-off), 작업기 승하강을 위한 3점 히치를 작동하는 주 유압장치, 조향 및 운행을 위한 보조 유압장치로 분기된다. 이때 시뮬레이션 모델은 복합적인 시스템의 물리적 작용에 대한 모델링, 해석 및 분석이 가능한 Simulation X (Version 3.6, ITI GmbH, German)를 사용하였다(Yoon et al., 2012b).

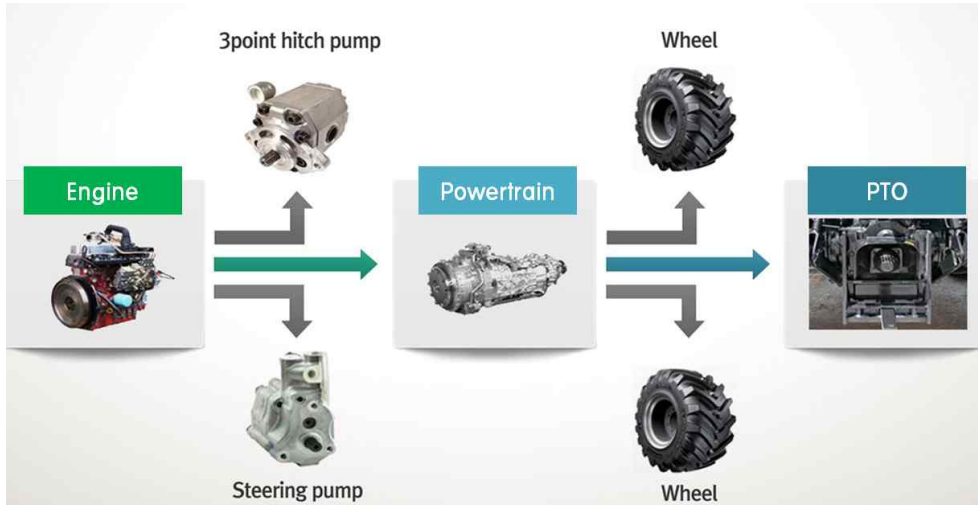


Fig. 1. Schematic diagram of tractor power flow.

트랙터 시뮬레이션 모델은 엔진 모델, 변속기 모델, PTO 모델, 유압 모델과 같은 주요 부품 모델의 개발 후에, 동력전달구조를 기반으로 연결함으로써 Fig. 2와 같이 개발하였다. 이때, 시뮬레이션 모델은 71 kW 급 트랙터 (L7040, LSMtron, Korea)의 제원을 이용하였으며, 필드 테스트에서 계측된 부하 조건을 입력하여 최종적으로 엔진의 부하를 계산하도록 개발하였다. 변속기는 클러치 및 변속부로 구성하였으며 변속부는 전/후진, 주변속, 부분속 총 3개로 구성하였다. PTO는 클러치 및 변속부로 구성하였다. 주/보조 유압부는 트랙터 3점 히치 제어를 위한 주 유압부와 트랙터 조향 제어를 위한 보조 유압부로 구성하였다.

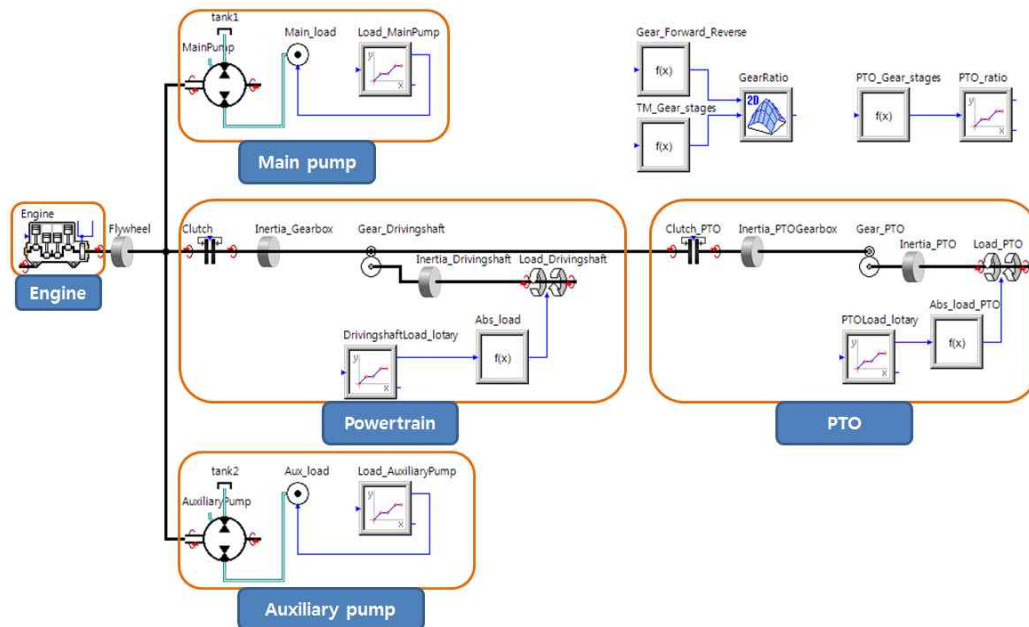


Fig. 2. Simulation model of agricultural tractor.

### 엔진 모델

엔진 모델은 71 kW급 트랙터에서 사용되는 엔진의 엔진 맵을 이용하였으며, 엔진 모델의 입력 파라미터는 최대

스로틀 열림량, 초기 엔진 회전수 800 rpm, 실린더 개수 4개로 설정하였다. 이때, 엔진 맵은 Fig. 3과 같이 정격인 2300 rpm에서는 엔진토크 241.0 Nm, 연비 274.7 g/kWh를 나타내었으며, 1100rpm에서는 최대 토크 366.5 Nm, 1300rpm에서는 최소 연비 233.5 g/kWh를 나타내었다.

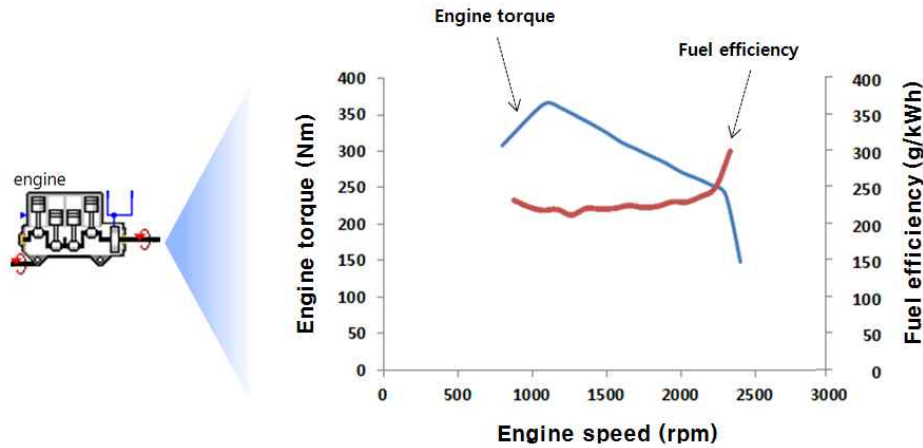


Fig. 3. Engine map of tractor used.

### 변속기 모델

변속기 모델은 Fig. 4와 같이 실제 트랙터와 동일하게 플라이휠, 관성모멘트, 클러치, 차축 기어, 차축 기어비 파트(GearRatio), 차축 부하 입력 파트(Drivingshaft Load Input)로 구성하였다. 변속기 모델은 변속기 축의 물성 적용을 위해 플라이휠, 차축 기어박스, 관성모멘트, 차축 관성모멘트의 관성모멘트를 각각  $0.7 \text{ kg m}^{-2}$ ,  $0.1 \text{ kg m}^{-2}$ ,  $0.5 \text{ kg m}^{-2}$ 로 설정하였으며, 변속기 클러치는 건식 단판 마찰 클러치로 설정하였다. 기어는 기어비 파트에서 전후진 및 기어단수에 따라 선정된 기어비를 이용하여 입력축으로 들어온 동력을 계산하여 구동륜으로 전달한다. 이때, 기어비 파트는 단순 기어 모델에 단수 별 기어비 적용을 위해 2D Map을 이용하여 주변속 및 부변속 조합으로 구성하였다. 차축 부하 입력 파트는 로타리 필드 테스트에서 측정된 차축 부하 데이터를 입력하여 구성하였다.

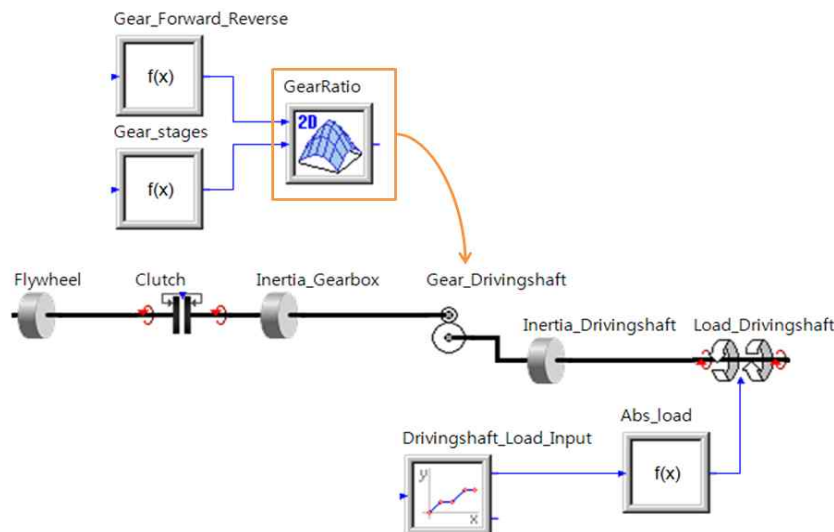


Fig. 4. Powertrain model.

차축속도는 트랙터 작업부하에 따라 작업 속도를 조절할 수 있도록 엔진속도와 기어비를 이용하여 식(1)과 같이 계산하였다(Ryu et al., 2004).

$$N_a = \frac{N_e}{G_{pt}} \quad (1)$$

Where  $N_a$ : Axle speed, rpm

$N_e$ : Engine speed, rpm

$G_{pt}$ : Transmission gear ratio( $G_T$ )  $\times$  Differential gear ratio( $G_D$ )  $\times$  Final drive ratio( $G_{FD}$ )

### PTO 모델(Power take-off)

PTO 모델은 실제 트랙터와 동일하게 Fig. 5와 같이 클러치, 관성모멘트, PTO 기어, PTO 기어비 파트(PTO ratio), PTO 부하 입력 파트(PTO Load Input)로 구성하였다. PTO 모델은 변속기 클러치와 별도로 독립된 동력취출축 전용 클러치를 설치하여, 트랙터의 주행과 정지에 관계없이 동력취출축으로 동력을 전달하거나 차단할 수 있는 형식의 독립형 PTO를 선정하였다. 클러치는 다판 습식 클러치를 사용하였으며, PTO 기어박스 관성모멘트와 PTO 축 이용하여, 입력축의 동력을 계산하여 출력축으로 내보낸다. 이때, 기어비는 총 3단으로 구성하였다. PTO 부하 입력 파트는 로타리 필드 테스트에서 측정된 PTO 부하 데이터를 입력하여 구성하였다.

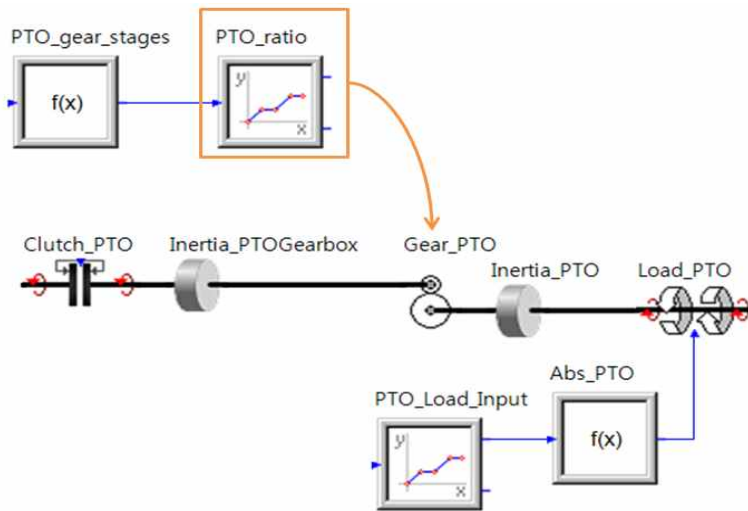


Fig. 5. PTO model.

### 유압 모델

유압 모델은 작업기의 승강, 하강을 위한 주 유압부와 조향 제어를 위한 보조 유압부로 이루어져있으며, 각각은 Fig. 6과 같이 유압펌프(Pump)와 펌프 부하 입력 파트(Pump Load Input)로 구성하였다. 이때, 유압펌프는 사판각 제어를 통해 배제용적을 바꾸어주어 속도 및 방향 제어를 가능하게 하는 가변형으로 선정하였으며, 펌프 부하 입력 부는 로타리 필드 테스트에서 측정된 펌프 부하 데이터를 입력하여 구성하였다. 유압펌프의 주요 입력 값으로는 최대 압력 20.6 MPa, 주 유압 배제용적 12 cc/rev, 보조 유압 배제용적 6 cc/rev로 설정하였다. 또한, 부하 입력 파트는 로타리 필드 테스트에서 측정된 유압 부하 데이터를 입력하여 구성하였다.

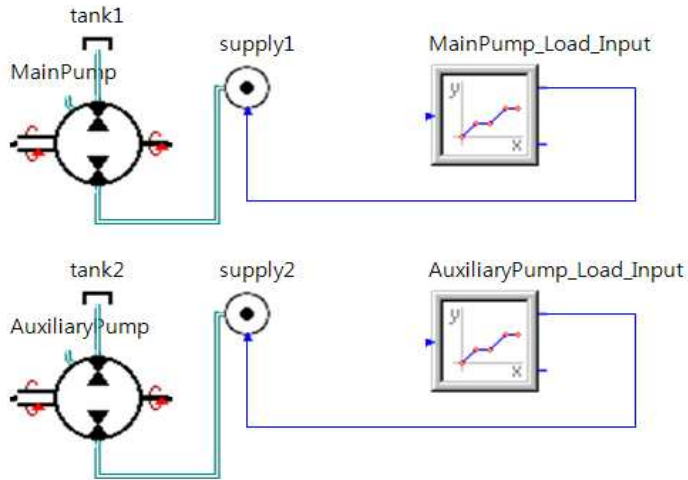


Fig. 6. Hydraulics pump model.

## 시뮬레이션 방법

트랙터의 연비 시뮬레이션은 작업 시 부하가 가장 많이 발생하는 로타리 작업을 대상으로 실시하였다. 이때, 필드 데이터는 본 연구 트랙터 사양과 가장 근접한 조건에서 시험을 수행한 Lee 등(2015a)의 시험 결과를 활용하였다. 필드 데이터는 총 8개의 로타리 작업 데이터를 포함하고 있으며, 이 중 4개의 필드 데이터 set은 시뮬레이션 모델 개발에 사용하였고, 나머지 4개의 set은 시뮬레이션 모델의 검증용(Validation)으로 사용하였다. 이때, 하나의 데이터 set은 각각 작업 구간과 선회 구간으로 나누어 평가하였다.

시뮬레이션은 실제 로타리 작업과 동일하도록 엔진 Full throttle, 변속단수 3단으로 설정하였다. 트랙터 연비 평가는 시뮬레이션 모델을 이용한 결과 데이터와 검증용 데이터의 토크, 연료 소모량, 연비를 비교하였다. 이때, 연비는 엔진 토크와 연료 소모량을 이용하여 식 (2)와 같이 계산하였다. 연비 예측을 위한 엔진 동력은 변속기 및 PTO 입력축, 메인 및 보조 유압장치에 각각 인가되는 동력의 합으로 계산하였다(Ryu et al., 2004; Kim, 2004). 변속기 입력축 및 PTO 입력축의 동력은 토크와 회전수를 이용하여 계산하였으며, 주/보조 유압 장치 소요동력은 유압 펌프의 토출 압력, 유량, 체적 효율을 이용하여 계산하였다. 시뮬레이션 모델은 통계분석 프로그램인 SAS 9.4 (Statistical Analysis System Institute Inc., 2002)를 이용하여 T-test를 실시하였으며, 유의수준 0.05를 기준으로 평가하였다.

$$F_e = \frac{F_c}{P_t} \quad (2)$$

Where  $F_e$ : Fuel efficiency, kg/kWh

$F_c$ : Fuel consumption, kg/h

$P_t$ : Total engine power, kW

## Results and Discussion

### 엔진 토크



엔진 토크는 Fig. 7과 같이 로타리 작업 구간과 선회 구간으로 구간을 나누어 필드테스트와 시뮬레이션 결과 데이터 비교를 실시했다. 필드테스트와 시뮬레이션 비교 결과 엔진 토크는 로타리 작업 구간에서는 약 120–250 Nm, 선회 구간에서는 약 50–200 Nm로 유사한 범위를 보였다.

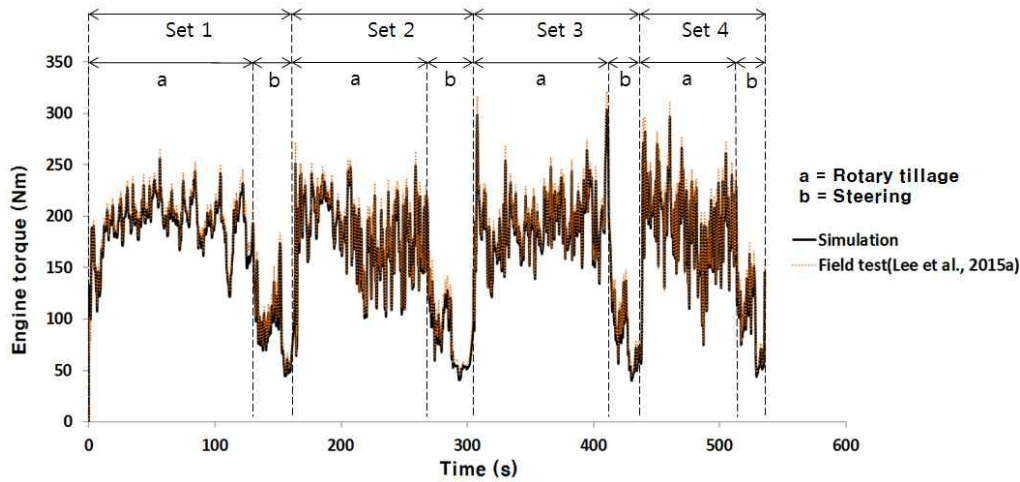


Fig. 7. Comparison for engine torque of field test and simulation results.

엔진 토크는 Table 1과 같이 로타리 작업 구간에서 시뮬레이션 결과 최대 296.59 Nm, 평균 190.11 Nm, 표준편차 34.16 Nm를 보였으며, 필드 테스트 결과 최대 310.96 Nm, 평균 195.62 Nm, 표준편차 35.83 Nm를 보였다. 선회 구간에서는 시뮬레이션 결과 최대 312.21 Nm, 평균 135.70 Nm, 표준편차 60.03 Nm를 보였으며, 필드 테스트 결과 최대 328.74 Nm, 평균 143.39 Nm, 표준편차 61.67 Nm를 보였다. T-test 분석결과 작업 구간에서 t-value는 0.31로 나타났으며, 선회 구간에서의 t-value는 0.92로 나타나는 것을 보아 두 구간에서의 시뮬레이션 결과 값과 필드테스트에서 측정된 값의 평균에 유의한 차이가 없음을 확인하였다. 이에 따라 본 시뮬레이션 모델은 로타리 작업 시 모든 구간에서 엔진 토크의 예측이 가능함을 알 수 있다.

Table 1. Results engine torque of simulation model.

		Field test		Simulation		t-value
		Max	Avg±Std	Max	Avg±Std	
Engine torque (Nm)	Rotary tillage	310.96	195.62±35.83	296.59	190.11±34.16	0.31
	steering	328.74	143.39±61.67	312.21	135.70±60.03	0.92

\*  $p < .05$

## 연료 소모량

엔진의 연료 소모량은 Fig. 8과 같이 나타났으며, 로타리 작업 구간과 선회 구간으로 구간을 나누어 필드테스트와 시뮬레이션 결과 데이터 비교를 실시했다. 필드테스트와 시뮬레이션 비교 결과 로타리 작업 구간에서는 약 13–15 kg/h로 유사한 범위를 보였으나, 선회 구간에서는 약 3–15 kg/h의 범위로, 큰 오차를 나타냈다. 이때, 연료 소모량 그래프는 엔진 토크 그래프와 비교해 보았을 때, 엔진 토크가 낮아지는 구간에서 연료 소모량이 감소하며, 엔진 토크가 증가하는 구간에서 연료 소모량이 증가하는 것으로 보아 비례 관계인 것을 알 수 있었으며 전반적인 경향이 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

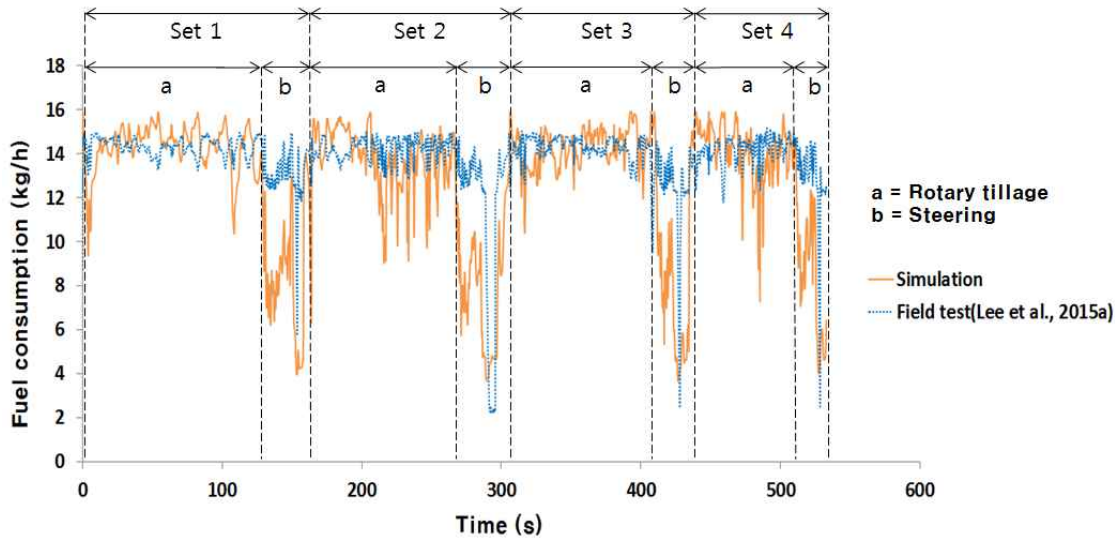


Fig. 8. Comparison for fuel consumption of field test and simulation results.

연료 소모량은 로타리 작업에서 Table 2와 같이 시뮬레이션 결과 최대 15.92 kg/h, 평균 14.04 kg/h, 표준편차 1.31 kg/h를 보였으며, 필드 테스트에서는 최대 15.26 kg/h, 평균 14.19 kg/h, 표준편차 0.67 kg/h를 보였다. 선회 작업에서는 시뮬레이션 결과 최대 15.92 kg/h, 평균 10.50 kg/h, 표준편차 3.59 kg/h를 보였으며, 필드 테스트에서는 최대 15.77 kg/h, 평균 13.20 kg/h, 표준편차 1.88 kg/h를 보였다. T-test 분석결과 작업 구간에서 t-value는 0.51, 선회 구간에서는 5.41로 나타났다. 작업 구간에서는 시뮬레이션 결과 값과 필드테스트에서 측정된 값의 평균에 유의한 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 선회 구간에서는 t-value는 높게 나타나며 일부 오차가 있는 것을 확인할 수 있었다. 오차 발생 원인은 선회작업 시 작업기 제어 및 속도 제어 등과 같은 작업자의 운전조작에 따라 영향을 많이 받기 때문으로 판단된다.

Table 2. Results fuel consumption of simulation model

		Field test		Simulation		t-value
		Max	Avg±Std	Max	Avg±Std	
Fuel consumption (kg/h)	Rotary tillage	15.26	14.19±0.67	15.92	14.04±1.31	0.51
	steering	15.77	13.20±1.88	15.92	10.50±3.59	5.41*

\*  $p < .05$

## 연비

연비는 로타리 작업 구간과 선회 구간으로 나누어 평가한 결과 Fig. 9와 같다. 작업 구간에서는 시뮬레이션 결과 0.30 kg/kWh, 필드테스트 결과 0.33 kg/kWh으로 유사한 결과를 보였으나, 선회 구간에서는 시뮬레이션 결과 0.32 kg/kWh, 필드테스트 결과 0.50 kg/kWh의 결과를 보이며, 일부 오차가 있는 것으로 나타났다.

연비는 로타리 작업에서 Table 3과 같이 시뮬레이션 결과 최대 0.34 kg/kWh, 평균 0.30 kg/kWh, 표준편차 0.02 kg/kWh를 보였으며, 필드 테스트에서는 최대 0.75 kg/kWh, 평균 0.33 kg/kWh, 표준편차 0.06 kg/kWh를 보였다. 선회작업에서는 시뮬레이션 결과 최대 0.35 kg/kWh, 평균 0.32 kg/kWh, 표준편차 0.02 kg/kWh를 보였으며, 필드 테스트에서는 최대 1.51 kg/kWh, 평균 0.50 kg/kWh, 표준편차 0.24 kg/kWh를 보였다. T-test 분석 결과 작업 구간에서의 t-value는 1.72로 나타나, 시뮬레이션 결과 값과 필드테스트에서 측정된 값의 평균에 유의



한 차이가 없음을 확인했다. 선회 구간에서는 연료 소모량과 동일한 원인으로 큰 오차를 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 오차 발생의 원인으로서는 선회작업 시 작업자 운전패턴에 따라 연비 차이가 발생하는 것을 시뮬레이션 프로그램에서 반영하기 어렵기 때문으로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 선회 구간의 오차를 개선하기 위해 적합한 알고리즘 개발 및 시뮬레이션 모델의 상세설계 등의 연구를 진행할 계획이다.

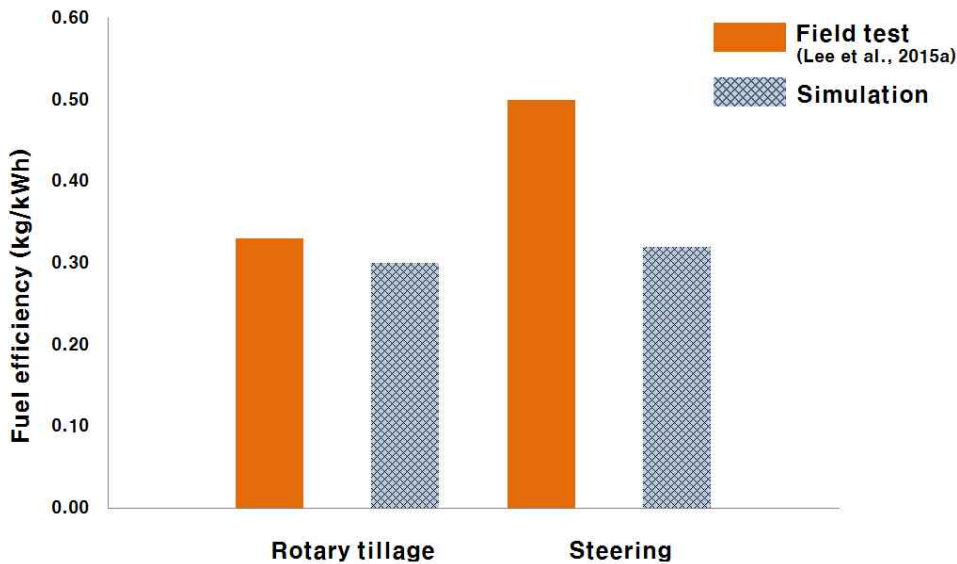


Fig. 9. Performance evaluation of the fuel efficiency.

Table 3. Results fuel efficiency of simulation model.

		Field test		Simulation		t-value
		Max	Avg±Std	Max	Avg±Std	
Fuel efficiency (kg/kWh)	Rotary tillage	0.75	0.33±0.06	0.34	0.30±0.02	1.72
	steering	1.51	0.50±0.24	0.35	0.32±0.02	40*

\* p < .05

## Conclusion

본 연구는 트랙터 연비 예측 가능성을 평가하기 위하여 상용프로그램인 Simulation X를 사용하여 트랙터 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발한 시뮬레이션 모델에 필드 테스트에서 측정된 데이터를 입력하여 연비를 예측하고, 실제 포장시험에서 측정된 부하 및 연료 소모량 데이터와의 비교 분석을 실시하였다. 또한 작업 구간과 선회 구간을 나누어 비교함으로써 작업 구간에서는 시뮬레이션 모델이 실제 작업 환경을 잘 반영하는 것을 확인할 수 있었으나, 선회 구간에서는 일부 오차가 생기는 것을 확인할 수 있었다. 주요 결과를 요약하자면 다음과 같다.

1) 시뮬레이션 모델은 트랙터 엔진, 차축, PTO, 주/보조 유압부로 구성하였다. 각각의 단품 모델을 설계 한 후 트랙터의 동력 전달 구조를 기반으로, 각 단품 모델을 연결하여 전체 트랙터 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 각 단품 모델에는 필드 테스트에서 측정된 부하 데이터를 입력하여 시뮬레이션 모델을 실제 트랙터 환경과 동일하게 재현하고자 하였다.

2) 엔진 토크의 평균 값은 로타리 작업에서 시뮬레이션 결과 190.11 Nm, 필드 테스트 결과 195.62 Nm로 나타났다. 선회 구간에서는 시뮬레이션 결과 135.70 Nm, 필드 테스트 결과 143.39 Nm로 로타리 작업 구간과 유사

하게 나타났다. T-test 분석결과 작업 구간에서의 t-value는 0.31 선회 구간에서는 0.92로, 두 구간에서 시뮬레이션 결과 값과 필드테스트에서 측정된 값의 평균에 유의한 차이가 없음을 확인하였다.

3) 연료 소모량의 평균 값은 로타리 작업에서 시뮬레이션 결과 14.04 kg/h, 필드 테스트 결과 14.19 kg/h로 유사하게 나타났으며, 선회 구간에서는 시뮬레이션 결과 10.50 kg/h, 필드 테스트 결과 13.20 kg/h로 일부 오차를 보였다. T-test 분석결과 작업 구간에서의 t-value는 0.51, 선회 구간에서는 5.41로 나타났다. 작업 구간에서는 시뮬레이션 결과 값과 필드테스트에서 측정된 값의 평균에 유의한 차이가 없음을 확인할 수 있었으나, 선회 구간에서는 일부 오차가 있는 것으로 나타났다.

4) 연비의 평균 값은 로타리 작업에서 시뮬레이션 결과 0.30 kg/kWh, 필드테스트 결과 0.33 kg/kWh로 유사한 결과를 보였으나, 선회 구간에서는 시뮬레이션 결과 0.32 kg/kWh, 필드테스트 결과 0.50 kg/kWh의 결과를 보이며, 일부 오차가 있는 것으로 나타났다. T-test 분석결과 작업 구간에서의 t-value는 1.72로 시뮬레이션 결과 값과 필드테스트에서 측정된 값의 평균에 유의한 차이가 없음을 확인했다. 하지만, 선회 구간에서의 t-value는 높게 나타났다.

5) 본 연구의 연료 소모량 및 연비의 오차 발생 원인은 선회작업 시 작업자 운전패턴을 반영하기 어렵기 때문으로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 선회 구간의 오차를 개선하기 위한 적합한 알고리즘 개발 및 시뮬레이션 모델의 상세설계 등의 연구를 진행할 계획이다.

## Acknowledgements

본 연구는 농림축산식품부 농림축산연구센터지원사업(과제번호: 714002-07)에 의해 이루어진 것임.

## References

- Andre M. 2004. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of The Total Environment* 334-335:78-84.
- Kim DJ. 2004. Hydraulic engineering. Bookshill, Seoul, Korea. [in Korean]
- Kim DM, Kim SC, Lee SH, Kim YJ, Jang JS. 2015a. Analysis of the fuel consumption and the development of the analysis model of the hybrid tractor. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers* 23(3):326-335.
- Kim GS, Kim JS, Park YI, Lee CB. 2015b. Driving performance prediction for low-floor midsize bus using simulator. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 24(5):541-547.
- Kim HG, Kim DJ, Lee CH, Lee CB, Park JH, Lee JT. 2010a. The study for development of Seoul city bus driving cycle. *The Korean Society of Automotive Engineers 2010 Annual Conference and Exhibition* 11:934-939.
- Kim KS, Na SD, Kim BM, Jeong CM, Yoo WS. 2012. Environment of real-time simulation for vehicle dynamic model. *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2012 Autumn Conference* 11:218-219.
- Kim SC, Kim KU, Kim DC. 2010b. Modeling of fuel consumption rate for agricultural tractors. *Journal of Biosystems Engineering* 35(1):1-9.
- Kim WS, Kim YJ, Lee DH, Yoon YH. 2015c. Evaluation of tractor fuel efficiency using simulation x. *Korea Society of Precision Agriculture & Agricultural Production Automation Research Center 2015 International Joint Symposium on Unmanned Journal* 273-275.
- Kim YJ, Chung SO, Choi CH, Lee DH. 2011. Evaluation of tractor PTO Severeness during rotary tillage operation. *Journal of Biosystems Engineering* 36(3):163-170.
- Lee DH, Kim YJ, Chung SO, Choi CH, Lee KH, Shin BS. 2015a. Analysis of the PTO load of a 75 kW agricultural tractor during rotary

- tillage and baler operation in Korean upland fields. *Journal of Terramechanics* 60:75-83.
- Lee DH, Choi CH, Chung SO, Kim YJ, Nam YS, So JH. 2015b. Study on evaluation of tractor performance in indoor test using working cycle. *Journal of Biosystems Engineering/The Korean Society for Bio-Environment Control* 161-162.
- Lyu MS, Doo BM, Ku YG. 2008. A study of the fuel economy improvement of a heavy duty in commercial vehicle( I ). *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers* 16(5):44-48.
- Park SH, Kim YJ, Im DH, Kim CK, Jang Y, Kim SS. 2010a. Analysis of factors affecting fuel consumption of agricultural tractor. *Journal of Biosystems Engineering* 35(3):151-157.
- Park SH, Kim YJ, Im DH, Kim CK, Jung SC, Kim HJ, Lee JS, Kim SS. 2010b. Characteristics of tractor PTO power and workloads. *Journal of Biosystems Engineering* 35(1):15-20.
- Ryu KH, Kim KU, Kim KD, Kim ST, Park GJ, Part SJ, Park JK, Seo SR, Shin BS, Yeon KS, Lee KS, Lee KM. 2014. Tractors engineering. Munundang, Seoul, Korea. [in Korean]
- Shin SG, Hwang YH, Lee HK. 2015. Development of simulation-based test environment for quantitative vehicle fuel consumption analysis. *The Korean Society of Automotive Engineers 2015 Annual Conference* 5:1198-1202.
- Song JH, Kim DJ, Lee CH, Lee CB. 2009. Simulation of effect of vehicle driving pattern on fuel consumption. *The Korean Society of Automotive Engineers 2009 Annual Conference and Exhibition* 11:2039-2044.
- Yoon HW. 2012a. Development of working cycle for performance evaluation of tractor field operations. Ph.D. dissertation, Sungkyunkwan Univ., Suwon, Korea. [in Korean]
- Yoon YH, Jang JS, Lee YB. 2012b. An analysis of dynamic characteristics for variable swash plate type axial piston pump. *The Korea Fluid Power Systems Society Conference* 6:23-30.
- Yu JK, Shin DH, Oh KS, Yoon JW, Yi KS. 2013. Tractor resonance analysis and validation. *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2013 Conference* 12:1972-1976.