

## ENGINEERING

# Effect of tractor travelling speed on a tire slip

Yeon Soo Kim<sup>1,2</sup>, Sang Dae Lee<sup>2</sup>, Young Joo Kim<sup>2</sup>, Yong Joo Kim<sup>1\*</sup>, Chang Hyun Choi<sup>3\*</sup>

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

<sup>2</sup>Convergence Agricultural Machinery Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gimje 54325, Korea

<sup>3</sup>Department of Bio-mechatronic Engineering, SungKyunkwan University, Suwon 16419, Korea

\*Corresponding author: [babina@cnu.ac.kr](mailto:babina@cnu.ac.kr), [choiauto@skku.edu](mailto:choiauto@skku.edu)

## Abstract

The rural labor force has gradually been decreasing due to the decrement of the farm population and the increment of the aging population. To solve these problems, it is necessary to develop and study autonomous agricultural machinery. Therefore, analyzing the dynamic behavior of vehicles in an autonomous agricultural environment is important. Until now, most studies on agricultural machinery, especially on ground vehicle dynamics, have been done by field tests. However, these field test methods are time consuming and costly with seasonal restrictions. A research method that can replace existing field test methods by using simulations is needed. In this study, we did basic research analyzing the effect of the travelling speed of a tractor on tire slip using simulation software. A tractor simulation model was developed based on field conditions following a straight path. The simulation was done for three ranges of speed: 20 - 30 km/h (considered the normal travelling speed range), 6 - 8 km/h (considered the plow tillage speed range) and 2 - 4 km/h (considered the rotary tillage speed range). The results of the simulation show that the slip ratio and slip angle values tended to increase as the traveling speed range of the tractor decreased. From the simulation results, it can be concluded that at low tractor speeds, it becomes more difficult to control the vehicle path. In future research, simulations will be done with various work environments such as a curved path as well as with various friction coefficient conditions, and the simulation results will be experimentally verified by applying them to an agricultural tractor.

**Keywords:** tractor, simulation, travelling speed, slip ratio, slip angle

## Introduction

전 세계적으로, 급격한 기후 변화 및 식량위기에 따른 곡물가격의 급등 농업생산성 한계 등 다양한 문제에 직면하고 있는 상황이다(Lim and Park, 2017). 특히, 농업 인구 고령화가 빠르게 진행되고 있으며 농촌의 노동력 부족현상이 발생되고 있다. 이런 농촌의 노동력 부족현상을 극복하고 여성 및 노약자 등의 농작업 환경개선을 위하여 자율주행 농업기계의 개발과 연구가 필요하다(Seo et al., 2010; Han et al., 2017).

자율주행농업기계는 운전자가 직접 차량에 탑승하지 않으므로 사람이 농기계를 직접 운전



### OPEN ACCESS

**Citation:** Kim YS, Lee SD, Kim YJ, Kim YJ, Choi CH. 2018. Effect of tractor travelling speed on a tire slip. Korean Journal of Agricultural Science 45:120-127.

**DOI:** <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180002>

**Editor:** Kyeong Hwan Lee, Chonnam National University, Korea

**Received:** August 29, 2017

**Revised:** November 21, 2017

**Accepted:** January 26, 2018

**Copyright:** © 2018 Korean Journal of Agricultural Science.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

하는 경우 보다 차량 거동에 대한 동역학 해석이 중요하다. 일반적으로, 차량 및 건설기계 분야에서 차량 동역학에 대한 연구는 대부분 시뮬레이션 등을 통해 성능을 예측한 후에 필드시험을 수행하고 있다. 이러한 시뮬레이션을 이용한 해석 방법은 인력, 시간, 비용을 절감할 수 있으며, 필드 시험 보다 신뢰성이 높은 장점이 있어 자동차 및 건설기계 분야에서는 지속적으로 동역학 시뮬레이션에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Yun et al. (2010)은 차량의 동역학 시뮬레이션에 많이 사용되는 Carsim 소프트웨어를 사용하여 상용 ABS (Anti-lock Brake System)와 개발된 슬라이드 모드 제어기의 제동성능 비교 분석 시뮬레이션을 하여 시뮬레이션을 통한 제동성능의 평가가 가능하다고 보고하였다. Jeong and Yim (2013)은 Carsim 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 연구를 통해 단순화된 차량 모델을 이용한 능동 현가장치 제어기 설계 과정의 복잡함을 줄이고, 제어기 성능을 확인하였다. Park et al. (2013)은 Carsim 소프트웨어를 활용하여 생체신호인지기반 운전자 상태감지를 위한 시뮬레이터 개발에 관한 연구를 진행하였으며, 이를 통해 운전자 졸음상태에 대해 판단하고 경고하는 생체신호 database를 구축할 수 있는 환경을 구성하였다.

Bang and Lee (2014)는 ADAMS/Car를 이용해 경사면에서 선회 운동하는 SUV차량의 롤(roll) 거동 시뮬레이션을 통해 차체 롤 중심에 대한 모멘트 및 지면력과 롤 운동 사이의 관계를 증명하였다. Cho (2010)는 자동차의 자율주행 알고리즘 및 동적특성에 관한 연구를 진행하였고, 시뮬레이션을 통해 안정성 기반 자율주행 알고리즘의 자율주행 성능을 검증하였다. Yun et al. (2011)은 무인 자율주행을 위한 근거리 전기자동차 개발에 관한 연구를 진행하였고, 지능형 차량 플랫폼과 VCU (Vehicle Control Unit) 시스템을 개발하였다.

Le and Yang (2012)은 Matlab/SimHydraulic을 사용한 가상 굴삭기 조작을 위한 유압 시스템에 관한 연구를 수행하였고, 시뮬레이션 결과 비교를 통해 시뮬레이터 성능평가를 하였다. Choi (2012)는 ADAMS를 이용한 기구학 해석과 AMESim을 이용한 유압 해석을 통해 25톤 굴삭기의 시뮬레이션 모델 개발에 관한 연구를 진행하였고, 데이터 인터페이스를 통한 모델 성능 검증을 실시하였다. 문헌 연구를 고려할 때 자동차 및 건설기계 분야에서의 필드 시험에 관련된 연구는 대부분 시뮬레이션으로 대체가 가능한 것으로 나타났다.

농업기계분야에서는 Jang et al. (2016)은 KISSsoft를 활용하여 트랙터 차폭 변화에 따른 PTO 기어 설계 및 안전을 해석을 진행하였고, Kim et al. (2016)은 SimulationX를 활용하여 트랙터 소요 동력 분석 모델을 개발하였다. 또한, Hong et al. (2017a)은 3축 견인 시스템에 대한 수학적 시뮬레이션을 이용하여 정적 상태에서의 횡방향 안정성 해석을 진행하였다. 그러나 농업 동역학 관련 연구에서 시뮬레이션 소프트웨어 활용이 미비하고 포장 조건 등에 대한 설정이 어려워 동역학 시뮬레이션에 대한 연구 보다는 대부분 필드시험을 통하여 차량의 성능을 평가하고 있다. Kim (2011)은 소형 트랙터를 기반으로 로봇 플랫폼을 구성하여 농업용 로봇 플랫폼의 자율주행 시스템 관련 연구를 진행하였고, Park et al. (2010)은 트랙터 필드시험을 통하여 경운정지 작업의 PTO 출력과 연료소모량을 측정하였다. 또한, Kim et al. (2011)은 필드테스트를 통한 베일러 작업 시 트랙터 소요동력 분석 연구를 진행하였으며, Han et al. (2015)은 GPS/INS를 이용하여 개발된 자율주행트랙터의 강인제어 성능을 필드시험을 통해 검증하는 연구를 진행하였다. 또한, Hong et al. (2017b)은 50 kW 급 과수원용 트랙터의 구동 동력 전달 시스템에 대한 성능평가를 진행을 통해 미국, 일본의 선진사기대 제품과 유사 성능을 나타낸 것을 확인하였다. 그러나 트랙터 필드 시험은 일반적으로 높은 비용, 많은 인력 소모, 불균일한 시험조건 등 정확하고 균일한 평가가 어렵기 때문에 이를 대체할 수 있는 시험 방법이 필요한 실정이다(Andre, 2004).

본 연구는 농업기계 분야에서 시뮬레이션 해석방법을 제시하기 위한 기초 연구로서, 상용 소프트웨어인 Carsim을 이용하여 트랙터의 동특성에 관한 시뮬레이션을 진행하였다. 트랙터 시뮬레이션에는 차량의 kinematics model을 이용하였으며, 농작업 환경에 따라 트랙터 슬립이 농작업에 미치는 영향을 분석하기 위하여 트랙터 속도에 따른 슬립율(slip ratio)과 슬립각(slip angle)에 대해 시뮬레이션 하였다.

## Materials and Methods

### 소프트웨어

시뮬레이션은 차량의 동역학 시뮬레이션에 많이 사용되는 프로그램인 Carsim (ver9.01, Mechanical Simulation Corporation, USA)을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 Carsim 소프트웨어는 차량, 도로, 운전자 모델 등의 다양한 환경을 설정할 수 있으며, 구체적인 인터페이스는 Fig. 1과 같다. 시뮬레이션에 사용된 트랙터 제원은 71 kW 급 모델(L7040, LS Mtron, Korea)이며, 기대의 길이, 차폭, 높이는  $4,000 \times 2,677 \times 2,640$  mm, 무게는 3,260 kg로 설정하였다. 유효구름반경(effective radius)은 545 mm, 후륜 타이어의 유효구름반경은 745 mm로 설정하였다.

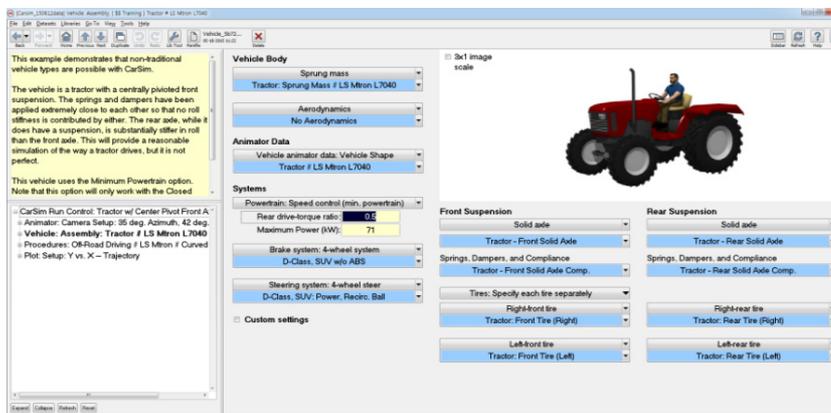


Fig. 1. Carsim software used for the simulation.

### 시뮬레이션 모델

트랙터의 동역학 시뮬레이션을 위해서는 kinematics model이 필요하다. 일반적으로 트랙터와 같이 작업환경이 열악한 차량의 동적 특성을 해석하기 위해서는 비선형 차량 모델이 필요지만, 횡 가속도가 약  $4 \text{ m/s}^2$  이하에서는 2 자유도 선형 모델에 의해서도 비선형 모델의 결과와 근사한 결과를 얻을 수 있다(Choi et al., 2003).

선형 모델에서는 차축의 좌·우측 바퀴를 하나의 등가 바퀴로 대체 시키고 있으며 횡방향 힘, 종 방향의 가속, 감속 등을 무시할 수 있기 때문에 차량의 동적 성능을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 트랙터의 kinematics model은 선형모델을 이용하였으며 Fig. 2와 같이 최초 차량의 위치를  $(X, Y)$ , 차량의 다음 목표 위치를  $(X_t, Y_t)$ 라고 한다면 그 목표 위치는 식 (1)과 같이 정의하였다(Rajamani, 2006).

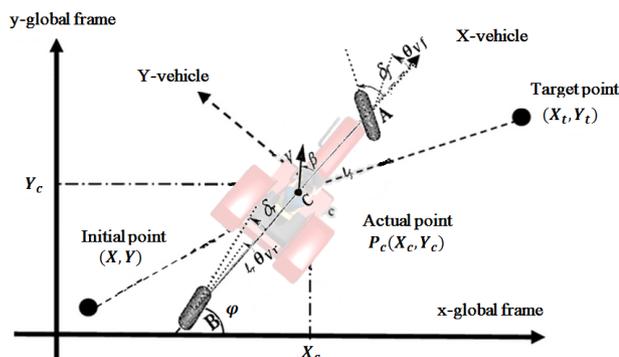


Fig. 2. Two degree of freedom linear kinematic vehicle model for agricultural tractor.

$$\begin{aligned}
X_t &= V \cos(\varphi + \beta) \\
Y_t &= V \sin(\varphi + \beta) \\
\dot{\varphi} &= \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} (\tan(\delta_r) - \tan(\delta_f)) \\
\beta &= \tan^{-1} \left( \frac{l_f \cdot \tan \delta_r + l_r \cdot \tan \delta_f}{l_f + l_r} \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

Where,  $X, Y$  : Global axis coordinate

$X_t, Y_t$  : Vehicle target position

$\varphi$  : Yaw angle of vehicle in global axes (rad)

$\dot{\varphi}$  : Yaw rate of vehicle (rad/sec)

$l$  : Longitudinal distance from center of gravity to tires (front, rear) (m)

$\beta$  : Side-slip angle of vehicle ( $^\circ$ )

$\delta$  : Wheel steering angle (front, rear) ( $^\circ$ )

$\theta_v$  : Velocity angle of tires (front, rear) (rad/sec)

$f$  : Label of front wheel

$r$  : Label of rear wheel

## 슬립 분석

차량의 슬립은 크게 슬립율(slip ratio)과 슬립각(slip angle)으로 나타낼 수 있다(Kondo et al., 2011). 차량 목표경로 방향으로 주행 중에 차량의 속도( $V_x$ , 작업방향속도)와 바퀴의 회전속도 사이의 차이가 순간적으로 나타나는데, 이 비율을 슬립율이라고 하며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Park and Huh, 2001).

$$\sigma_x = \frac{r_{eff} \cdot \omega_w - V_x}{r_{eff} \cdot \omega_w} \tag{2}$$

Where,  $r_{eff}$  : Effective radius (rolling radius) of rotating tire (m)

$\omega_w$  : Angular velocity of wheel (rad/sec)

$V_x$  : Longitudinal vehicle velocity (m/s)

슬립각은 선회 상태인 차량의 타이어를 보았을 때 타이어의 진행방향과 타이어의 중심면이 이루는 각도를 말하는데, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(Kim, 2001).

슬립각은 차량의 조종안정성을 대표하는 횡 슬립각(slip-side angle of vehicle) 및 yaw rate의 함수로 차량 횡 슬립각과 yaw rate는 차량의 조종안정성을 대표하는 요소이다(Song, 2012). 또한, 차량 횡 슬립각과 yaw rate는 차량의 주행속도와 조향각에 영향을 받으므로(Wang and Noguchi, 2016; Yi and Lee, 2014) 본 연구에서는 슬립각과 함께 횡 슬립각과 yaw rate를 시뮬레이션 하였다.

$$\alpha = \delta - \left( \beta + \frac{\dot{\varphi} \cdot l_f}{v} \right) \tag{3}$$

Where,  $\delta$  : Front wheel steering angle ( $^{\circ}$ )

$\theta_v$  : Tire velocity angle ( $^{\circ}$ )

$\beta$  : Slip-side angle of vehicle ( $^{\circ}$ )

$\dot{\varphi}$  : Yaw rate (deg/s)

$v$  : vehicle speed (km/h)

$l_f$  : Longitudinal distance from center of gravity to tires (front) (m)

## 실험방법

트랙터 속도가 슬립인자에 미치는 영향을 분석하기 위하여 트랙터 속도를 주행구간과 작업구간으로 구분하였다. 주행 구간은 71 kW 트랙터의 주행 속도를 고려하여 20 - 30 km/h 범위로 설정하였으며, 작업구간은 쟁기와 로타리 작업 속도를 고려하여 각각 6 - 8 km/h와 2 - 4 km/h 범위로 설정하였다(NIAE, 2004). 시뮬레이션은 각 속도 구간에 대하여 1 km/h 속도간격으로 시뮬레이션 하였으며, 이때의 슬립율, 슬립각을 평균 내어 각 속도 구간에 대한 값으로 나타내었다. 또한, 차량 횡 슬립각과 yaw rate 값에 대한 결과를 통하여 슬립각의 변화를 분석하였다(Ricardo and Noguchi, 2016).

시뮬레이션을 위해서는 실제 운전자 특성을 반영한 운전자 모델이 필요하며, 본 연구에서는 농작업 시 작업자가 full throttle에서 등속으로 작업하는 것을 고려하여 설정 주행속도로 등속주행을 하고 브레이크를 밟지 않으며 작업경로와 차량의 각도를 0도로 유지하도록 조향을 하는 운전자 모델을 사용하였다. 농작업을 위한 작업 경로는 국내 트랙터 포장 조건을 고려하여 X축 좌표의 길이가 100 m 인 직선경로를 설정하였으며, 차량 주행에 있어 동적 거동에 영향을 미치는 노면 마찰계수는 일반적인 농작업을 수행하는 노지 조건을 고려하여 건조한 아스팔트 노면보다 낮고, 젖은 아스팔트 노면보다 높은 0.6으로 설정하였다(Wong, 2001).

## Results and Discussion

### 슬립율

트랙터 속도에 따라 슬립율을 시뮬레이션 하였으며 결과는 Table 1과 같다. 슬립율은 20 - 30 km/h 구간에서 0.131%, 6 - 8 km/h 구간에서 0.201%, 2 - 4 km/h 구간에서 0.230%로 나타났다. 트랙터 속도가 감소할수록 슬립율은 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 트랙터 주행 중 주행속도가 낮을수록 트랙터 속도와 바퀴의 회전속도 사이의 차이가 더 커지는 것 때문으로 판단되었다.

**Table 1.** Longitudinal force and slip ratio data at straight path.

Path	Straight path		
Speed range (km/h)	20 - 30	6 - 8	2 - 4
Slip ratio ( $\sigma_x$ , %)	0.131	0.201	0.230

### 슬립각

트랙터 속도에 따라 슬립각과 관련인자에 대해 시뮬레이션 결과는 Table 2와 같다. 트랙터 속도에 따른 평균 슬립각은 20 - 30 km/h 구간에서 0.172 $^{\circ}$ , 6 - 8 km/h 구간에서 0.219 $^{\circ}$ , 2 - 4 km/h 구간에서 0.309 $^{\circ}$ 의 값을 나타냈다. 이때 yaw rate 값은 20 - 30 km/h 구간에서 0.678 deg/s, 6 - 8 km/h 구간에서 0.436 deg/s, 2 - 4 km/h 구간에서 0.442 deg/s의 값을 나타냈다. 또한, 차량 횡 슬립각 값은 20 - 30 km/h 구간에서 0.132 $^{\circ}$ , 6 - 8 km/h 구간에서 0.170 $^{\circ}$ , 2 - 4 km/h 구

간에서  $0.261^\circ$ 로 나타났다.

시뮬레이션 결과를 통해 트랙터 속도가 감소할수록 슬립각은 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 슬립각에 영향을 미치는 대표 요소인 차량 횡 슬립각과 yaw rate의 값이 속도가 감소할수록 값이 증가하는 경향을 보이는 것에 영향을 받은 것으로 판단되었다.

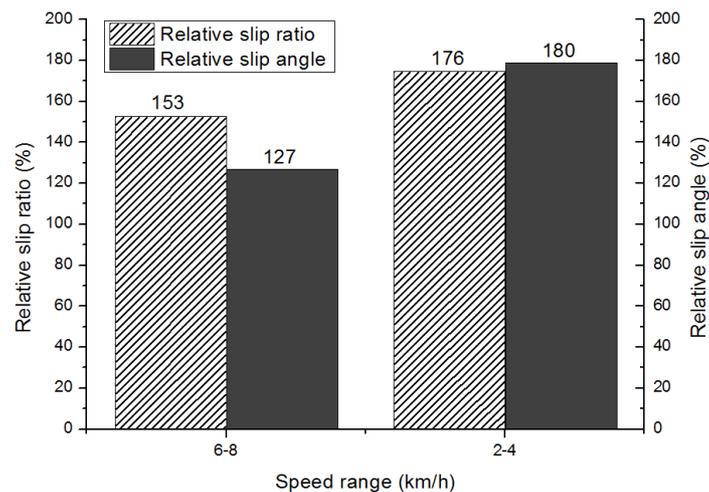
**Table 2.** Lateral force and slip angle data at straight path.

Path	Straight path		
Speed range (km/h)	20 - 30	6 - 8	2 - 4
Slip angle ( $\alpha$ , $^\circ$ )	0.172	0.219	0.309
Slip-side angle of vehicle ( $\beta$ , $^\circ$ )	0.132	0.170	0.261
Yaw rate ( $\dot{\varphi}$ , deg/s)	0.678	0.436	0.442

### 트랙터 주행 속도가 슬립에 미치는 영향

트랙터 주행속도가 감소할수록 슬립률과 슬립각은 증가하는 결과를 나타냈으며, 주행속도구간과 작업속도구간의 상대적인 결과값 차이를 비교하기 위하여 주행구간에서의 슬립률과 슬립각 결과를 기준으로 작업 구간의 값을 다음 Fig. 3과 같이 비교하였다.

트랙터 작업속도구간 중 6 - 8 km/h 인 경우에는 주행구간에 비하여 슬립률이 153%, 슬립각이 127% 증가하였으며, 2 - 4 km/h인 경우에는 각각 176%, 180% 증가하였다. 그러므로 트랙터 주행속도구간 보다는 작업속도구간에서 더 큰 슬립이 발생됨을 알 수 있으며, 낮은 2 - 4 km/h의 작업 속도구간에서는 최대 180%까지 슬립각이 발생하여 트랙터의 조작 및 제어가 더 어려울 것으로 판단되었다.



**Fig. 3.** Relative slip element value according to tractor speed range.

### Conclusion

본 연구는 트랙터 대표 작업인 쟁기, 로타리 작업속도구간에서 타이어 kinematics 요소인 슬립률과 슬립각에 대해 시뮬레이션 하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 슬립률의 값은 트랙터 속도가 감소할수록 슬립률은 증가하는 경향을 보였다. 이 결과는 차량 작업경로 주

행 중 주행속도가 낮을수록 트랙터 속도와 바퀴의 회전속도 사이의 차이가 더 커지는 것 때문에 판단된다.

둘째, 슬립각은 트랙터 속도가 감소할수록 슬립각이 커지는 경향을 보였다. 이 결과는 관련 요소 결과 중 2 - 4 km/h 구간에서 타이어 횡방향 힘과 yaw rate 결과값이 6 - 8 km/h 구간에서 보다 큰 것에 영향을 받은 것으로 판단되었다.

셋째, 트랙터 주행속도구간에서의 조건보다는 작업 속도조건에서 더 큰 슬립이 발생하는 것을 확인했으며, 작업 속도가 낮은 2 - 4 km/h 속도구간에서는 주행속도 구간 대비 최소 127%에서 최대 180%까지 슬립각이 발생하여 트랙터의 경로추종을 위한 차량 제어가 더 어려울 것으로 판단되었다.

넷째, 본 연구는 트랙터 속도가 슬립에 미치는 영향을 분석하였으며, 트랙터 작업 속도범위 구간인 2 - 4 km/h, 6 - 8 km/h에서 더 큰 슬립을 및 슬립각이 발생하여 작업자가 트랙터를 작업 경로에 맞게 조작하는 것이 더 어려울 것으로 판단되었다. 따라서 무인농업기계 개발 시에는 농작업 부하에 따라 슬립이 더 크게 작용하므로 이를 고려한 강인 제어가 필요함을 알 수 있었다.

향후 연구에서는 곡선 경로 및 여러 마찰계수조건 등의 다양한 작업환경에 따른 시뮬레이션을 실시하고, 실제 농업용 트랙터에 적용을 하여 실험적으로 검증하고자 한다.

## 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.
- Bang JH, Lee BH. 2014. A roll-behavior analysis of SUV in turning motion on a slope. *The Korean Society of Automotive Engineers* 22:131-137. [in Korean]
- Cho YH. 2010. A Study on Algorithm for Autonomous Navigation. *Journal of IKEEE* 14:324-331. [in Korean]
- Choi DW, Moon IK, Yi KS. 2003. Lane tracking control of electric vehicle with autopilot. *Proceedings of the Korea Society of Automotive Engineers Conference and Exhibition* 3:1087-1092. [in Korean]
- Choi JH. 2012. Development of excavator simulation model using ADAMS/AMESim program. *Proceedings of Korea Society of Precision Engineering 2012 Conference* 5:35-36. [in Korean]
- Han GO, Yeo MS, Hong SJ. 2017. Ways of reducing the perception gap between rural residents and urban-to-rural migrants: focus on the area of hongseong-gun. *Korean Journal of Agricultural Science* 44:440-450. [in Korean]
- Han XZ, Kim HJ, Jeon CW, Kim JH. 2015. Sideslip angle estimation and robust lateral control for unmanned auto tractor using GPS/INS. *Proceedings of the Korean Society of the Agricultural Machinery 2015 conference* 20:84-85. [in Korean]
- Hong SH, Lee KS, Kang DI, Park WY. 2017a. Analysis of static lateral stability using mathematical simulations for 3-axis tractor-baler system. *Journal of Biosystems Engineering* 42:86-97.
- Hong SJ, Ha JK, Kim YJ, MSN Kabir, Seo YW, Chung SO. 2017b. Performance evaluation of a driving power transmission system for 50 kW narrow tractors. *Journal of Biosystems Engineering* 43:1-13.
- Jang JH, Chung SO, Choi CH, Park YJ, Chun WK, Kim SI, Kwon OW, Kim CW, Hong SJ, Kim YJ. 2016. Effects of PTO gear face width on safety factors. *Korea Journal of Agricultural Science* 43:650-655. [in Korean]
- Jeong JH, Yim SJ. 2013. Design of an active suspension controller with simplified vehicle models. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers* 12:3085-3086. [in Korean]
- Kim SC. 2011. (A) Study on the autonomous travelling system for an agricultural robot platform. Ph.D. dissertation,

- Kongju National Univ., Chungnam, Korea. [in Korean]
- Kim SS. 2001. Fundamentals of vehicle dynamics. SAE, Seoul, Korea. [in Korean]
- Kim WS, Kim YJ, Jung SO, Lee DH, Choi CH, Yoon YH. 2016. Development of simulation model for fuel efficiency of agricultural tractor. *Korea Journal of Agricultural Science* 43:116-126. [in Korean]
- Kim YJ, Lee DH, Chung SO, Park SJ, Choi CH. 2011. Analysis of power requirement of agricultural tractor during baler operation. *Journal of Biosystems Engineering* 36:243-251. [in Korean]
- Kondo N, Monta M, Noguchi N. 2011. Agricultural robots mechanisms and practice. Corona Publishing Co., Ltd. Tokyo, Japan.
- Le Q, Yang SY. 2012. Hydraulic system simulation for manipulator of virtual excavator using Matlab/SimHydraulic. *Proceedings of the Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments 2012 Conference* 6:165-169.
- Lim KT, Park JH. 2017. Consumers's awareness and behavior intention on meat consumption according to climate change. *Korean Journal of Agricultural Science* 44:296-307. [in Korean]
- NIAE. 2004. Agricultural machinery test report 04-M-1-4~04-M-1-59. National Institute of Agricultural Engineering, Suwon, Korea. [in Korean]
- Park BY, Huh SJ. 2001. Vehicle dynamics an introduction. Munundandg, Seoul. [in Korean]
- Park MS, Lee KH, Kim HY. 2013. Development of driving simulator for detecting driver's condition based on bio-signal. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers* 5:1534-1538. [in Korean]
- Park SH, Kim YJ, Im DH, Kim CK, Jung SC, Kim HJ, Lee JS, Kim SS. 2010. Characteristics of tractor PTO power and work loads. *Journal of Biosystems Engineering* 35:15-20. [in Korean]
- Rajamani R. 2006. Vehicle dynamics and control. Springer Publishing, New York, USA.
- Ricardo O, Noguchi N. 2016. Determination of tire dynamic properties: Application to an agricultural vehicle. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 9:123-130.
- Seo IH, Seo DH, Kim KD. 2010. Development of working path formation program for autonomous tractor system. *Agricultural Sciences Research* 37:113-121. [in Korean]
- Song JH. 2012. Design of non-linear observer to estimate yaw rate and side slip angle. *The Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 11:48-53. [in Korean]
- Wang H, Noguchi N. 2016. Autonomous maneuvers of a robotic tractor for farming. *Proceedings of System Integration (SII), 2016 IEEE/SICE International Symposium on IEEE*.
- Wong JY. 2001. Theory of ground vehicles, third ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Yi KS, Lee JY. 2014. Vehicle dynamics control applications to automobiles. *Survey and Some New Trends* 20: 298-312. [in Korean]
- Yun DS, Baek SH, Kim HS, Song JH, Boo KS. 2010. Brake performance analysis of sliding mode controller by comparing with a commercial anti-lock brake system. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers* 18:14-23. [in Korean]
- Yun JS, Shin JH, Park JH, Bin W, Lee SH, Hwang SH. 2011. Development of intelligent vehicle platform for cognitive neighborhood electric vehicle. *Korea Society of Automotive Engineers, General Conference of Korea Society of Automotive Engineers parts* 5:2297-2300. [in Korean]