

## 78 kW급 농업용 트랙터의 로타리 경운 작업에 따른 등가 토크 분석

백승민, 김완수, 박성운, 김용주\*

## Analysis of Equivalent Torque of 78 kW Agricultural Tractor during Rotary Tillage

Seung-Min Baek, Wan-Soo Kim, Seong-Un Park, Yong-Joo Kim\*

**요약** 본 연구는 트랙터 변속기의 성능평가, 내구성 향상 및 최적 설계 등을 위한 기초 연구로써 로타리 작업에 따른 78 kW급 농업용 트랙터의 엔진 토크를 CAN 통신을 이용하여 수집하고, 등가 토크를 분석하였다. 신뢰성 높은 트랙터 개발을 위해서는 실제 농작업 환경에서 발생하는 부하를 등가 토크로 변환하여, 분석하는 것이 필요하다. 등가 토크는 대표적인 누적 손상법인 Palmgren-Miner 식으로 작업 및 선회구간에 대하여 계산되었으며, 각각 229.2, 136.7 Nm로 나타났다. 로타리 작업구간에서 최대 및 평균 토크는 각각 336.0, 234.4 Nm로 나타났으며, 선회구간의 최대 및 평균 토크는 288.0, 134.6 Nm로 나타났다. 로타리 작업구간에서의 엔진 토크는 PTO를 통해 토양을 경운하기 때문에 선회구간보다 높게 나타났다. 엔진의 최대 및 정격 토크는 각각 387.0, 323.0 Nm로, 로타리 작업 및 선회구간의 등가 토크보다 각각 183%, 136% 높게 나타났다. 국내 트랙터 회사는 일반적으로 엔진의 정격 토크를 기준으로 변속기를 설계하기 때문에, 실제 작업 토크와 다소 차이가 있다. 그러므로 최적 설계를 위해 실제 작업 토크를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

**Abstract** This paper is a basic study for the performance evaluation, durability improvement and optimal design of tractor transmission. The engine torque of the 78 kW agricultural tractor during rotary tillage was measured using CAN communication. It was calculated with equivalent torque and then analyzed. In order to develop a reliable tractor, it is important to convert measured torque in various agricultural operations into equivalent torque and analyze it. The equivalent torque was calculated using Palmgren-Miner's rule, which is a representative cumulative damage law. The equivalent torque of rotary tillage period and steering period are 229.2 and 136.7 Nm, respectively. The maximum and average torque during rotary tillage period are 336.0 and 234.4 Nm, respectively. The maximum and average torque of the steering period are 288.0 and 134.6 Nm, respectively. The engine torque in rotary tillage period is higher than in the steering period because of cultivation of soil through PTO. The maximum and rated torque of engine are 387.0 and 323.0 Nm, respectively, which are 183% and 136% higher than the equivalent torque during rotary tillage and of steering section. Because transmission of agricultural tractor in Korea companies is generally designed by the rated torque of engine, there is a difference from measured torque during agricultural operations. Therefore, it is necessary to consider it for optimal design.

**Key Words** : Agricultural tractor, Rotary tillage, Load measurement, Equivalent torque

## 1. 서론

농업용 트랙터는 상용차와 달리 눈, 밭 등에서 다양

한 농작업을 수행하는 노외 작업 차량이기 때문에 작업 성능, 내구성 등 일반 차량에 비해 높은 신뢰성이

This research was supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries(IPET), funded by ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA) (No.319039-03, No.714002-07).

\*Corresponding Author : Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University (babina@cnu.ac.kr)

Received July 26, 2019

Revised July 30, 2019

Accepted August 05, 2019

요구된다(Kim et al, 2009). 해외 농업용 트랙터 선진사인 John Deere 및 Kubota는 MTBF(Mean Time Between Failure), FMEA(Failure Mode and Effects Analysis) 등 신뢰성 이론을 적용하여 내구품질 향상에 노력을 기울이고 있으며, 국내 기업 또한 시험평가 규격 및 기술 개발에 몰두하고 있다(Sim et al, 2011). 신뢰성 높은 트랙터 개발을 위해 실제 농작업 환경에서 발생하는 부하를 분석하고 이를 고려하는 것이 중요하다(Han et al, 1999). 또한 농작업 부하는 변동 부하이기 때문에 등가 부하를 계산 하는 것이 필요하다(Jang, 2018). 등가 부하는 농업기계분야에서 트랙터 가속 수명 시험 코드 개발, 부품의 성능, 내구성 평가에 사용된다(Park et al, 2015).

최근 등가 부하에 대한 연구는 다음과 같이 이루어지고 있다. Kim et al(2014)은 5 MW 풍력발전용 피치 드라이브의 해석을 실시하여, 각부의 부하에 대한 데이터 및 변위를 계산하였다. 이를 통하여 구성품들에서 부하가 발생하는 부분에 대한 보강을 통해 피치 드라이브의 내구성의 문제 방안을 제시하였다. Jung et al(2011)은 트랙터 변속기의 가속 수명 시험 인자를 밝혀내기 위해 사용자의 사용 패턴, 환경적 요인, 필드 데이터의 작업 사이클 등을 고려하였다. 또한 이를 위해 트랙터의 농작업의 필드 부하로부터 얻은 등가 부하와 선형 누적 손상법으로 계산된 손상 데이터를 사용하였으며, 가속 시험 인자를 통하여 가속 수명의 시험 시간을 예측 가능한 방안을 제시하였다. Thomesen et al(1999)은 풍력터빈의 작동 시 4 가지 파라미터에 대하여 연구를 실시하였다. 내륙과 해안가의 풍력기지에서 풍력터빈에 대해 증가하는 부하의 파라미터에 대하여 분석하였다. 증가한 부하에 대하여 수명평가를 실시하기 위해 등가 부하를 계산하여, 이를 통하여 풍력 터빈의 피로수명을 산출하는 방안을 제시하였다. 일반기계분야에서 등가 부하를 이용하여 가속 수명 시험에 적용 및 피로수명을 평가하는 연구는 활발히 진행되고 있지만, 농업기계분야에서 계측된 토크를 등가 토크로 산출하여, 이를 분석한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 트랙터 변속기의 성능평가, 내구성 향상 및 최적 설계 등을 위한 기초 자료를 확보하

기 위하여 수행되었으며, 트랙터 주요 작업 중 부하 수준이 높은 로타리 작업에 따른 트랙터 엔진 토크를 CAN(Controller Area Network) 통신을 이용하여 수집하고, 등가 토크로 산출하여 이를 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 계측용 트랙터

본 연구에서는 농작업 시 부하데이터를 계측하기 위하여 그림 1과 같이 (주)동양물산의 78 kW급(323 Nm @2,300 rpm) 트랙터를 사용하였다. 계측용 트랙터는 기계식 변속기가 탑재되어있으며, 전·후진 각각 32단의 기어비를 갖는다. 계측용 트랙터의 자세한 제원은 표 1과 같다.



그림 1. 계측용 트랙터

Fig. 1. A photo of agricultural tractor for load measurement used in this study

표 1. 계측용 트랙터 제원

Table 1. Specifications of agricultural tractor used in this study

Item	Specifications	
Length × Width × Height (mm)	4,225 × 2,140 × 2,830	
Weight (kg)	3,985	
Engine	Rated power (kW)	78 @2,300 rpm
	Max. torque (Nm)	387 @1,400 rpm
Transmission	Forward /Reverse	32/32
PTO	Max. power (kW)	69 @2,300 rpm
	Max. torque (Nm)	360.7 @1,400 rpm

## 2.2 엔진 토크 모니터링 시스템

엔진 토크 모니터링 시스템은 엔진의 토크 및 회전속도 값을 CAN 통신을 이용하여, 트랙터 내부에 설치한 데이터 수집 장치에 전송하도록 구성되었다. 또한 트랙터 내부에는 실시간으로 데이터를 확인 및 저장할 수 있도록 그림 2와 같이 구축하였다.

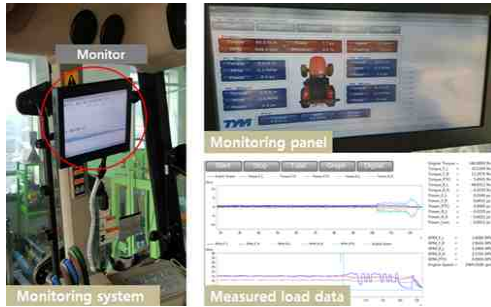


그림 2. 트랙터 엔진 토크 모니터링 시스템  
Fig. 2. Engine torque monitoring system in the tractor used in this study

## 2.3 필드 테스트

필드 테스트는 전라북도 부안군에서 수행하였으며, 포장 시험지의 크기는 100 m × 400 m이다. 농작업 부하는 토양 환경에 따라 영향을 받기 때문에, 포장 시험지의 토양 조건을 분석하는 것이 중요하다(MAFRA, 2006). 따라서 본 연구에서는 그림 3과 같이 토성, 수분 함량, 원추 관입지수에 대하여 토양 조건을 분석하였다. 토성은 시험지의 시료를 채취하여 미국 농무부(USDA)법에 의해 분석하였다. 수분 함량은 토양 시료의 건조 전후의 중량차로 구하는 중량법을 이용하여, 채취한 15개의 시료의 평균으로 계산하였다. 원추 관입지수는 Soil compaction meter(SC900, Spectrum Technology, USA)를 이용하여 0~20 cm 깊이에서 5 cm 간격으로 5회 반복 측정값의 평균으로 계산하였다.

토양 분석 결과, 토성은 사양토, 수분 함량은 35.15%, 원추 관입지수는 깊이에 따라 2,176~2,546 kPa 범위로 나타났다.



그림 3. 토양 환경 분석(토성, 수분 함량, 원추 관입지수)  
Fig. 3. Analysis of soil environment(Soil texture, Water content, Cone index)

트랙터 작업은 주요 포장 작업 중 다른 작업에 비해 가혹한 로타리 작업으로 선정하였다(Kim et al., 1998). 작업기는 그림 4와 같이 경폭이 230 cm인 로타리(SW 230 GL, Sungwoo Industrial Co. Ltd., Korea)를 사용하였다.



그림 4. 트랙터에 부착된 로타리  
Fig. 4. A photo of rotary attached in the tractor used in this study

국내 트랙터 회사인 (주)동양물산의 성능시험 업무 담당자가 그림 5와 같이 기존의 숙달된 방법으로 필드 테스트를 수행하여 신뢰성을 향상시켰다. 작업 단수는 농민들이 실제 로타리 작업을 가장 많이 수행하는 L3단(2.38 km/h)과 PTO 1단(540 rpm)에서 실시되었으며, 동일한 작업 조건에서 3회 반복하였다. 트랙터 구동은 견인력이 높은 4륜 구동 모드로 실시하였다. 로타리 경운 작업 패턴은 그림 6과 같이 국내에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 C-type을 선정하여, 전진-선회-전진의 순서로 작업을 수행하였다. 이때 경심은 13 cm를 유지하도록 하였다.



그림 5. 로타리 작업 시 부하 계측  
Fig. 5. A photo of load measurement during rotary tillage

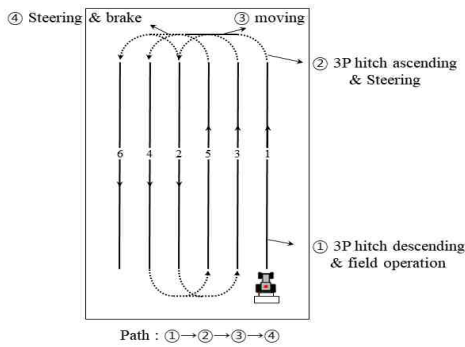


그림 6. 로타리 경운 작업 패턴  
Fig. 6. C-type working pattern of rotary tillage used in this study

### 2.4 등가 토크 및 속도

일반적으로 트랙터 농작업 부하는 크기와 방향이 일정하지 않은 변동 부하의 특성을 가지고 있다. 기계에 크기와 속도가 서로 다른 다수의 토크가 동시에 작용하는 경우에는 하나의 크기와 속도를 가진 토크를 구해야 한다. 이때 동일한 영향을 주는 하나의 토크를 등가 토크라고 하며, 이때 등가 토크의 작용 속도를 등가 속도라고 한다. 또한 등가 토크 및 속도는 시뮬레이션 해석 소프트웨어의 입력 데이터 값으로 활용되고, 가속 수명시험 코드 개발에 사용되기 때문에 수명 분석을 위한 중요 데이터이다.

등가 토크 및 속도는 누적손상법 이론에 근거한 Palmgren-Miner 식에 의하여 계산하였으며, 식은 아래와 같다(Baek et al, 2005).

$$T_e = \left( \sum f_i T_i^\lambda \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (1)$$

Where,

$T_e$  = Equivalent torque (Nm)

$f_i$  = Ratio of  $L_i/L$

$L$  = Number of cycle for total range

$L_i$  = Number of cycle for each range

$T_i$  = Torque of each range (Nm)

$\lambda$  = Fatigue damage exponent

$$n_e = \frac{1}{T_e^\lambda} \sum h_i n_i T_i \quad (2)$$

Where,

$n_e$  = Equivalent rotational speed (rpm)

$n_i$  = Rotational speed of each range (rpm)

$h_i$  = Ratio of interaction time

피로 손상 지수  $\lambda$ 는 부품, 장치, 기계 등에 따라 다르며, 하중 및 환경 요인에 따라 영향을 받는다 (Ashmore, et al., 1992). 본 연구에서는  $\lambda$ 는 ISO 6336-1에서 제시한 기어 열처리 침탄 굽힘 피로 손상지수 기준 값인 8.738로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 작업 부하

엔진 토크 모니터링 결과, 엔진 토크 및 회전속도는 그림 7과 같이 나타났다. 엔진 토크는 표 2와 같이, 로타리 작업구간에서 최대 336.0 Nm, 최소 40.0 Nm, 평균 234.4 Nm, 표준편차 59.3 Nm로 나타났으며, 선회구간에서는 최대 288.0 Nm, 최소 112.0 Nm, 평균 134.6 Nm, 표준편차 23.7 Nm로 나타났다. 선회구간에서는 작업기를 들고 진행하였으며, 작업구간에서 엔진 토크는 PTO를 통해 토양을 경운하기 때문에, 트랙터 부하가 높게 발생한 것으로 판단된다. 엔진 회전속도는 로타리 작업구간에서 최대 2,505 rpm, 최소 2,256 rpm, 평균 2,387 rpm, 표준편차 202 rpm으로 나타났으며, 선회구간에서 최대 2,477 rpm, 최소 2,367 rpm, 평균 2,462 rpm, 표준편차 12 rpm으로 나타났다.

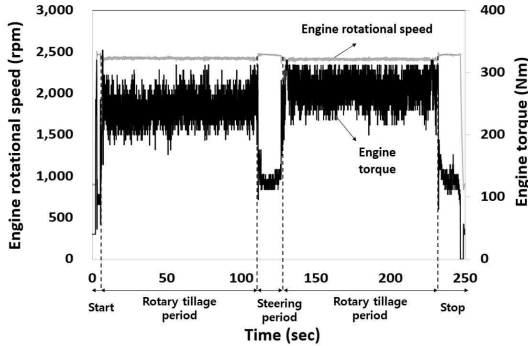


그림 7. 로타리 작업 시 엔진 토크 및 회전속도  
Fig. 7. Representative measured engine torque and rotational speed during rotary tillage

표 2. 통계 분석  
Table 2. Statistical analysis

		Max.	Min.	Avg. ±S.D.
Rotary tillage period	Torque (Nm)	336.0	40.0	234.4 ±59.3
	Rotational speed (rpm)	2,505	2,256	2,387 ±202
Steering period	Torque (Nm)	288.0	112.0	134.6 ±23.7
	Rotational speed (rpm)	2,477	2,367	2,462 ±12

### 3.2 등가 토크 및 속도

계측한 토크 데이터는 로타리 작업 시 최대 토크와 최소 토크의 차이는 336 Nm로 나타났다. 식 (1)을 이용하여 등가 토크로 산출하였으며, 계산 과정은 다음과 같다.

계측한 전체 데이터 범위를  $i$ 개의 간격으로 나누고 각 범위 안에 있는 데이터의 수를 작용 시간비  $h_i$ 로 설정하였다. 각 범위 안에 있는 토크와 회전속도의 평균을  $T_i$ ,  $n_i$ 라 하고, 회전 속도와 작용 시간비를 곱한 값을  $L_i$ 로 설정하였다. 각 범위의  $L_i$ 를 구한 다음, 전체  $L$ 에서 각각의  $L_i$ 의 비율을  $f_i$ 로 설정하였다. 각 범위의  $T_i^\lambda$ 와  $f_i$ 를 모두 합한 값을 다시  $\frac{1}{\lambda}$ 제곱 하여 등가 토크를 계산하였다. 등가 속도는 식 (2)와 같이 작용 시간비  $h_i$ , 각 범위의 회전

속도  $n_i$ , 각 범위의 토크의  $\lambda$ 제곱 값  $T_i^\lambda$ 를 곱한 값을 모두 더하고 등가 토크  $f_i T_i^\lambda$ 로 나누어 계산하였다. 그 결과, 작업 단수 L3단(2.38 km/h), PTO 1단(540 rpm)에서 로타리 작업구간의 등가 토크 및 속도는 각각 229.2 Nm, 2,274 rpm으로 나타났으며, 선회구간의 등가 토크 및 속도는 136.7 Nm, 2,464 rpm으로 나타났다.

### 3.3 부하 분석

로타리 작업 및 선회구간의 등가 토크를 계산한 후, 로타리 작업구간에서 계측된 부하 데이터의 최대 및 평균 토크, 엔진의 최대 및 정격 토크와 각각 비교하였다. 그 결과, 그림 8과 같이 나타났다. 로타리 작업구간의 등가 토크는 로타리 작업 구간에서 계측된 부하 데이터의 최대 및 평균 토크보다 각각 47%, 2% 낮게 나타났으며, 엔진의 최대 및 정격 토크보다 각각 69%, 41% 낮게 나타났다. 선회구간의 등가 토크는 로타리 작업구간에서 계측된 부하 데이터의 최대 및 평균 토크보다 각각 146%, 71% 낮게 나타났으며, 엔진의 최대 및 정격 토크보다 각각 183%, 136% 낮게 나타났다.

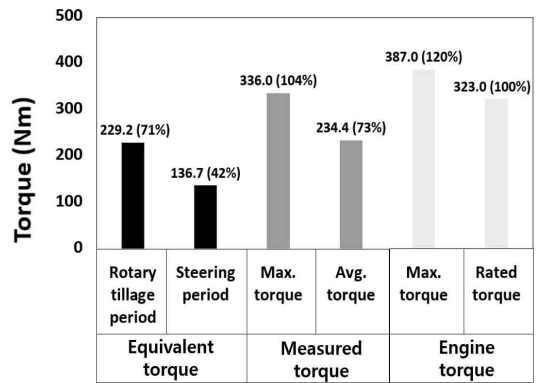


그림 8. 등가 토크(작업, 선회) 결과값 비교  
Fig. 8. Comparison of equivalent torque(Rotary tillage period, Steering period)

## 4. 결론

본 연구는 트랙터 변속기의 성능평가, 내구성 향상 및 최적 설계를 위한 기초 연구로서 로타리 작업

시 엔진 토크를 측정하고, 등가 토크로 계산하여 비교 분석 하였으며, 그 주요 결과는 다음과 같다.

1. 78 kW 급 트랙터의 로타리 작업 시 엔진 토크 및 회전속도를 CAN 통신을 이용하여 수집 하였다.
2. 예측된 데이터를 Palmgren-Miner 식을 이용하여 등가 토크를 계산한 결과, 작업 및 선회 구간에서 각각 229.2, 136.7 Nm로 나타났다.
3. 로타리 작업구간의 등가 토크는 로타리 작업 구간에서 예측된 부하 데이터의 최대 및 평균 토크보다 각각 47%, 2% 낮게 나타났으며, 엔진의 최대 및 정격 토크보다 각각 69%, 41% 낮게 나타났다. 선회구간의 등가 토크는 로타리 작업구간에서 예측된 부하 데이터의 최대 및 평균 토크보다 각각 146%, 71% 낮게 나타났으며, 엔진의 최대 및 정격 토크보다 각각 183%, 136% 낮게 나타났다.
4. 로타리 작업에서의 등가 토크는 국내 트랙터 변속기 설계 기준인 엔진의 정격 토크보다 낮게 나타났으며, 실제 농작업 시 발생하는 등가 토크를 고려한다면 변속기 최적 설계를 통하여 원가 절감이 가능할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] D. C. Kim, Y. S. Kang, "Case study of accelerated life test method for agricultural tractor transmission", *Journal of biosystems engineering*, Vol. 34, No. 5, pp. 325-330, 2009.
- [2] K. J. Sim, W. Y. Cho, Y. J. Lee, "Development on Test Specification of Reliability of Agricultural Tractor", *The Korean Society of automotive engineers*, Vol. 2011, No. 9, pp. 43-48, 2011.
- [3] K. H. Han, K. U. Kim, Y. G. Wu, "Severeness of transmission loads of agricultural tractor for rotary operations in poorly drained paddy field", *Journal of biosystems engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 293-300, 1999.
- [4] J. H. Jang, "Durability analysis of compound planetary gear of hydro mechanical transmission", Master dissertation, Chungnam National Univ., Daejeon, Korea. 2018.
- [5] Y. J. Park, G. H. Lee, S. C. Kim, "Accelerated Life Test Method for Agricultural Tractor Transmission Part I : Equivalent Load Method", *The Korean society of the agricultural machinery*, Vol. 20, No. 2, pp. 86-87, 2015.
- [6] D. Y. Kim, I. B. Lee, L. J. Liang, S. K. Lyu, "A Study on Components Load of 5MW Wind Turbine Pitch Drive" *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*. Vol. 13, No. 1, p.p 115-120. 2014.
- [7] W. Jung, A. Ismail, "Method of Determining Acceleration Factors for Agricultural Tractors" *International Conference on Quality, Reliability, Maintenance and safety engineering*. 2011.
- [8] K. Thomsen, P. Sorensen, "Fatigue loads for wind turbines operating in wakes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol. 80, No. 1999, p.p :121-136. 1999.
- [9] MAFRA, "Development of Optimal Tillage System Based on Soil Physical Properties", Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea, 2007.
- [10] J. H. Kim, K. U. Kim, C. W. Choi, Y. G. Wu, "Severeness of Transmission Loads of Agricultural Tractors", *The*

Korean society of the agricultural machinery, Vol. 23, No. 5, pp. 417-426, 1998.

- [11] S. H. Baek, K. Y. Lee, S. J. Mun, S. S. Cho, W. S. Joo, "Fatigue Cumulative Damage and Life Prediction of Uncovered Freight Car Under Service Load using Rainflow Counting Method", Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 2, pp. 1-9, 2005.
- [12] S. C. Ashmore, A. G. Piersol, J. J. Witte, "Accelerated service life testing of automotive vehicles on a test course", Vehicle System Dynamics. Vol. 21, pp. 89-108. 1992.
- [13] Standard ISO 6336-1, "Calculation of load capacity of spur and helical gears" Geneva, Switzerland. 2007.

**박 성 운(Seong-Un Park)**

[정회원]



<관심분야>

- 2007년 7월 ~ 현재 : 동양물산기업 (주) 중앙기술연구소
- 2016년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 농업기계공학과 (박사과정)

신뢰성 시험 평가

**김 용 주(Yong-Joo Kim)**

[정회원]



<관심분야>

- 2004년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (공학박사)
- 2013년 1월 ~ 2014년 2월 : LS엔트론 중앙연구소 동력기계기술그룹 그룹장
- 2014년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 바이오시스템기계공학과 교수

농업 동력 및 트랙터, 부하계측

저자약력

**백 승 민(Seung-Min Baek)**

[학생회원]



<관심분야>

- 2018년 8월 : 충남대학교 바이오시스템기계공학과 (공학사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 농업기계공학과 (석사과정)

부하계측, 동력전달시스템 해석

**김 완 수(Wan-Soo Kim)**

[정회원]



<관심분야>

- 2016년 2월 : 충남대학교 바이오시스템기계공학과 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 농업기계공학과 (석·박사통합과정)

농업 동력 및 트랙터, 부하계측