

스마트 온실 로봇 구동부의 신뢰성 분석연구

김 경 철*, 홍 영 기*, 김 국 환*, 권 경 도*, 양 창 주*, 이 기 범*, 이 강 진*

Reliability Analysis Study of Robot Driving for Smart Greenhouse

Kyoung-Chul Kim*, Youngki Hong*, Gookhwan Kim*, Kyung-Do Kwon*,
 Changju Yang*, Ki-Beom Lee*, Kangjin Lee*

요 약

최근 농업 생산을 위한 로봇 적용 연구가 증가하고 있다. 이는 급격한 기후변화와 사회적인 문제들 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 스마트 온실에서 활용되는 방제, 운반 로봇의 구동 플랫폼에 대한 신뢰성 분석을 통해 로봇의 품질향상을 목표로 한다. 우선 경제성 기반의 기대수명을 5년을 산출하였다. 그리고, 고장 해석을 통한 예상 고장률을 산출하여 요구수명을 산출할 수 있었다. 이를 통하여 농업 로봇의 특성을 고려한 가속 수명 시험 방법을 제시하였다. 본 연구를 통하여 스마트 온실 로봇 구동부의 품질향상을 위한 주요 부품에 대한 최소 요구 조건을 설정하는데 기초 자료로 활용할 계획이다.

키워드 : 농업로봇, 스마트 온실, 구동부, 신뢰성, 가속 수명 시험

Key Words : Agricultural Robot, Smart Greenhouse, Driving Module, Reliability, Accelerated life test

ABSTRACT

Recently, research on the application of robots for agricultural production has been increasing. This is due to rapid climate change and social problems. For this reason, This study aims to improve the quality of Transport & Pest control robots through reliability analysis used in smart greenhouses. First, We calculated an economic life expectancy of 5 years. In addition, The expected failure rate through fault analysis could be calculated to calculate the required life. Through this, An accelerated life test method considering the characteristics of agricultural robots was presented. Through this study, It is planned to be used as basic data to set the minimum requirements for major components for quality improvement of the smart greenhouse robot driving part.

I. 서 론

최근 급격한 기후변화 및 다양한 사회적 변화 현상 (고령화, 팬데믹 등)이 농업에 많은 변화를 주고 있으며,

이를 대비하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다^[1]. 기후변화에 대비하기 위해 원격 또는 자동으로 작물의 생육환경을 적정하게 유지 및 관리할 수 있는 스마트 온실^[2]에서의 재배 기술이 급증하고 있으며, 2022년 기

※ 본 연구는 농촌진흥청 연구사업(PJ01587501)의 지원을 받아 연구되었습니다.

♦ First Author : Division of Smart farm Development, National Institute of Agricultural Sciences, kkmole@korea.kr, 정희원

° Corresponding Author : Division of Smart farm Development, National Institute of Agricultural Sciences, kkmole@korea.kr, 정희원

* Division of Smart farm Development, National Institute of Agricultural Sciences

논문번호 : 202307-147-0-SE, Received June 5, 2023; Revised August 7, 2023; Accepted August 9, 2023

준 국내에 보급된 스마트 온실의 면적은 약 7,000ha로 보급률 또한 매년 증가하고 있다. 스마트 온실 재배 기술이 발전함에 따라 농작업에 대한 자동화, 무인화 요구가 증대하고 있다³⁾. 일반 시설재배에서 스마트 온실로 전환되는 경우 생산량 증가, 생산비 감소 및 상품화율 증가 등의 장점으로 인하여 스마트 온실로 전환하는 농가가 증가하고 있다⁴⁾. 스마트 온실의 경우 기존 온실에 비해 생산량이 단위 면적대비 생산량이 증가하고 있어, 더 많은 노동력이 요구되고 있다. 또한, 최근 신규 스마트 온실의 경우 기존 온실 대비 로봇을 활용할 수 있는 환경조건이 좋아지고 있어 자동화 및 로봇화 적용 가능성이 향상되고 있다. 이러한 이유로 스마트 온실에서 사용되는 로봇의 국내 연구의 경우 방제 로봇⁵⁾, 운반 로봇⁶⁾, 모니터링 로봇⁷⁾ 등이 진행되었다.

최근까지 농업의 목적은 식량 생산 기능이었다면 앞으로의 농업의 목적은 다원적 기능 수행이다. 더 이상 농업인구는 농사만을 수행하는 인력이 아니라는 뜻이다. 목적에 걸맞게 현대 농업은 지속 가능한 형태로 변화하고 있으며, 농업을 둘러싼 전·후방 산업의 역시 문화적, 환경적 요인을 배제할 수 없게 되었다. 이러한 이유로 스마트팜 도입, 농작업 자동화, 로봇 농작업기 도입과 같은 지능형 농업의 활성화를 통해 농업 인력 효율성을 상승시키고자 한다⁸⁾.

이러한 이유로 본 연구에서는 연동형 스마트 온실을 위해 개발되고 있는 로봇 구동 플랫폼에 대해 경제성 분석을 통한 기대수명을 도출하고 이를 바탕으로 신뢰성을 평가하기 위한 주요 부품 선정 및 수명 시험방법을 제시하고자 한다.

II. 온실 구조 및 로봇 구성

본 연구의 분석을 위한 온실 조건은 그림 1과 같은 형태이다. 내재해 규격 12-연동-1 온실로, 온실의 특징으로는 작물 재배 공간 앞에는 약 3m 정도의 콘크리트 노면 공간이 있으며, 작물과 작물 사이에는 난방용 온수 파이프가 설치되어 있다.

그림 2는 스마트 온실 환경을 고려하여 개발된 로봇



그림 1. 스마트 온실 내부 모습
Fig. 1. Inside view of smart greenhouse

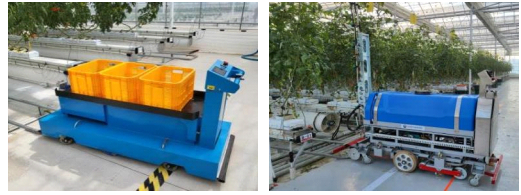


그림 2. 주요 대상 로봇
Fig. 2. Main target robot

이다. 콘크리트 노면과 난방용 온수 파이프에서 원활한 구동을 위해 이중 바퀴를 가지고 있으며, 좁은 공간에서도 원활한 조향이 가능한 조향 방식인 스키드 방식을 채택하고 있다⁹⁾.

로봇 구동부의 무게는 배터리 포함 약 250kg이다. 운반 로봇의 경우 최대 적재량은 320kg이며, 방제 로봇은 농약 적재량이 300kg(300ℓ)이다. 로봇의 작업시간은 최대 적재량 기준 10시간 연속 동작이 가능하다.

III. 신뢰성 분석

신뢰성은 통계를 기반으로 제품의 품질을 높이기 위한 공학적인 방법이다. ‘신뢰성 공학’은 제품의 고장 발생 문제를 해결하기 위해 출발한 학문으로, 얼마나 자주 고장이 발생하는가를 척도화한 ‘고장률’과 고장까지의 시간을 척도화한 ‘수명’이 주요 측정 수단이다¹⁰⁾. 이를 위해 스마트 온실에서 활용되는 로봇의 신뢰성 분석을 위해 기대수명과 고장 정도를 분석하고자 한다.

3.1 기대수명 분석

로봇을 구매하는 소비자(농민)는 로봇의 성능을 평가할 때 사람대비 작업 효과로 상품성을 판단한다. 아울러 경제성을 판단할 때는 투자 비용 대비 효과로 판단하게 되는데 이를 위해, 경제적인 이익이 발생하는 기간을 산출하여 기대 수명을 도출하였다. 이를 위해 작업자(사람)이 동일 조건에서 작업을 수행하였을 때 발생하는 시간 및 비용과 로봇을 활용한 작업에 대한 시간과 비용을 비교하였다. 비교 대상 온실은 현재 전국적으로 가장 많이 보급되고 있는 중소형 온실 약 1,400평(약 4,600m²)의 온실을 대상으로 분석하였다.

운반 로봇의 경우 대상 목표 가격을 1,500만원, 방제 로봇은 2,500만원 책정하였다. 이때, 농업인이 농업기계 구입에 대한 농가 보조금 또는 저리 융자 대출 여부를 적용하지 않았다. 운반 로봇의 감가상각을 표1과 같이 도출되었다. 이때 운반 로봇의 내용연수는 5년(농업기계화 촉진법 시행규칙 별표2 농업기계의 내용연수 중 재배 관리용 기계) 잔존가액은 20%로 설정하였다. 다음

의 수식을 활용하여 감가상각비 및 상각률을 동일한 방법으로 방제 로봇의 감가상각을 표2와 같이 도출하였다.

$$\text{감가상각비} = (\text{취득가액} - \text{상각누계액}) \times \text{상각률} \quad (1)$$

$$\text{상각률} = 1 - \sqrt[n]{\frac{\text{잔존가치}}{\text{취득원가}}}, \quad n = \text{내용연수} \quad (2)$$

표1, 2와 같이 감가상각 방법은 정률법을 적용하였으며 비율은 취득원가의 5%로 설정하였다. 대상 작물을 토마토로 적용하여 작업자의 요구 임금을 계상하였다. 정식 되는 토마토는 약 2,480주 이다. 1화방에 평균 4개가 착과 된다고 가정할 경우 했을 때 9,920개의 토마토를 1주일에 수확한다. 주 5일 근무 기준 1일 토마토 수확 개수는 평균 1,980개이며, 1일 수확 하는 토마토의 총무게는 약 238kg이다. 로봇은 1회 운반 가능 최대무게는 320kg에 비해 작업자의 1회 운반 가능 최대무게는 80kg으로 로봇은 1일 1회 운반으로 작업이 가능하지만, 사람은 1일 최소 3회 이상 추가 운반 작업이 필요하다. 로봇 운반 작업 대비 최소 1명 이상의 운반 작업을 위한 사람이 필요로 하게 된다. 방제작업의 경우 수작업은 방제작업, 호스 공급작업 각 1인 총 2인이 필요하다. 작업자 임금은 표 3과 같이 최근 3년간 최저임금 상승

표 1. 운반 로봇의 감가상각비와 가치
Table 1. Depreciation and Residual Value of Transport Robot

	Depreciation	Residual Value(Price)
0~1 year	₩0	₩15,000,000
1~2 years	₩3,921,890	₩11,078,110
2~3 years	₩2,896,475	₩8,181,635
3~4 years	₩2,139,165	₩6,042,470
4~5 years	₩1,579,860	₩4,462,610
5~6 years	₩1,166,791	₩3,295,819

표 2. 방제 로봇의 감가상각비와 가치
Table 2. Depreciation and Residual Value of Pest control Robot

	Depreciation	Residual Value(Price)
0~1 year	₩0	₩25,000,000
1~2 years	₩6,536,483	₩18,463,517
2~3 years	₩4,827,459	₩13,636,058
3~4 years	₩3,565,275	₩10,070,784
4~5 years	₩2,633,100	₩7,437,684
5~6 years	₩1,944,652	₩5,493,032

를 평균값 2.2%를 적용하였으며 작업 시기에 따라 작업량이 결정되므로 일반적으로 농가에서는 일당 계산법을 사용하여 선택적으로 작업자를 고용하는 경우가 있어, 로봇 기대수명 5년에 대한 일당 계산법과 최저임금법을 모두 고려하였다. 단 방제작업의 경우 위험한 작업으로 위험수당 10%를 가산하여 적용하였다.

인력 절감으로 얻는 직접적인 이익을 산정할 때는 기간은 표 4와 같이 1년 단위로 산정하였으며, 운반 로봇 작업자 모두 1년 단위에 대한 이익을 산출하였다.

방제 로봇의 경우 로봇 사용시 인건비가 발생하지 않는 것으로 산출하였다. 산출 결과 일당계산법과 최저임금법 모두 기대 수명 5년 이내 경제적 편익 1을 초과하는 결과를 표 5와 같이 얻었다.

운반로봇의 비용 편익은 그림 3과 같이 도출되었다. 최저임금법 적용시 2년 초과 사용시, 일당 계산법 적용시 2.8년 초과 사용시 경제적 편익 1을 초과 할 수 있었다. 운반 로봇의 내용 연수 5년을 모두 만족하는 결과이

표 3. 작업자 1인 비용
Table 3. Worker Salary for one person

	Charge per day	law of min. salary
0~1 year	₩16,800,000	₩21,869,760
1~2 years	₩17,169,600	₩22,350,895
2~3 years	₩17,547,331	₩22,842,614
3~4 years	₩17,933,372	₩23,345,152
4~5 years	₩18,327,906	₩23,858,745

표 4. 운반 로봇 구매시 절감 이익
Table 4. Benefits of saving using Transport Robot

	Charge per day	law of min. salary
0~1 year	₩1,800,000	₩6,869,760
1~2 years	₩6,091,490	₩11,272,785
2~3 years	₩9,365,696	₩14,660,979
3~4 years	₩11,890,902	₩17,302,682
4~5 years	₩13,865,296	₩19,396,135

표 5. 방제 로봇 구매시 절감 편익
Table 5. Benefits of saving using Pest control Robot

	Charge per day	law of min. salary
0~1 year	₩11,960,000	₩23,113,472
1~2 years	₩19,309,603	₩30,708,452
2~3 years	₩24,968,070	₩36,617,693
3~4 years	₩29,382,627	₩41,288,543
4~5 years	₩32,883,703	₩45,051,549

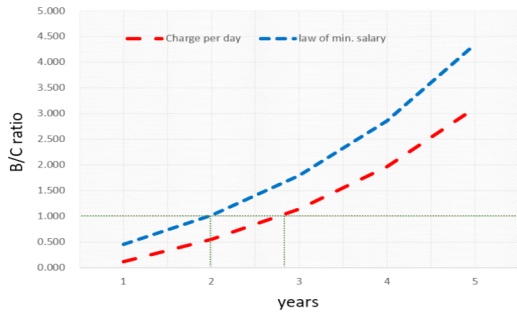


그림 3. 작업자 임금에 따른 경제 효과(운반로봇)
Fig. 3. Economic benefits of work's salary(Transport robot)

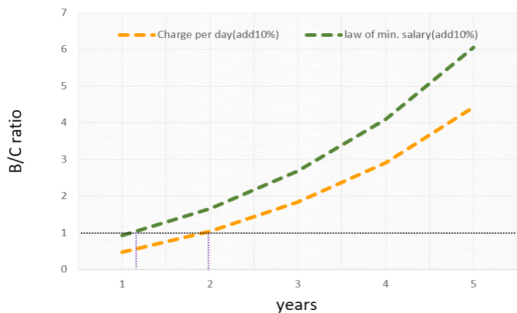


그림 4. 작업자 임금에 따른 경제 효과(방제로봇)
Fig. 4. Economic benefits of work's salary(Pest control robot)

며, 5년 동안 로봇을 활용했을 때 최저임금 적용 시 약 3배의 효과를 얻을 수 있다. 이는 로봇이 5년 동안 작업자 3명 이상의 역할 수행이 가능할 것으로 분석된다.

방제로봇의 비용 편익은 그림 4와 같이 도출되었다. 최저임금법 적용시 1.2년 초과 사용시, 일당 계산법 적용시에는 2년 초과 사용시 경제적 편익 1을 초과 할 수 있었다. 방제 로봇의 경우에는 운반 로봇 대비 작업자의 의존도가 높고, 작업 안전이 고려되어야 하기에 도입 가격이 높지만 유사한 결과가 도출된 것으로 분석된다. 또한 방제 로봇의 경우 2인 1조로 작업하기 때문에 로봇이 5년 동안 작업자 8명 이상의 역할 수행이 가능할 것으로 분석된다.

3.2 고장 해석

스마트 온실 로봇 구동부에 대한 고장 분석은 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety)의 관계를 고려하여 총 시간(수명)을 계산하여야 한다¹⁰⁾. 일반적인 제품의 경우 고장 발생 이전 사용 가능한 평균 시간 MTBF(Mean Time Between Failures)과 수리를 위해 사용하지 못하는 시간

MTTR(Mean Time to Repair)의 반복을 고려하여 가용도 척도인 고유 가용도를 산출할 수 있다.

$$MTBF(\text{평균고장시간}) = \frac{\sum_i (\text{작동시간})_i}{\text{총고장횟수}} \quad (4)$$

$$MTTR(\text{평균수리시간}) = \frac{\sum_i (\text{수리시간})_i}{\text{총고장횟수}} \quad (5)$$

$$\text{고유가용도} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6)$$

본 연구에서는 2년 동안 전북 익산시에 위치한 월화 수목금토마토 농가에서 로봇(운반, 방제) 활용에 따른 평균 고장 횟수와 수리 시간을 측정된 결과 고장 횟수는 운반로봇 2회 총 수리 시간 약 30분, 방제로봇 6회 총 수리 시간 약 1.5시간 1일 평균 사용 시간 (6시간)을 고려한 고유 가용도는 운반로봇 약 99.8%, 방제 로봇은 96.4%로 산출되었다. 이는 수리가 가능한 고장에 대해서는 크게 고려하지 않아도 될 정도의 결과이다. 그러나 주요 부품 중 모터, 자율주행 센서 및 제어기 고장의 경우에는 현장 수리가 어렵고 추가의 수리 비용이 발생할 수 있어, 신뢰 수명 또는 보증 시간을 결정하는 주요 부품으로 선정하였다. 주요 부품에 대해 수명 분석을 통해 신뢰성 척도를 확인할 수 있다. 이를 위해서는 다양한 수명 평가용 척도가 사용되고 있다. 그중, 대표적인 척도로는 표 6과 같은 방법들이 있다¹¹⁾.

표 6. 신뢰성 척도 인자
Table 6. Reliability scale factor

Type	Description
Confidence probability($R(t)$)	Analysis of the probability that an item will work after a certain point in time ($R(t) + F(t) = 1$)
Uncertainty probability($F(t)$)	Analysis of the probability that an item will fail before a certain point in time ($R(t) + F(t) = 1$)
Probability density($f(t)$)	Probability of failure in a particular section(Integral calculation)
Failure Rates	The failure rate of items per unit time ($\lambda(t) + h(t)$)
Mean Life	The average time expected to normal operation (MTTF or MTBF)
Reliable Life	Estimated life time at 'Target Reliability' (Warranty Time)
Bx Life	Estimation time when the probability of failure is a certain value

로봇 구동부의 경제적인 기대 수명 5년에 고유 가용도를 고려한 추정 고장 확률을 적용하여 최종 수명을 산출할 수 있다. 고장 확률은 보수적으로 책정하였으며, 운반로봇 1%, 방제 로봇 4%로 추정하였다. 이는 운반로봇의 경우 완성품 기본 B5, 방제 로봇은 B20으로 설정하였으며^[12], 이는 목표 수명 5년동안 누적 고장률이 운반 로봇은 1% 미만, 방제 로봇은 4% 미만을 의미한다.

IV. 가속 수명 시험방법

3장에서 도출된 신뢰성 분석 기반의 수명을 기준으로 주요 부품에 대한 가속 수명 시험을 위한 시험 기준 및 방법 수립이 필요하다. 로봇 구동부의 주요 부품으로는 구동 모터, 제어기 그리고 자율주행 센서류가 있다. 이중 본 논문에서는 구동모터에 대한 가속 수명 시험 방법을 제시하고자 한다.

시험시간을 단축시킬 목적으로 사용조건보다 가혹한 조건에서 수행하는 시험을 가속시험이라 한다. 가속 시험은 가속수명시험과 가속스트레스시험으로 구분할 수 있다^[13]. 본 연구에서는 농업용 로봇 구동부에 주로 사용되는 BLDC 모터를 대상으로 사용률을 높이고 동시에 과부하를 인가하는 방법을 적용하고자 한다. 이는 사용조건에서 요구수명을 측정하는 방법으로 주요 사용되고 있다^[14]. 구동 모터의 수명을 산출하기 위해 운반 로봇과 방제로봇의 사용 시간을 산출하였다. 1일 평균 6시간 작업을 기준으로 연간 운반로봇의 총 작업시간은 480시간, 방제 로봇의 최소 작업 시간은 170시간으로 도출되었다. 농업기계화 촉진법 시행규칙에 명시되어 있는 재배관리용 기계의 기대 수명 5년을 고려하면 BLDC 모터의 요구 수명은 최소 2,400시간이다. 이를 신뢰 수준 80%를 보장하기 위한 무고장 합격 기준을 만족하는 시험 시간의 계산은 다음 식(7)과 같다.

$$t_n = B_{10p} \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$= 2,400 \left[\frac{\ln(1-0.8)}{2 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (7)$$

$$= 13062.206$$

- t_n : 무고장시험시간
- B_{10p} : 보증수명
- CL : 신뢰수준 (80%)
- n : 시험아이템 개수
- p : 불신뢰도 (B_{10} 의 의 경우 0.1)
- β : 형상모수 (모터의 경우 1.2)

일반적인 모터 시험의 경우 “가속 → 감속” 과 같은 빠른 운전 사이클을 적용하나^[15] 농업용 로봇의 경우 대부분 4% 미만의 저속에서 이동하기 때문에 모터의 속도보다는 고중량 물체를 적재하고 이동하는 빈도가 높기에 모터에 작용하는 부하를 고려한 시험이 적합하다. 모터 부하 가중시 공급되는 전류가 증가하기 때문에 상시 전류값과 최대 전류값을 고려하여 가속 계수를 구하고자 한다. 이에 가속계수는 다음 식(8)과 같이 산출하였으며, 이때 필요한 가속 수명 시험 시간은 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$AF = \left(\frac{I_{max}}{I_Q} \right)^m = \left(\frac{7.25}{1.2} \right)^2 = 36.50$$

AF : 가속계수
 I_{max} : 최대 전류 부하량
 I_Q : 평시 전류 부하량
 m : 시험아이템 개수 (2개)

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} = \frac{13062.206}{36.50} = 357.87 \quad (9)$$

위와 같이, 시료수 2개를 357.87시간 가속 수명 시험 후, 모두 고장이 없어야 신뢰 수준 80%에서 작동시간 2,400시간을 보장하게 된다. 가속 시험 시간을 단축하기 위해서는 시료수를 증가시켜 실험할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 국내 스마트 온실의 자동화, 로봇화를 위한 로봇 구동부의 품질향상을 위한 신뢰성 분석을 수행하였다. 현재 국내 스마트 온실에서 활용성이 높은 방제 로봇과 운반 로봇을 대상으로 하였다.

이를 위해 경제성 기반의 기대수명과 고장 해석을 통한 최종 요구수명을 산출하였다. 산출된 기대수명은 5년을 만족하였으며, 로봇의 고장 해석을 통한 가용률을 산출하고 예상 고장률을 도출하였다. 이를 기반으로 요구수명을 산출할 수 있었다. 또한, 요구수명에 대해 농업 로봇의 특성을 고려한 가속 수명 시험 방법을 제시하였다.

본 연구를 통하여 스마트 온실 로봇 구동부의 품질향상을 위한 주요 부품인 모터의 최소 요구 조건을 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 본 연구를 통해 개발되어진 지표들을 통하여 실제 가속 수명시험을 수행할 예정이다.

References

- [1] K. C. Kim, B. H. Cho, K.-D. Kwon, and Y. Hong, "Hardness analysis of design of harvesting robot gripper in hydroponic greenhouse," *J. KICS*, vol. 47, no. 11, pp. 1983-1989, 2022.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.11.1983>)
- [2] Y. G. Park, S. Baek, J. S. Im, M. J. Kim, and J. H. Kim, "Present status of smart greenhouses growing fruit vegetables in Korea: Focusing management of environmental conditions and pests in greenhouses," *Korean J. Applied Entomology*, vol. 59, no. 1 pp. 55-64, Feb. 2020.
(<https://doi.org/10.5656/KSAE.2020.02.1.061>)
- [3] M. J. Kim, Y. H. Kim, W. K. Kim, K. B. Lee, B. H. Cho, Y. Hong, and K. C. Kim, "Implementation of facility greenhouse oriental melon harvesting robot manipulation technology through visual servoing," *J. KICS*, vol. 47, no. 11, pp. 1998-2006, 2022.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.11.1998>)
- [4] Y. J. Kim, J. Y. Park, and Y. G. Park, "An analysis of the current status and success factors of smart farms," Research Report, p. 51, Korea Rural Economic Institute(KREI), Korea, 2016.
- [5] K. C. Kim, B. S. Ryuh, S. Lee, G. Kim, M. Lee, Y. Hong, H. Kim, and B. K. Yu, "The study on evaluation method of pest control robot requirements for smart greenhouse," *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, vol. 20, no. 10, pp. 318-325, 2019
(<https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.10.318>)
- [6] I. Jang, S. H. Yang, D. Y. Lee, and D. Choi, "Development of agricultural work management system based on real-time acquisition of labor data using unmanned transfer robots," *J. Inst. Control, Robotics and Syst.*, vol. 24, no. 11, pp. 1014-1019, 2018.
(<https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2018.18.0167>)
- [7] D. Seo, B. H. Cho, and K. C. Kim, "Development of monitoring robot system for tomato fruits in hydroponic greenhouses," *Agronomy*, vol. 11, 2211, 2021,
(<https://doi.org/10.3390/agronomy11112211>)
- [8] Y. Kang, D. Seo, Y. Hong, I. Choi, G. Kim, K. D. Kwon, and K. C. Kim, "Economic analysis of using transport robot in smart farm," *Spring Conf. KAIS*, vol. 22, no. 1, pp 759-760, 2021.
- [9] K. C. Kim, C. W. Yang, K. J. Kim, and B. S. Ryuh, "Development of four-wheel independent steering driving platform for agricultural robot," *J. Korean Soc. Precision Eng.*, vol. 28, no. 8, pp. 942-950, 2011.
- [10] "Linkage between Technology Development and Reliability evaluation," Korean Agency for Technology and Standards, p. 13, Aug. 2004.
- [11] I. S. Song, "Quality bible : Reliability analysis," *Korean Studies Information Service System*, 2017. ISBN : 978-89-268-7842-2
- [12] D. S. Yoo, "Reliability and quality technology for product success," *Korea Institute for Robot Industry Advancement*, 2011. ISBN : 978-89-6234-040-2
- [13] "Explanation of Reliability Terms," Korean Agency for Technology and Standards, 2003.
- [14] Y. K. Kim, S. H. Kim, H. W. Kim, and H. S. Mok, "Accelerated life test of in-wheel motor for mobile robot," *J. Power Electronics*, vol. 15, no. 6, pp. 498-505, 2010.
- [15] J. M. Hu, D. Barker, A. Dasgupta, and A. Arora, "Role of failure-mechanism identification in accelerated testing," *J. IES*, pp. 39-45, Jul./Aug. 1993.

김 경 철 (Kyoung-Chul Kim)



2015년 8월 : 전북대학교 정밀기계공학과 박사
2016년 7월~2019년 1월 : 농업기술실용화재단 연구원
2019년 2월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구사
<관심분야> 농업로봇, 농업 인공지능

[ORCID:0000-0001-6699-881x]

홍 영 기 (Youngki Hong)



2004년 3월 : 일본 동경농업대 생물환경조절학전공 박사
2007년 3월~2021년2월 : 국립농업과학원 농업연구사
2021년 3월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구관
<관심분야> 영상처리, 기계학습, 인공지능

[ORCID:0000-0002-9772-9820]

김 국 환 (Gookhwan Kim)



2010년 2월 : 경희대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
2010년 3월~2014년 12월 : 농촌진흥청 국립농업과학원 PostDoc.
2015년 1월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구사
<관심분야> 농업로봇, 자율항법 기술

[ORCID:0000-0002-7278-3476]

권 경 도 (Kyung-Do Kwon)



2017년 2월 : 충남대학교 농업기계공학과 (공학석사)
2020년 9월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구사
<관심분야> 영상처리, 인공지능
[ORCID:0000-0003-1794-3438]

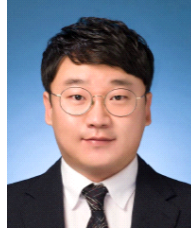
양 창 주 (Changju Yang)



2014년 8월 : 전북대학교 전자공학과 (공학박사)
2020년 3월~2022년 1월 : 국립농업과학원 박사후연구원
2022년 1월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구사

<관심분야> 농업로봇, 인공지능, 로봇제어
[ORCID:0000-0003-4909-2578]

이 기 범 (Ki-Beom Lee)



2021년 2월 : 전북대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
2022년 1월~ 2023년 2월 : 국립농업과학원 박사후 연구원
2023년 2월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구사
<관심분야> 강화학습, 객체인식, 디지털트윈

[ORCID:0000-0002-7251-0953]

이 강 진 (Kangjin Lee)



2007년 2월 : 서울대학교 농업기계공학과 (공학박사)
2020년 2월~2022년 12월 : 국립농업과학원 농업공학부장
1992년 7월~현재 : 국립농업과학원 스마트팜개발과 연구관
<관심분야> 영상처리, 농업로봇, 분광영상

[ORCID:0000-0001-6195-3735]