

다목적 직립형 스마트 고소작업차 설계 안정성 검증에 대한 연구

조재현*, 정진형**, 김승훈*, 이상식****

A Study on the Design Stability Verification of Multi-purpose Smart Elevation Work Vehicle

Jae-Hyun Jo*, Jin-Hyoung Jeong**, Seung-Hun Kim*, Sang-Sik Lee*

요약 최근 사과 등의 과수 농가의 재배 방법이 생산성 증가, 농약 살포 감소 등의 목적으로 수고가 높아지는 경향이 있고, 우리나라 고소작업차의 기술이 발전함에 따라 필리핀 등지의 동남아에서의 수요가 지속적으로 늘고 있으며 우리나라 농업용 고소작업차의 경우 대부분 3,300mm~3,800mm까지 작업대가 올라가 작업자가 작업할 수 있는 최대높이는 4.5m 정도까지에 불과하여, 더 높은 고소작업이 가능한 고소작업차는 수입에 의존하고 있다. 이에 본 논문에서는 5.5m 상승 7m 이상의 작업공간을 확보할 수 있는 붐 및 마스터 시스템을 조합한 다목적 직립형 스마트 고소작업차 개발을 위한 연구로서 고소작업차의 설계 및 설계 검증을 위한 구조해석과 이를 바탕으로 한 고소작업차 구현에 대한 논문이다.

Abstract Recently, fruit farms such as apples tend to have higher productivity and reduce pesticide spraying, and demand in Southeast Asia continues to increase as technology for high-grade work vehicles in the Philippines and Korea's agricultural high-grade work vehicles rise to 3,300mm to 3,800mm, so workers can work at only 4.5m. Therefore, this paper is a study to develop a multi-purpose upright smart high-altitude work vehicle that can secure a work space of more than 7m, up 5.5m, and a structural analysis for design and verification of Multi-purpose Smart Elevation Work Vehicle

Key Words : Fruit tree, Landscape architecture, Lift, Upright, High clearance working

1. 서론

세계 대부분의 지역에서 인구의 고령화는 낮은 출산율과 긴 기대수명으로 인한 일반적인 현상이며[1], 고령화는 논란의 여지 없이 생산가능인구 감소에 기초한 노동 참여에 부정적인 영향을 미친다[2]. 국내 고령인구 비중은 지속적으로 증가하여 2025년에는 20.3%에 이를 것이며 이는 우리나라가 초고령사회에 진입할 것으로 전망한다[3,4]. 이미 농촌의 고령인구는 2000년 21.7%로 초고령화에 진입하였으며[4] 농가경제조사(FHES)에 따르면, 2003년부터 2015년 사이 우리나라

농장주 평균 연령은 59.9세에서 68.3세로 증가했다[5]. 현재 미국 EU와 같은 선진국 외에도 전 세계를 대상으로 농촌 인구 감소 요인과 이로 인한 부작용을 극복하기 위한 논의가 활발히 이뤄지고 있으며 대표적으로 농촌지역의 매력도를 증가시키기 위한 국가의 지원[6], 도시와 농촌지역의 지역 클러스터 발전을 통한 경제적 연결 및 이주민과 난민은 농촌지역으로 수용하는 정책 등에 대한 대책을 제시하고 있다[7].

또한 농업기술 개발을 통해 농촌의 문제를 해소하고자 하는 방법들로 계속해서 제시되고 있으며 대표적

This study was supported by the Agency for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Technology Planning and Evaluation(121028022HD02022682121230000)

*Corresponding Author : Department of Biomedical Engineering, Catholic Kwandong University

**Department of Biomedical IT, Catholic Kwandong University

Received October 24, 2022

Revised November 18, 2022

Accepted December 11, 2022

으로 ICT 기반의 원격 환경관리 및 제어 등의 기능을 갖춘 스마트팜, 정밀 농업 등 스마트농기계 개발 등이 대표적이라 볼 수 있다. 위와 같은 상황은 과수 농가도 마찬가지라 볼 수 있다. 과수 농업 환경 개선을 위해서 자율주행, 영상인식 기술 등의 스마트 기술이 접목된 방제 로봇, 무인 제초 로봇, 로봇 팔 제어 기술을 활용한 자동 수확 로봇 등의 기술들이 개발되고 있다[8]. 본 논문은 과수 농가의 고소 작업환경 개선을 위한 고소작업차 개발에 대한 연구이다.

우리나라 과수의 대부분은 가공용 과실 생산이 목적인 유럽과 미국 등과는 달리 생식용 과실의 생산을 목적으로 하고 있으며 과실의 당도를 높이기 위해 일교차가 큰 고지대에 과원을 조성하는 것이 일반적이며, 물 빠짐의 원활함을 위해 약간의 경사를 주는 경우가 많다[9]. 이에 따라 제초 및 방제 이외 작업에 많은 노동력이 소요되고 있지만 대부분이 노동집약적이며 고소작업이 전체의 20~30% 이상으로 많은 부분을 차지한다[10]. 통상적으로 고소작업 진행을 위해 사다리를 이용하게 되지만, 작업자가 사다리를 오르내리고, 사다리를 이동하는 과정에서 번거롭고 시간이 많이 소요되며 간혹 사다리가 넘어지는 경우 등 안전사고의 위험이 있다[11]. 이에 고소작업 시 안정성 증진과 노동력 향상 목적으로 고소작업차가 개발되었으며 국내 보급이 많이 이루어진 상황이다. 국내 시판 중인 농용 고소작업차는 크게 수직 상승형과 붐형의 두 가지 형태로 구분된다[12~15]. 붐형의 고소작업차는 붐의 선단에 설치된 작업대가 승강하는 방식이며 작업대에는 작업자를 포함하여 100kg 정도를 적재할 수 있으며 차체의 주행, 작업대의 승강 및 붐의 좌우 선회 등의 조작이 가능하다. 이러한 붐 형태의 고소작업차는 적재 용량이 적으나 수관으로의 접근이 용이하고 작업 범위가 넓은 것이 특징이다[15~17]. 수직 상승식 과수원용 고소작업차는 X형의 암(arm)에 지지된 작업대를 지상고 0.8~2m의 범위에서 수직으로 승강할 수가 있으며 작업대는 작업자를 포함하여 250kg의 탑재 능력과 작업대 위에서 차체의 주행, 작업대의 승강 등의 조작을 할 수 있다. 수직 상승식 고소작업차는 작업자가 작업대로부터 수관 내부로 이동을 위한 디딤판이 되는 장출판이 설치되어 있고, 인출시 장출판을 전동

장치에 의해서 빼고 넣을 수 있는 것도 시판되고 있다. 이러한 타입은 작업대가 넓고 탑재력도 큰 것이 특징이고, 과수원 내 운반용으로도 이용할 수 있는 방식이다[15~17].

최근 사과 등 과수 작물의 재배 방법이 생산성 증가, 농약 살포 감소[18] 등의 목적으로 수고가 높아지는 경향이 있고, 우리나라 고소작업차의 기술이 발전함에 따라 필리핀 등지의 동남아에서의 수요가 지속적으로 늘고 있다. 그러나 우리나라 농업용 고소작업차의 경우 대부분 3,300mm~3,800mm까지 작업대가 올라가 작업자가 작업할 수 있는 최대높이는 4.5m 정도까지에 불과하여, 더 높은 고소작업이 가능한 고소작업차는 수입에 의존하고 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 5.5m 상승 7m 이상의 작업공간을 확보할 수 있는 붐 및 마스터 시스템을 조합한 다목적 직립형 스마트 고소작업차 개발을 위한 연구로서 고소작업차의 설계 및 설계 검증을 위한 구조 해석하고 이를 바탕으로 제품을 구현한 연구에 대한 논문이다.

2. 실험 방법

2.1 고소작업차 3D 설계

3D 모델링한 고소작업차는 다음 그림 1과 같다. 모델링 프로그램으로는 Inventor를 사용하였다.

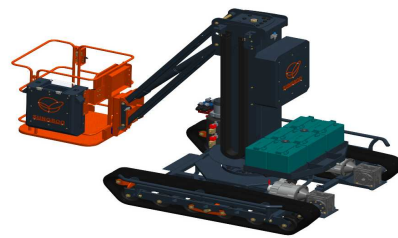


그림 1. 고소작업차 3D 모델링 도면

Fig. 1. Assembled aerial work vehicle 3D modeling

다음 그림 2는 고소작업차의 고소작업 시 기구부의 안정성에 대한 구조해석을 위해 간소화시킨 3D 설계도면이다.

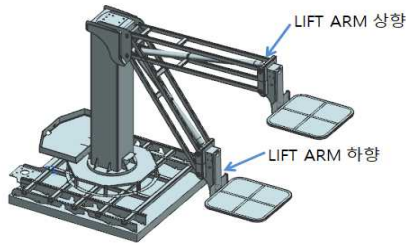


그림 2. 간소화한 모델링
Fig. 2. Operation test to secure working area

고소작업차의 마스트 및 붐 시스템에 대한 모델링 외에 차량의 주행부는 빔 형태로 간소화 시켰다. 각 단품 모델링을 수행하고 조립기능을 통해 조립 후 단품 도면의 조립조건과 조립 시 간섭을 체크하였다. 구조 해석을 위해 설정한 부품은 구조강(S45C) 소재를 적용하였으며 주요 물성치는 다음 표 1과 같다.

표 1. 구조강 (S45C)의 물성치
Table 1. Physical Properties of Structural Steel (S45C)

항 목	특 징
밀도	7.85
탄성계수 (GPa)	205
항복강도 (MPa)	250
프아송비	0.29

2.2 구조해석 조건 설정

붐 및 마스터 시스템의 설계 검증을 위해 몇 가지 해석 조건을 설정 하였다.

1) 고소작업차 기본 구조에 배터리와 모터 등의 고하중 구조물을 장착한 조건에서의 Lift Arm 을 최대한 올린 상태에서의 구조해석,

2) 구조해석 1) 조건에 5도의 경사각을 주었을 때 조건에서의 구조해석

구조해석을 위한 프로그램으로는 ANSYS를 사용했다. 구조해석을 위해서는 유한요소설정, 하중 및 경계조건을 설정해 줘야한다. 유한요소는 구조물을 가상적으로 유한한 크기의 요소로 분할하는 것을 의미한다. 그림 3은 유한요소 생성 예시이다.

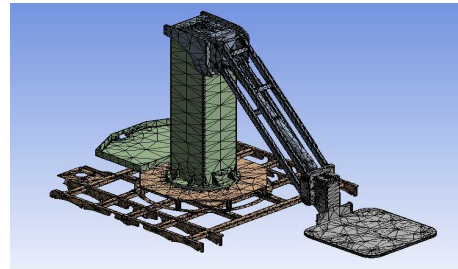


그림 3. 유한요소 모델링 형상(기본하중+Lift Arm 내림)
Fig. 3. Finite Element Modeling Shape (Default Load + Lift Arm Down)

본 연구에서의 유한요소 생성을 위한 설정은 Automatic Method로, Relevance를 0으로 설정하였다. 또한 유한요소를 각각의 부품별로 생성하여 조립되는 연결부분의 Node가 일치하는지 확인했다.

2.2.1 고하중 구조물 장착시 조건설정

보다 정확한 분석을 위해 고소작업차의 기본하중에 배터리 200kg, 모터 등의 고하중 부품 250kg 하중을 실제 장착 위치인 리프트 기둥에 적용하였으며, 탑승 보드 250kg 하중 상태에서 Lift Arm을 최대 거리인 90도로 뺀 상태에서 발생하는 구조특성을 분석하였다. 다음 그림 4는 설정한 하중 및 경계 조건에 해당한다.

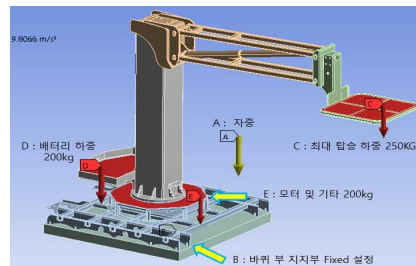


그림 4. 하중 및 경계조건(적재하중+Lift Arm 올림)
Fig. 4. Loads and boundary conditions (Load load + Lift Arm)

2.2.2 경사각 설정에서의 조건 설정

고소작업차의 열악한 환경에서 구조를 분석하기 위해 경사각으로 5도 상태에서 배터리 200Kg, 모터

등의 고하중 부품 250kg 하중을 실제 장착 위치인 리프트 기둥에 적용하였으며, 하중 및 경계 조건은 실제 Lift Arm을 최대한 멀리 뻗은 상태에서 탑승 보드에 최대 하중 250kg을 적용하였다. 다음 그림 5는 설정한 하중 및 경계 조건에 해당한다.

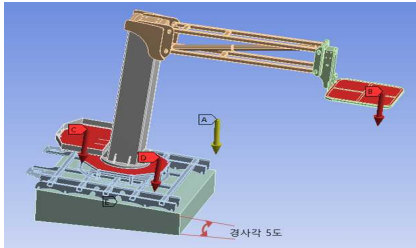


그림 5. 하중 및 경계 조건(적재하중+Lift Arm 올림+경사)
Fig. 5. Loads and boundary conditions (Load load + Lift Arm + Slope)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고하중 구조물 장착시 해석 결과

유한요소 생성 결과 Node 수는 254,878개이며, Element 수는 140,365개이다. 그림 6은 고하중 구조물 장착 시 변위 해석 결과이고, 그림 7은 고하중 구조물 장착 시 응력 해석 결과에 대한 그림이다. 해석 결과 변위와 응력의 세부 분포 형상을 나타낸 결과이다. 해석 결과 변위는 24.5mm로 나타났고, 최대 응력은 310MPa로 나타났다. 이는 S45C의 허용응력(항복응력) 250MPa를 넘어서는 수치로 안전율 0.81 수준으로 개선이 필요한 정도의 수준이다. 최대 응력 발생 위치는 탑승 보드와 Lift Arm이 고정되는 부분 중 수직으로 꺾인 모서리 부분이다.

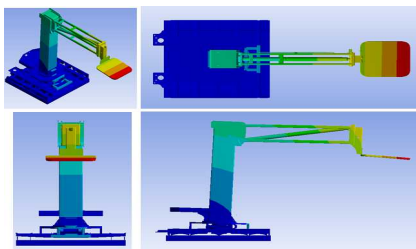


그림 6. 변위 해석 결과 (고하중 구조물 장착 시)
Fig. 6. Displacement analysis results (when installing high load structures)

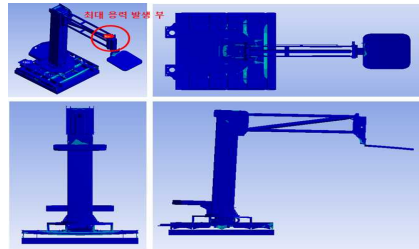


그림 7. 응력 해석 결과 (고하중 구조물 장착 시)
Fig. 7. Stress analysis results (when installing high load structures)

3.2 경사각 설정 시 해석 결과

유한요소 생성 결과 Node 수는 250,550개이며, Element 수는 138,152개이다. 그림 8은 경사각 설정 시 변위 해석 결과, 그림 9는 경사각 설정 시 응력해석 결과에 대한 그림이다. 해석 결과 고정되는 하중이 늘어나다 보니 외팔보 형식의 Lift Arm에 경사각이 부여됨에 따라 최대 변위가 25.9mm로 경사가 없을 때의 최대 변위 24.5mm 대비 1.4mm 증가했는데 이는 경사에 따라 변형 특성이 크게 바뀌지 않는 것으로 판단할 수 있다. 최대 응력 368MPa로 경사가 없을 때의 최대 응력 310MPa 대비 상당히 증가하였다. 이는 S45C의 허용응력(항복응력) 250MPa를 넘어서는 수치로 안전율 0.68 수준으로 더욱 떨어져서 개선이 필요한 정도의 수준이다. 최대 응력 발생 위치는 탑승 보드와 Lift Arm이 고정되는 부분 중 수직으로 꺾인 모서리 부분으로 동일하였다.

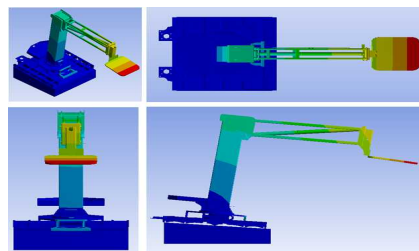


그림 8. 변위 해석 결과 (경사각 설정 시)
Fig. 8. Displacement analysis results (when setting the angle of inclination)

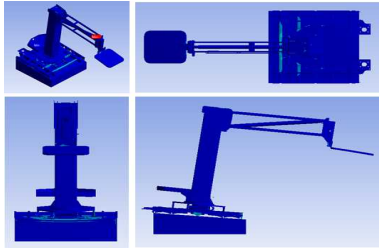


그림 9. 응력 해석 결과 (경사각 설정 시)
 Fig. 9. Stress analysis results (when setting the angle of inclination)

3.3 구조 보완

구조해석 결과 기존 설계에서 최대 취약부는 탑승 보드와 Lift Arm이 고정되는 부분에서 수직으로 꺾인 모서리 부분으로 확인이 되었다. 이러한 상황 개선을 위해 탑승 보드의 고정판 두께를 T6에서 T8로 증가시키고, Frame 하단 원판 지지부를 T5 -> T8, 최하단에 T5의 지지판을 추가하는 보완을 진행하고, 2) 조건 시뮬레이션을 다시 하였다. 다음 그림 10은 변경된 설계 조건에 대한 그림이다.

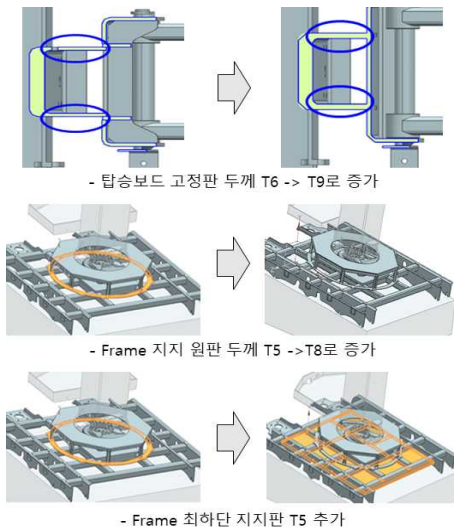


그림 10. 설계 변경 조건
 Fig. 10. Design Change Conditions

해석 결과 최대 변위가 14.8mm로 기존의

25.9mm 대비 11.7mm 감소하였고, 최대 응력 역시 198MPa로 기존의 368MPa 대비 170MPa 감소하였다. 이는 S45C의 허용응력 250MPa를 이내이며, 안전율 1.26으로 충분치는 않지만 변경 전과 비교하면 안정적으로 설계가 됨을 확인할 수 있었다. 다음 그림 11은 최종 사양에 대한 변위 해석 결과이고 그림 12는 설계 조건 변경 후 응력 해석 결과에 대한 그림이다.

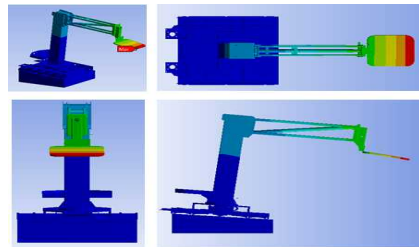


그림 11. 변위 해석 결과(최종 사양)
 Fig. 11. Displacement Analysis Results (Final Specification)

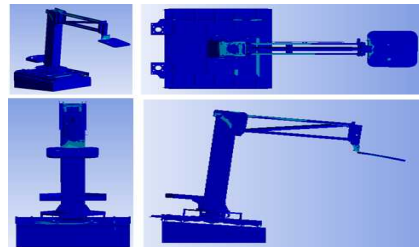


그림 12. 설계 조건 변경 후 응력 해석 결과
 Fig. 12. Stress Analysis Results After Design Condition Change

3.4 고소작업차 구현

앞선 구조해석 내용을 바탕으로 고소작업차 기구부를 구현하였으며, 작동 시험 및 고소작업차에서 가장 중요한 요소인 전도 시험을 실시했다. 작동 시험은 작업차가 작업대에 올라가 있는 상태에서 붐 및 마스트를 움직이는 시험 및 주행 시험을 실시했으며 문제가 없음을 확인했다. 전도 시험은 S사의 간이 전도 시험 장비를 활용하였으며, 붐 및 마스트를 최대높이에 올려놓은 상태에서 15도까지 전도가 일어나지 않아 만족할 수 있는 성능임을 확인했다. 추후 고소작업차의

고소작업 시 좌우에서 고소작업차의 흔들림을 방지해주는 아우트리거라는 부품을 적용하여 추가 테스트를 진행하려 한다. 다음 그림 13은 고소작업차 작동 시험 그림 14는 고소작업차의 전도 시험에 대한 그림이다.



그림 13. 고소작업차 작동 시험
Fig. 13. Smart Elevation Work Vehicle operational test



그림 14. 전도 시험 결과 (15도 전도할 수 있음을 확인)
Fig. 14. Conductivity test results (confirm that it can conduct 15 degrees)

4. 결론

과수 작물 재배를 위한 고소작업차의 수요는 지속적으로 늘고 있다. 우리나라 농업용 고소작업차의 경

우 대부분 3,300mm~3,800mm까지 작업대가 올라가 작업자가 작업할 수 있는 최대높이는 4.5m 정도까지에 불과하여, 더 높은 고소작업이 가능한 고소작업차는 수입에 의존하고 있다. 이에 본 연구에서는 5.5m 상승 7m 높이에서 작업이 가능한 고소작업차 생산 기술의 국산화를 위한 연구를 진행했으며, 그 첫 번째로 고소작업차의 3D 설계 검증에 대한 구조해석을 진행했다. 이를 통해 1) 고소작업차 기본 구조에 배터리와 모터 등의 고하중 구조물을 장착한 조건에서의 Lift Arm을 최대로 올린 상태에서의 구조해석, 2) 구조해석 1) 조건에 경사각 설정 시 조건에서의 구조해석을 진행하였으며 취약부를 파악하고 이를 보완하는 연구를 진행했다. 구조해석 결과 기존 설계에서 최대 취약부는 탑승보드와 Lift Arm이 고정되는 부분에서 수직으로 찍인 모서리 부분으로 확인이 되어 상향 개선을 위해 탑승 보드의 고정판 두께를 T6에서 T8로 증가시키고, Frame 하단 원판 지지부를 T5 -> T8, 최하단에 T5의 지지판을 추가하였다. 그 결과 최대 변위가 14.8mm로 기존의 25.9mm 대비 11.7mm 감소하였고, 최대 응력 역시 198MPa로 기존의 368MPa 대비 170MPa 감소하여 S45C의 허용응력 250MPa를 이내이며, 안전율 1.26으로 충분치는 않지만 비교적 안정적으로 설계가 됨을 확인할 수 있었다. 구조해석 내용을 바탕으로 고소작업차 기구부를 구현하였으며, 작동 시험 및 전도 시험을 실시했다. 작동 시험 결과 문제가 없음을 확인했으며 전도 시험도 최대 15도까지 전도가 일어나지 않아 만족할 수 있는 성능임을 확인했다. 추후 고소작업차의 고소작업 시 좌우에서 고소작업차의 흔들림을 방지해주는 아우트리거라는 부품을 적용하여 추가 테스트를 진행하고 미진한 부분에 대한 개발을 통해 고소작업차 성능을 최적화할 것이다.

REFERENCES

[1] S. G. Park., "Quantifying Impact of Aging Population on Fiscal Space; Social Science Research Network: Rochester", NY, USA, 2012.
[2] Boockmann, B.; Fries, J.; Göbel, C. Specific Measures for Older Employees and Late Career

- Employment; ZEW Discussion Papers; Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW): Mannheim, Germany, 2012.
- [3] B. J. Kim., "A Study on the Status of Empty Houses in Gwangju Metropolitan City and Utilization Plans", Gwangju University Master's Thesis, 2020.
- [4] Y. G. Kim, S. B. Kim, P. G. An, H. S. Cho, "A Study on the Problems and Improvement Plans of the Rural Vacant House Policy", Journal of the Korean Institute of Rural Architecture, 24.1: 19-26, 2022.
- [5] J. H. Seok, H. P. Moon, G. S. Kim, M. R. Reed, "Is aging the important factor for sustainable agricultural development in Korea? Evidence from the relationship between aging and farm technical efficiency. Sustainability, 10.7: 2137, 2018.
- [6] Dax, T, Fischer. M, "An alternative policy approach to rural development in regions facing population decline." European Planning Studies, 26(2), 297-315. 2018.
- [7] K. M. Johnson, D. T. Lichter, Rural depopulation: Growth and decline processes over the past century. Rural Sociology, 84(1), 3-27. 2019.
- [8] Republic of Korea Ministry of Trade, "Industry and Energy, 2022 Intelligent Robot Action Plan", March 4, 22
- [9] Ota, T, Mechanization of management work at high place of fruit tree. Japanese Society of Agricultural Machinery 73(3):160-164. (In Japanese), 2011.
- [10] H. Hwang, "Development of IT Oriented Environment Friendly Cultivation and Mechanization for a Pear Orchard". Sungkyunkwan University Research Report, 2012
- [11] S. S. Lee, J. T. Kim, W. Y. Park, Structural analysis for the development of a vertically raise type aerial work machinery. The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, 10(3), 225-231. 2017.
- [12] The Korean Society For Agricultural Machinery, "2010 AGRICULTURAL MACHINERY YEARBOOK REPUBLIC OF KOREA", 2010
- [13] J. H. Son, K. J. Park, S. M. Woo , C. W. Han , "A study on the stability of a vehicle with lifting utility", Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, pp.77-80, 2012.
- [4] K. S. Lee, H. C. Kim, H. S. Chae, K. R. Kim, S. J. Lee, "A Study on Agricultural Safety Technology for Ergonomic Intervention in Farm-work", Journal of Korean Society for Human Engineering, Vol.29, No.2, pp.225-239, 2010.
- [15] JSAM. Agricultural Machinery Handbook. Japanese Society of Agricultural Machinery. (In Japanese), 1984.
- [16] I. J. Jang, "Development of a Lifting Utility with Balance-controlled Platform." Journal of Biosystems Engineering 36.3: 171-179, 2011.
- [17] Nagaki, T. Introduction to Japanese Agricultural Machinery(III) -Machines for roughage, vegetable, orchard, transportation and horticultural facility etc-. Japanese Society of Agricultural Machinery. (In Japanese), 1996.
- [18] D. G. Choi, J. H. Song, I. K. Kang. "Effect of tree height on light transmission, spray penetration, tree growth, and fruit quality in the slender-spindle system of Hongro'/M9 Apple Trees." Horticultural Science & Technology 32.4, 454-462, 2014.

저자약력

조재현 (Jae-hyun Jo)

[정회원]



〈관심분야〉

- 2015년 2월 : 가톨릭관동대학교 의료공학과 졸업(학사)
 - 2017년 2월 : 가톨릭관동대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
 - 2020년 08월 : 가톨릭관동대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
 - 2020년 09월 ~ 2021년 02월 가톨릭관동대학교 시간강사
 - 2022년 4월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 의료공학과 조교수
- 의용메카트로닉스, 디지털 신호처리, 영상처리

정진형 (Jin-Hyoung Jeong)

[정회원]



- 2012년 02월: 가톨릭관동대학교 의료공학과 졸업(학사)
- 2014년 02월: 가톨릭관동대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2017년 08월: 가톨릭관동대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2021년 03월: 가톨릭관동대학교 의료IT학과 조교수

〈관심분야〉

의료 시스템, 데이터 분석, 통신, 인공지능

김승훈 (Seung-Hun Kim)

[정회원]



- 2018년 2월 : 가톨릭관동대학교 의료공학과 졸업 (학사)
- 2020년 2월 : 가톨릭관동대학교 의료공학과 졸업 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 의료공학과 박사과정

〈관심분야〉

의용메카트로닉스, IoT, u-Health, 의료영상처리

이상식 (Sang-Sik Lee)

[중신회원]



- 1993-2000년 LG전선(주)
- 1996-2000년 성균관대학교 박사
- 2001-2004년 ㈜미도테크
- 2004-2010년 성균관대학교 연구교수.
- 2011년- 현재 가톨릭관동대학교 의료공학과 교수

〈관심분야〉

의용메카트로닉스, 생체역학, 의용전기전자, u-Health