

# 농업용 전기운반차의 주행성능 향상을 위한 구조해석에 관한 연구

조재현, 이상식\*

## A Study on Structural Analysis for Improving Driving Performance of Agricultural Electric Car

Jae-Hyun Jo, Sang-Sik Lee\*

**요 약** 현대 사회의 농업 인구의 고령화 및 감소로 농업 환경 개선이 필요한 실정이고 대표적인 문제 중 하나이다. 그리고 대부분의 작업체계에서 항상 운반 작업이 필요하기 때문에 운반 작업에 사용되는 시간과 노동력의 비율이 매우 높다. 이에 따라 많은 종류의 운반차들이 개발되고 판매되고 있으며, 초기에는 대부분 화석연료를 사용하는 동력운반차가 주종을 이루고 있다. 그러나 최근에는 지구온난화와 기후변화협약 등 국제 환경규제의 강화 및 화석연료의 고갈로 인한 수소, 연료전지, 태양광, 바이오 등 차세대 친환경에너지에 주목하고 있다. 그래서 본 연구에서는 화석연료를 대체하는 친환경적이며 누구나 쉽게 조작이 가능하고 안전한 농업용 전기운반차를 개발하는 것을 최종목표로 한다. 농업용 전기운반차의 광범위한 차속 조절 및 안정성 확보에 초점을 두고 설계하였으며, 성능 및 디자인을 고려하여 프레임, 주행부, 조향부, 컨트롤러 시스템 등으로 구성되어 각 부분별 검토하였다. 본 연구의 농업용 전기운반차가 젊은 인력이 부족한 농경사회에서 고령 노동자나 여성들이 쉽고 편하게 작업을 할 수 있고 높은 효율성을 통해서 농경사회에 도움이 될 수 있을 것이다.

**Abstract** The aging and declining agricultural population in the modern society requires improvement of the agricultural environment and is one of the representative problems. And since most of the work systems always require a transport work, the ratio of labor consumed in the transport work is very high. Accordingly, many types of transport vehicles are being developed and sold, and in the early days, most of them are powered transport vehicles using fossil fuels. However, it is paying attention to next-generation eco-friendly energy such as hydrogen, fuel cells, solar power, and bio due to the strengthening of international environmental regulations such as global warming and the Convention on Climate Change and the depletion of fossil fuels. Therefore, in this study, the ultimate goal is to develop an eco-friendly, easy-to-operate, safe agricultural electric vehicle that replaces fossil fuels. It was designed with a focus on controlling a wide range of vehicle speeds and securing stability of electric agricultural vehicles. Considering the performance and design, it is composed of a frame, a driving part, a steering part, and a controller system, and we are going to review and manufacture each part. It is believed that the manufactured electric vehicle for agriculture can be easily and conveniently operated in an agricultural society where young manpower is scarce, and can be helpful to the agricultural society through high efficiency.

**Key Words** : transport work, eco-friendly, easy-to-operate, high efficiency, safe agricultural car

### 1. 서론

현대 사회의 농업 인구의 고령화 및 감소로

농업 환경 개선이 필요한 실정이고 대표적인 문제 중 하나이다. 농업을 할 때의 작업은 퇴비 살

This study was supported by the Agency for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Technology Planning and Evaluation(318004032HD020),

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

Received October 10, 2020

Revised October 21, 2020

Accepted December 14, 2020

포, 제초, 시비, 유인, 수확 등 여러 가지 작업이 많고 기계화하기 어려운 작업이 대부분이기 때문에 많은 인력이 필요하다. 그리고 대부분의 작업 체계에서 항상 운반 작업이 필요하기 때문에 운반 작업에 사용되는 시간과 노동력의 비율이 매우 높다. 이에 따라 많은 종류의 운반차들이 개발되고 판매되고 있으며, 예전의 농업 작업을 할 때는 대부분 화석연료를 사용하는 동력운반차를 이용했다. 그러나 최근에는 지구온난화와 기후변화 협약 등 국제 환경규제의 강화 및 화석연료의 고갈로 인한 수소, 연료전지, 태양광, 바이오 등 차세대 친환경에너지를 주목하고 있다[3]. 본 연구는 이러한 문제점들을 인식하여 전기에너지를 이용하는 친환경적이고 안전한 전기운반차 개발하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 농업용 전기운반차의 등반성능 예측 모델

일반적인 포장도로에서 차량이 일정 속도로 경사각  $\theta$ 인 경사노면을 올라갈 경우 차량 총중량  $W$ 의 진행방향 분력인  $W\sin\theta$ 가 등반저항( $R_\theta$ )으로 작용한다. 하지만 비포장도로에서의 등반저항은 포장도로에서의 등반저항은 포장도로에서의 경사지 등반저항  $R_\theta$ 에 식 (1)에 제시한 토양다짐에 의한 저항  $R_c$ 를 고려해서 계산해야 한다. 따라서 차량의 전체 경사지 등반저항  $R_g$ 는 식 (2)과 같이 수평노면에서의 운반기계의 운동저항  $R_c$ 와 차량하중의 진행방향 분력인 등반저항  $R_\theta$ 의 합으로 결정된다.

$$R_c = \left[ \frac{1.2}{C_n} + 0.04 \right] W \quad (1)$$

$$R_g = R_\theta + R_c \quad (2)$$

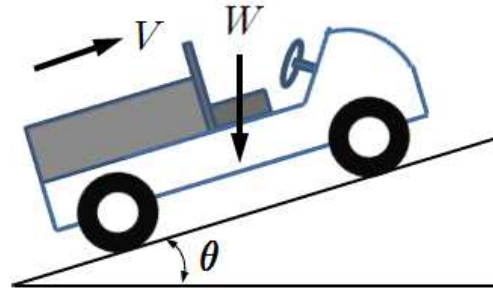


그림 1. 전기운반차의 등반 성능 분석  
Fig. 1. Analysis of climbing performance of electric vehicle

비포장에서의 등반저항은 포장된 도로에서보다 크게 나타난다. 비포장의 등반저항은 등반 시 소요되는 동력 및 포장도로에 비해 크게 나타나기 때문에 구동부 모터 선정 및 차량의 설계 시 주로 사용되는 토양의 특성을 고려해야 한다. 한편, 일반적으로 운반기계가 운용되는 토양의 경사율을 10%로 하였을 경우 경사율 10%에 따른 식 (3)과 식 (2)에 의한 토양다짐에 의한 저항  $R_c$ 는 다음 식 (4)와 같다.

$$R_\theta = W\sin\theta = 800 \sin 5.71^\circ = 79.46 \text{ kgf} \quad (3)$$

$$R_c = 51.90 \text{ kgf} \quad (4)$$

따라서 농업용 전기운반기계의 경사지에서의 전체 저항  $R_g$ 는  $R_\theta$ 와  $R_c$ 의 합으로 아래 식 6과 같이 결정된다.

$$R_g = R_\theta + R_c = 79.46 \text{ kgf} + 51.90 \text{ kgf} = 131.36 \text{ kgf} \quad (5)$$

한편, 전기운반 농기계의 최고속도를 30 km/h 라고 했을 때 10° 경사지를 등반하기 위한 운반기계의 모터 용량은 다음과 같이 결정할 수 있다. 따라서 농업용 전기운반 농기계는 최소한 12 kW 이상의 모터를 사용해야한다. 위의 결과를 토대로 본 연구에서는 운반기계에 3,000 rpm의 6 kW 모터 두 개를 사용하는 것으로 결정하였다. 그래서 본 연구에서는 고소작업기계의 모터와 구동스프로켓까지의 총 감속비를 8.3:1로

하였고, 타이어의 직경을 450mm로 하였다. 이 때 전기운반 농기계의 최고속도는 다음과 같다.

$$V = \frac{N_m}{i} \cdot \frac{2\pi r_s (3600)}{60} = \frac{3000}{8.31} \cdot \frac{2\pi (0.225)(3600)}{60} \quad (6)$$

$$= 30622\text{m/h} = 30.62\text{km/h} \approx 30\text{km/h}$$

전기운반 농기계의 모터동력 P = 6 kW, 모터의 회전수 N = 3000 rpm, 타이어의 반경 r<sub>s</sub> = 0.225 m, 총 감속비 i = 8.31 으로 했을 때 운반기계의 총 구동력 F는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$F = T_m \cdot \frac{i}{r_s} = \frac{60P}{2\pi N} \cdot \frac{i}{r_s} = \frac{60(6000 \times 2)}{2\pi(3000)} \cdot \frac{8.31}{0.225} \quad (7)$$

$$= 1410.75\text{ N} = 143.81\text{kgf}$$

식 (7)으로부터 결정된 총구동력 F = 143.81 kgf로서 이 값은 앞에 나온 10% 경사율에서의 등반저항 131.36 kgf에 비해 크므로 10% 경사각을 충분히 등반할 수 있는 구동력을 확인하였고 변속장치를 추가하여 효율적인 주행이 가능하도록 하였다.

### 2.2 농업용 전기운반차의 설계 및 주행 장치 설계

광범위한 차속 조절 및 안정성 확보에 초점을 두고 설계하였고 성능 및 디자인을 고려한 프레임, 주행부, 조향부, 컨트롤러 시스템 등으로 구성하였다. 연구결과를 바탕으로 여러 문제점을 수정 및 보완작업을 하였다. 3D 프로그램에 의한 설계를 바탕으로 최종 3D 모델링 작업에 의한 검증, 구조해석을 진행하였다.

전기 운반 농기계 모터는 앞에서 용량을 계산하여서 가선통정하였으며, 연구결과에 따라 효율적인 주행을 위해 용량에 맞게 개발된 AC 모터를 적용하였고 경사지 등 험로 주행이 많다. 그래서 선회반경을 좁게 하고 정밀한 제어를 위해 DC모터와 다르게 브러시가 없어서 효율과 유지비가 좋은 AC모터를 적용하였다. 원활한 구동 및 제어를 위해 농업용 전기운반차에서는 DC72V, 6kW AC모터를 단독으로 적용하고 트랜스미션을 이용해 속도를 조절할 수 있도록 설계하였다.

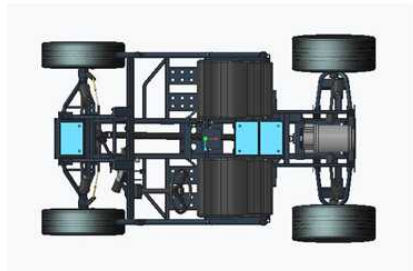


그림 2. 전기운반차 3D 모델링  
Fig. 2. Electric vehicle 3D modeling

표 1. 주행장치의 주요 사양  
Table 1. Main specifications of the driving device

항 목		특 징	
AC모터	전압	VDC	72
	출력	W	6,000
	최대회전속도	rpm	4,800
타이어	형식	-	25×8-12 (전륜) 25×10-12 (후륜)
하부프레임	크기	mm	1,380×900×350
구동방식	형식	-	4륜구동
현가장치	형식	-	독립현가시스템
배터리	규격	-	8V150AH × 9EA

### 2.3 전기운반차 설계 및 안전성 검토

전기운반차의 경우 농업의 목적으로 개발된 장비로써 하중과 진동에 의한 프레임의 강성 확보를 위한 구조가 우선이 되어야 한다. 그래서 농업용 전기운반차 설계에 따라 구조적 안전성 분석 및 검토를 위해 ANSYS를 이용하여 유한요소 해석을 실시하였으며, 주요 검토 항목으로는 사람이 탑승하는 인원수 및 적

재중량에 따른 하중에 의한 프레임 변형 및 취약부 분석, 진동 해석을 수행하였다.

### 2.5.1 전기운반차 해석 모델링

먼저 제품을 제작하기 위한 3D Assembly Modeling을 바탕으로 유한요소해석의 원활한 진행을 위해 주요 검토 부분을 기반으로 단순화 작업을 실시하였으며, Main Frame 등 주요 검토 대상이 될 Unit은 최대한 기존 형상으로 구축하였다. 바퀴부는 구동축 끝단에 바퀴를 대신하여 구속조건을 부여하기 때문에 도면에서는 삭제를 하였다. 3D 모델링 작업 및 Assembly 간 Unit의 간섭 및 치수오차 보정을 실시하였으며, Contact 조건을 고려하여 일부 구간의 추가 Modeling 개선을 하였다.

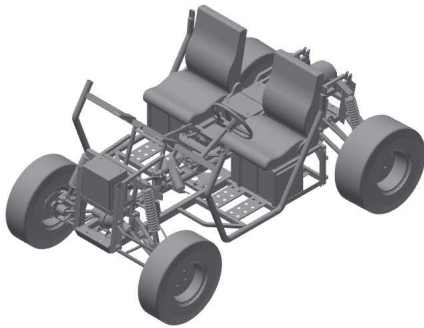


그림 3. 전동차 3D 조립도  
Fig. 3. Electric vehicle 3D assembly drawing

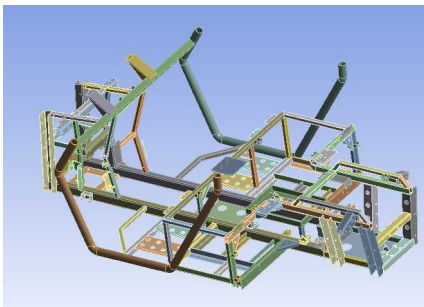


그림 4. 모델링 단순화  
Fig. 4. Simplify modeling

Main Frame을 비롯한 부품은 구조강의 소재를 적용하였다. 구조강의 주요 물성치는 아래의 표3과 같다.

표 2. 구조강의 물성치  
Table 2. Properties of structural steel

	구조강 (S45C)
밀도 ( $g/cm^3$ )	2.7
탄성계수 (GPa)	205
항복강도 (MPa)	343
프아송비	0.29

### 2.5.2 전기운반차 유한요소의 생성

전동차의 유한요소 해석을 실시하기 위해 Mesh 설정을 하였다. 해석 Data의 신뢰성 확보를 위해 균등한 Mesh 분할을 위해 Automatic Mesh Based Defeaturing 설정을 하였으며 생성된 Mesh는 아래 표와 같다.

표 3. 노드 및 요소  
Table 3. Nodes and elements

Nodes	Elements
355,854	130,499

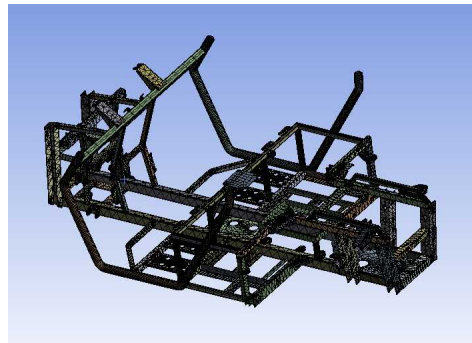


그림 5. Mesh 생성  
Fig. 5. Mesh generation

### 2.5.3 전기운반차 구조해석

전기운반 농기계에 사람이 2명 탑승하였을 경우를 고려하여, 추가로 좌석 부근에 총 2,000N의 추가 하중을 적용하였다. 경계조건 및 자중의 조건은 기존과 같다.

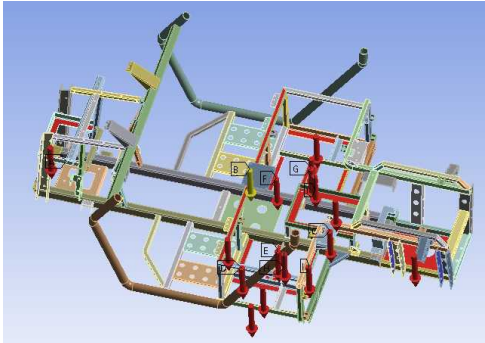


그림 6. 하중, 자중 및 경계조건 설정 2  
Fig. 6. Load, self-weight and boundary condition setting 2

표 4. 하중 해석 결과 2 (배터리 무게 + 사람 무게)  
Table 4. Load analysis result 2 (battery weight + human weight)

최대 응력 지점	Main Frame 중앙 모서리부 상단
최대 응력	290.72 MPa
최대 변형 지점	Main Frame 중앙 모서리부 하단
최대 변형량	0.94416 mm

사람이 탑승하는 조건으로 추가 하중 2000N을 부여하여 해석한 결과 최대 응력 값은 동일 위치에 290.72 Mpa, 최대 변형량은 0.94416 mm 증가하였다. 해석결과 인원 탑승 조건에도 응력과 변형량의 차이가 거의 없게 나왔다.

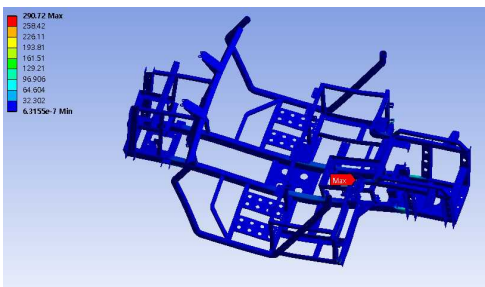


그림 7. 하중 해석 결과2 - 응력 (Max Point)  
Fig. 7. Load Analysis Result 2-Stress (Max Point)

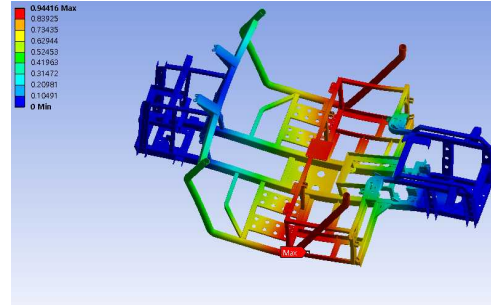


그림 8. 하중 해석 결과2 - 변형량 (Max Point)  
Fig. 8. Load Analysis Result 2-Deformation (Max Point)

해석 결과를 살펴볼 때 사람이 탑승하는 조건으로 하중을 주어 해석했을 때 변형량이 미미한 것으로 확인되어 전도 위험성은 극히 적을 것으로 판단된다. 다음 표 5는 하중 해석 결과를 정리한 것이다. 실제사용 환경을 반영해 추가한 하중에도 응력과 변형량의 차이는 거의 없었다. 그렇기 때문에 구조해석에 결과 전도의 위험성도 없을 것으로 보인다.

표 5. 하중 해석 결과 고찰  
Table 5. Consideration of load analysis results

하중	최대 응력 (MPa)	최대 변형량
배터리 +사람	290.72 MPa	0.94416 mm

### 3. 결론

본 연구에서는 화석연료를 대체하는 친환경적이며 누구나 쉽게 조작이 가능하고 안전한 농업용 전기운반차를 개발하는 것이 최종목표로 하여, 농업용 전기운반차의 광범위한 차속 조절 및 안정성 확보에 초점을 두고 설계하였다. 성능 및 디자인을 고려하여 프레임, 주행부, 조향부, 컨트롤러 시스템 등으로 구성되어 각 부분별로 검토하였다. 최초 설계의 구조해석 및 기존 선행연구를 바탕으로 수정 및 보완작업을 진행하고 현장에서 제작된 전기운반차를 통하여 시뮬레이션을 하였고 발생한 문제점들을 파악하고 수정을 진행하여 최적의 설계 및 제작을 진행하였다. 설계한 전기운반차의 시뮬레이션용 모델을 통하여 농업용 전기운반차의 운행 시 안전

성과 효율성을 확인하였다. 본 연구를 통해 젊은 농업 인력이 사라진 농경사회에서 고령의 작업자 와 여성들도 쉽고 간편하게 작업을 할 수 있는 고효율 농업용 전기운반차 개발로 농경사회에 이바지하고자 한다.

REFERENCES

[1] Y. Y. Jang, "Development of electromotive forklift for multipurpose operation", Research report on research and development project for agriculture, forestry and animal husbandry conducted by the Ministry of Agriculture, Forestry and Livestock, 2018

[2] Sang-sik Lee, Jun-tae Kim, Won-yeop Park "Structural analysis for the development of a vertically raise type aerial work machinery" The Korea Institute of Information & Electronic Communication Technology, Vol. 10, No. 3, pp.225-231, 2017

[3] Y. Y. Jang, "Development of eco-friendly electric cultivator using HBSR dual motor", Research report on research and development project for agriculture, forestry and animal husbandry conducted by the Ministry of Agriculture, Forestry and Livestock, 2014

[4] Young Joo Kim, Wan Su Kim, Sun Ok Chung, Dae Hyun Lee "Analysis of Technical Trend of Electric Agricultural Field Machinery" Korean Society of Food and Agricultural Information Science, Vol. 6, No. 2, pp.40-48, 2014

[5] Won-yeop Park, Kyou-seung Lee "Prediction of Tractive Performance of Off-Road Wheeled Vehicles" Transactions of Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 8, No. 5, pp.188-195, 2000.

[6] Myung Ho Bae, Tae Yeol Bae, Sung Kwang Choi, "The Study on Bending Stress Analysis of Gear Train for Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission for Forklift" The Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, pp.168-173, 2016

[7] Jun-tae Kim, Gi-yeong Lee, Sang-sik Lee, Won-yeop Park, "Centralized controller high-altitude work car elevations lift structure safety assessment", Kiiect Volume 10, No 4, p p. 350-357, 2017

[8] Myung Ho Bae, Tae Yeol Bae, Sung Kwang Choi "The Critical Speed Analysis of Gear Train for Hydro-Mechanical Continuously Variable Transmission" The Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 14, No. 4, pp.71-78, 2017

[9] Yong Hong, Bo myung Kim, Seok jun Yu, Seung ho Hwang, Byung guk Lee, Dong pyo Hong "A Study on a Structural Stability that Design the Main Frame of the Aerial Working Platform" Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 2012, No. 4-2, pp.111-112, 2012

[10] Byeong-soo Kim, Jae-hwan Son, Kee-jin Park, Seung-min Woo "A study on optimizing design and stability of orchard high place operation car" Korean Journal of Computational Design and Engineering, vol. 2012, no. 2, pp.853-855, 2012

저자약력

조 재 현 (Jae-Hyun Jo)

[정회원]



<관심분야>

- 2015년 2월 : 가톨릭관동대학교 의료공학과 졸업 (학사)
- 2017년 2월 : 가톨릭관동대학교 일반대학원 졸업 (공학석사)
- 현재: 가톨릭관동대학교 일반대학원 의료공학과 박사과정

의용메카트로닉스, 디지털 신호처리, 영상처리,

이 상 식 (Sang-Sik Lee)

[종신회원]



<관심분야>

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

의용메카트로닉스, u-Health, 생체역학, 의용전기전자