

Design and Implementation of the Front part of an Agricultural Electric Vehicle based on Vacuum Forming using Computational Structural Analysis

Hun-Kee Lee*, Myeong-Chul Park**

*Professor, Dept. of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University, Gumi, Korea

**Professor, Dept. of Avionics Engineering, Kyungwoon University, Gumi, Korea

[Abstract]

In this paper, we propose a 3D design method of the vacuum forming method of the front part to improve the lightness and production efficiency of agricultural electric vehicles. For agricultural electric vehicles, lightness and production efficiency are more important than the strength of materials for collision protection. In this paper, we propose a vacuum forming design method that can replace complex machining processes such as laser machining, bending, and painting. The main purpose of this research is to improve product stability, productivity and convenience through 3D design of the front part and development of vacuum forming mold technology. Research procedure follows the 3D modeling of the front part using CATIA, finite element analysis for the structural stability using ABAQUS, manufacturing prototype for the investigation of the dimensions using 3D scanner and actual driving test under agricultural electric vehicle usage environment. The results verifies the proposed 3D design method of the vacuum forming method and are expected to be widely used by agricultural workers through the simplification of the production process of agricultural electric vehicles.

▶ **Key words:** Agricultural Electric Vehicles, Computational Structural Analysis, FEA, ABAQUS, CATIA

[요 약]

본 논문에서는 농업용 전기차의 경량성과 생산의 효율성을 개선하기 위한 전면부의 진공성형 방식의 3차원 설계 방법을 제안한다. 농업용 전기차는 충돌에 대비한 재질의 강도적인 측면에서 다소 자유로움을 가지지만, 경량성 및 생산의 효율성이 매우 중요하다. 본 연구에서는 레이저 가공, 절곡, 도장 등의 복잡한 가공 공정을 대체할 수 있는 진공성형 설계 방법을 제안한다. 전기차 전면부의 3차원 설계 및 진공성형 금형 기술 개발을 통하여 제품의 안정성과 생산성 및 편의성을 향상시키는 것이 연구의 주요 목적이다. 연구는 CATIA를 이용한 모델링, ABAQUS를 이용한 구조 안정성 해석, 시제품 제작 및 3D Scan을 이용한 치수 확인 및 실제 전기차 사용환경에서의 실제 주행시험의 순으로 진행되었다. 본 연구를 통하여 전기차 전면부 진공성형 방식의 타당성이 검증되었으며 이 결과는 농업용 전기차의 생산자 및 농업 종사자들에게 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

▶ **주제어:** 농업용 전기차, 전산구조해석, 유한요소해석, 아바쿠스, 카티아

-
- First Author: Hun-Kee Lee, Corresponding Author: Myeong-Chul Park
 - *Hun-Kee Lee (leehunkee@ikw.ac.kr), Dept. of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University
 - **Myeong-Chul Park (africa@ikw.ac.kr), Dept. of Avionics Engineering, Kyungwoon University
 - Received: 2021. 09. 28, Revised: 2021. 10. 22, Accepted: 2021. 10. 22.

I. Introduction

세계적으로 탄소 배출규제가 점차 강화되고 있는 추세이며, 이에 따라 자동차의 배기가스에 대한 규제도 강화되고 있다. 네덜란드와 노르웨이는 2025년, 영국과 프랑스는 2040년을 기점으로 내연기관 자동차의 판매 자체를 금지한다고 밝혔으며, 중국 및 독일 등도 이를 적극 검토 중인 것으로 알려져 있다[1]. 또한, 배기가스 규제 및 연비 향상을 위한 최적안은 차량의 경량화라는 점에 전 자동차 산업계가 동의하고 있고 엔진/구동계의 개선(Turbo-charger, E/G down-sizing, Multistate transmission 등)이 진행되는 추세이기는 하나 강화되는 규제(배기가스 및 연비 등)의 대응에는 한계가 있다[2]. 이에 전기차와 수소차와 같은 친환경차에 대한 관심이 증가하고 있으며 실제 친환경차의 보급량이 2015~2019년의 4년간 16.5배, 점유율도 15.9%를 차지할 정도로 급증하였다[3,4]. 정부도 2030년까지 전기차 300만 대, 수소차 85만 대 보급 계획을 추진 중이며, 혁신성장 8대 선도 사업 중 미래자동차와 에너지 신산업의 주요 분야 중 하나가 전기자동차이다[5]. 특히, 디젤로 움직이는 기존의 무거운 농업용 기기에 비해 조작성이 쉽고 가벼워 고령자의 사용성이 높고 내연기관을 사용하는 기존 차량에 비해 엔진오일, 미션오일 등의 소모성 유지비용이 적어 농업 경영비 부담을 덜어주는 효과로 인하여 농기계 분야에서도 많은 각광을 받고 있다[6]. 독일의 폴리랩(poly-lab)은 14개의 기업과 연구기관이 컨소시엄을 통해 전기 트랙터(Kulan)를 개발하였으며, 자체의 무게가 300kg으로 가벼움에도 최고 1톤까지 적재할 수 있는 특징을 가진다[7]. 미국의 세계적인 농기계 제조사인 존 디어(John Deere)도 227Kg의 무게를 적재할 수 있는 소형 전기 트랙터를 개발하여 판매하고 있다[8]. 국내에서는 저렴한 유지비와 운전면허가 없는 고령의 농민들이 쉽게 사용할 수 있는 가정용 콘텐트에서 충전이 가능한 전기 자동차를 조달청 ‘벤처나라’에서 판매하고 있다[9]. 본 논문에서는 전기차의 제작 공정의 간소화로 인한 생산성 향상과 대체 재질을 통한 경량화를 통하여 대외적 경쟁력을 가진 농업용 전기차 제조 기술을 개발하고자 한다. 농업용 전기차의 형태는 Fig. 1과 같이 전면부 설계 및 제조 과정에 가장 많은 시간이 소요된다. 기존 전면부 제작 방법은 레이저 가공 및 절곡, 도장 등의 복잡한 절차로 생산되기 때문에 대량 생산이 아닌 개별화된 소형 생산 제품의 경제성 및 생산 효율성이 저하되는 문제점을 가진다. 본 연구에서는 기존 공정방식을 대체할 수 있는 진공성형 방법을 제안한다. 이를 위해 3차원 설계를 바탕으로 구조해석을 통한

안정성을 확보하고 시제품 제작을 통하여 생산 실효성을 검증하고자 한다.



Fig. 1. Five components of the front part of an agricultural electric vehicle[9]

전기차의 전면부는 보닛(Bonnet), 휠더(Fender) 등 5개 부품으로 구성되며 부분적 파손이 발생할 시 대체가 가능하도록 설계하였다. 또한, 진공성형 방식(Vacuum Forming)[10-14]은 생산 공정을 간소화하고 완성차 조립의 효율성을 통하여 단위 시간당 생산성을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 기존 철제 위주의 부품을 대체소재를 사용하여 차량의 경량화를 통하여 에너지 효율성을 제고할 수 있다. 이는 다양화 및 소량생산의 특징을 가지는 농업용 전기차 시장에서 차별적인 특징과 대외 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 이를 위하여 고객 안정성을 고려한 차량 외장 시제품 3D 설계의 타당성, 이전 제작공정에 대한 대체공정 개발을 통한 생산 효율성 여부, 대체 물질의 경량화 정도 및 성형성에 대해 검토한다. 연구의 과정은 3D 모델링, 설계, 최적 대체소재 선택, 금형 제작, 3D FEM(Finite Element Method) 구조해석[15] 및 실험, 조립 및 주행시험으로 이루어진다. 논문의 구성은 2장에서 다품종 소형 생산에 적합한 소재와 성형 기술에 대해 살펴보고 3장에서 전면부의 3D설계와 최적 대체소재와 금형 제작에 관해 기술한다. 4장에서 시제품의 구조해석 결과를 설명하고 5장에서 향후 연구에 관해 기술한다.

II. Background

1. Types of Plastic

기존 농업용 전기차의 전면부를 구성하는 소재는 건설 구조용 철강재에 해당하는 SS400이 대부분 사용되고 있다[16]. 연구에서 고려하는 제조공정의 간소화와 경량화를 달성하기 위해서는 성형이 손쉬운 소재의 탐색이 우선된다. 본 절에서는 필름 성형 공정을 적용할 수 있는 플라스틱의 종류에 대해 설명한다. 먼저, 폴리카보네이트

(PC:Poly- Carbonate)는 비스페놀 A와 염화카르보닐을 원료로 하며 충격이나 온도 변화에 강한 특성을 가지며 일반적으로 가전제품이나 자동차 부품 등에 사용된다. 아크릴 수지(PMMA: Poly Methyl MethAcrylate)는 투명성이 뛰어나 자동차의 램프 커버 렌즈로 사용되고 있으며 폴리염화 비닐(PVC: PolyVinyl Chloride)은 범용 플라스틱으로 전선 및 절연 커버나 파이프, 배수관 등에 이용되고 있다. ABS 수지는 자동차의 외장에 많이 사용되고 있는 폴리스티렌계 수주이며 아크릴로니트릴, 부타디엔, 스틸렌의 합성을 의미한다. 내충격성이 좋고 도금과 도장이 용이하고 대부분의 성형 가공법의 적용이 가능한 특징을 가진다. 그리고 범용 플라스틱 중에 가장 가벼운 폴리프로필렌(PP: PolyPropylene)은 자동차 범퍼 등에 사용되고 있다.

Table 1. Types of Plastic

Type	Distinction
PC	Resistant to impact and temperature changes (home appliances or automobile parts)
PMMA	Excellent Transparency (Lamp Cover Lenses in Cars)
PVC	Used for electric wire and insulation cover, pipe, drain pipe, etc.
ABS	Excellent impact resistance, easy plating and painting, most molding processing possible (used a lot for automotive exterior materials)
PP	Lightweight and used in car bumpers

2. The Technology of Film Molding

다품종 소량 생산을 전제한 플라스틱 필름 성형 기술은 크게 두 가지 방식이 있다. 열 성형(Thermoforming) 방식[17]은 열가성 플라스틱 시트를 연화점까지 가열하여 단면 금형 위로 또는 한쪽으로 펴서 냉각시키고 원하는 형태로 만드는 방식으로 기계가공이 어려운 대형 부품에 적합하고 설비비와 가격이 저렴하지만 소량생산의 경우 최적 치수의 재료를 구하기 어렵다는 단점이 있다.

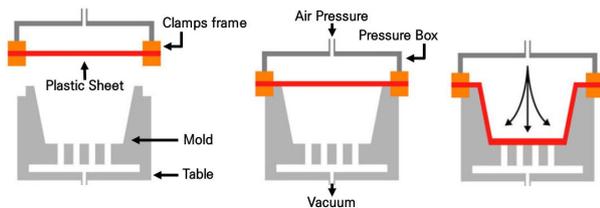


Fig. 2. Process of Thermoforming

이에 반해, 진공성형 방식은 다품종 소량 생산에 적합한 성형 방식이다. 금형 틀에 가열연화시킨 플라스틱 시트를 누른 상태에서 시트와 금형 틀 사이에 있는 공기를 진공

흡입하여 밀착시키는 성형 방식이다. Fig. 3의 (2)번이 시트를 가열 및 연화 시키는 단계이고 (4)번이 진공 상태를 통하여 시트를 밀착시키고 냉각시켜 형태를 마무리하는 단계이다. 부가적으로 커팅이나 홀 가공의 추가적인 작업이 이루어진다. 주로 자동차 내외장 제품 커버에 많이 사용되고 있다.

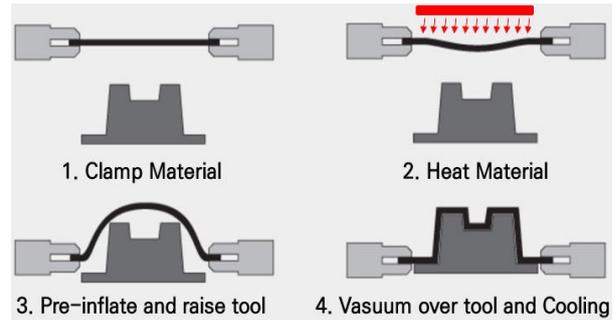


Fig. 3. Process of Vacuum Forming

III. Design

1. Design of the Front part

본 연구에서 구현하고자 하는 농업용 전기차는 시속 30km 속도 내로 운행되는 국내에서 가장 많이 사용되는 차량을 목표로 하며 전체적인 차량 모델링 결과는 Fig. 4와 같다.

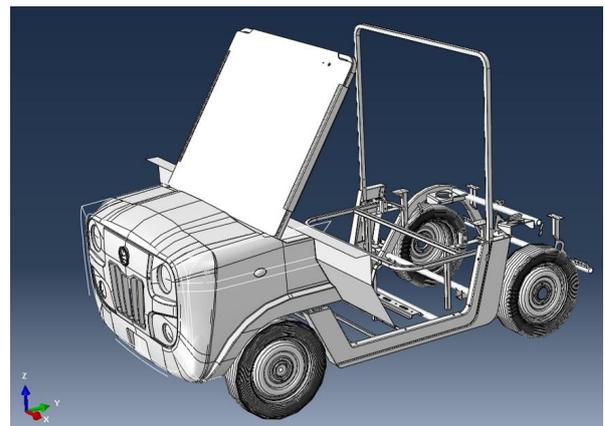


Fig. 4. 3D modeling of electric vehicle

구체적인 설계와 구현이 요구되는 차량 전면부는 좌우 헨더와 보닛, 그릴, 범퍼 등의 5개 부품으로 분리하여 설계하여 파손으로 인한 부품의 수리 및 관리의 용이성을 확보하였으며 설계에 따른 모델링 결과는 Fig. 5와 같다.

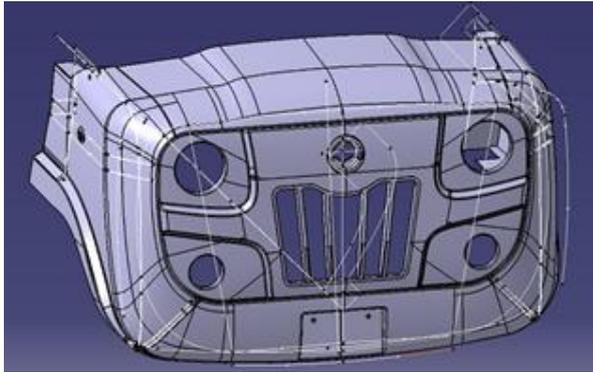


Fig. 5. Modeling of the front part of an electric vehicle

각 부품별 금형제작을 위한 설계도는 Fig. 6과 같으며 최종 결과물의 성형정밀도는 공차 3mm 이내의 성능을 기준으로 설계되었다.

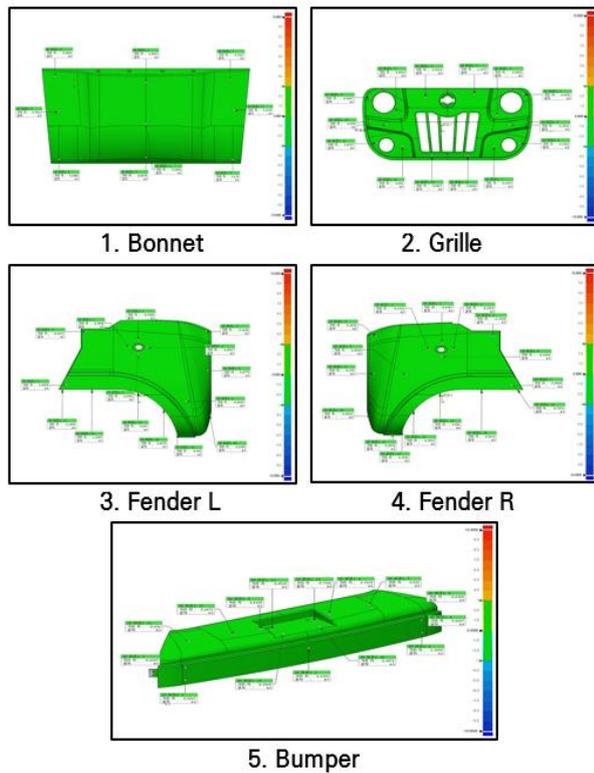


Fig. 6. Design drawing for each part of the front part for mold making

2. Mold making and Vacuum forming

진공성형을 위한 최적물질 선정을 위하여 선상, 판상, 망상 고분자 등의 분자형상에 따른 분류와 무기 및 유기 천연, 합성 고분자 등의 산출형태에 따른 분류, 열가성 및 열경화성 등의 열적성질에 따른 분류 정보를 대상으로 첨가제에 따른 기계적 특성을 고려하였다. 또한, 생산비용 대비

품질과 생산성, 다품종 소량생산에 적합한 박막 성형, 정식 보호 및 마무리 가공의 양호성과 기존 전기차의 20%의 경량화 목표를 달성하기 위한 조건을 비교하여 최적 물질은 ABS 소재로 결정하였다. Table 2는 본 연구에서 사용된 ABS SH610A 에 대한 물성 정보를 보인 것이다.

Table 2. Physical property information of ABS SH610A

Properties	Condition	Unit	Value
Specific gravity	-	-	1.04
Mold shrinkage	3.2mm	%	0.4~0.7
Melt index	203°C/3.8kg	g/10min	1.0
Tensile ST. at yield	50mm/min, 3.2mm	kg/cm ²	420
Tensile EL. at yield	50mm/min, 3.2mm	%	>5
Tensile EL. at break	50mm/min, 3.2mm	%	35
Flexural strength	50mm/min, 3.2mm	kg/cm ²	640

제작된 금형과 진공성형 방식으로 산출된 결과물은 Fig. 7과 같고 조립 형상은 Fig. 8과 같다.



Fig. 7. Result of Mold and Product



Fig. 8. Assembly shape of the parts

IV. Results of Computational Structural Analysis

1. Molding Precision

진공성형 시제품에 대한 성형정밀도를 측정하기 위하여 3D 스캐너를 통하여 스캐닝한 3차원 스캔 파일을 역설계 프로그램을 사용하여 치수를 측정하였다. 측정 결과 5개 부품 모두 공차 3mm 이내로 확인되었다.

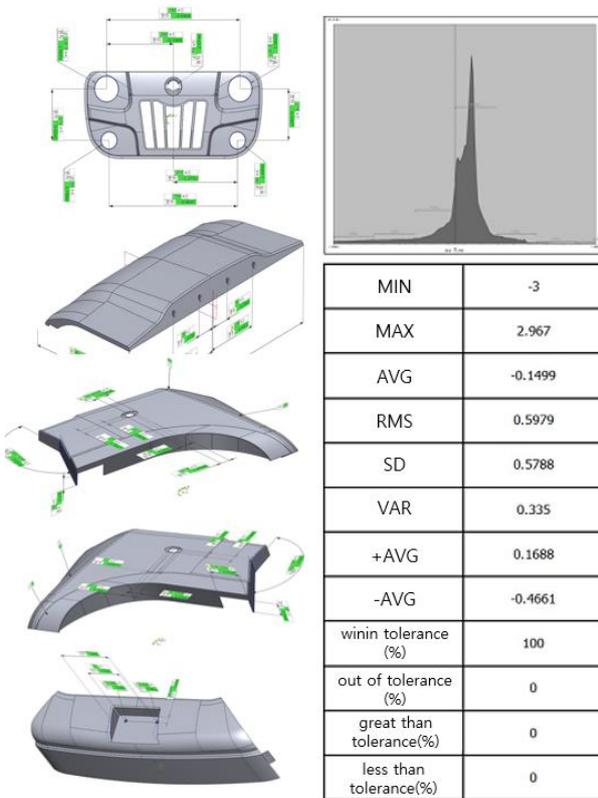


Fig. 9. Measurement result of molding precision

2. Computational Structural Analysis

CATIA로 Modeling된 전면부 5개의 3D 부품을 ABAQUS를 이용하여 실제와 동일한 볼트 조립으로 Assembly를 구현하고 94,199개의 C3D4(Tetra, Linear) 요소로 메시를 구성하였으며 해석의 용이성을 위해 Axisymmetric Model을 사용하였다[18].

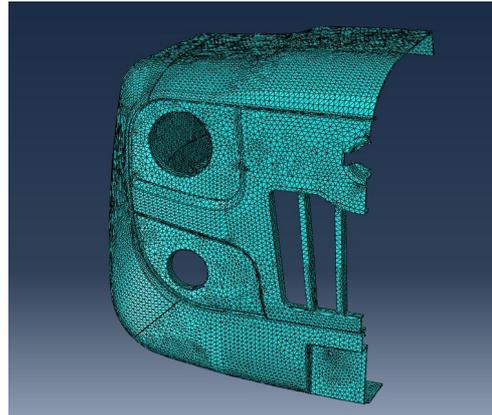


Fig. 10. Mesh model for FEA analysis

적재량, 사용 환경 등을 고려하여 전기차 최고속도의 83%에 해당하는 시속 25km 속도로 주행 충돌 시 전면부 충격을 모사하였다. 이때 충격 하중의 계산을 위하여 충격 하중은 충돌 발생이후 50ms 내에 발생하며 충격 발생동안 동일 속도를 유지하는 것으로 가정하였다. 해석결과, Fig. 11과 같이 ABS로 제작되어진 전면부 5개 파트 중 보닛을 제외한 4개의 파트에서 파괴가(Fig. 11의 회색 부분) 발생함을 알 수 있었다.

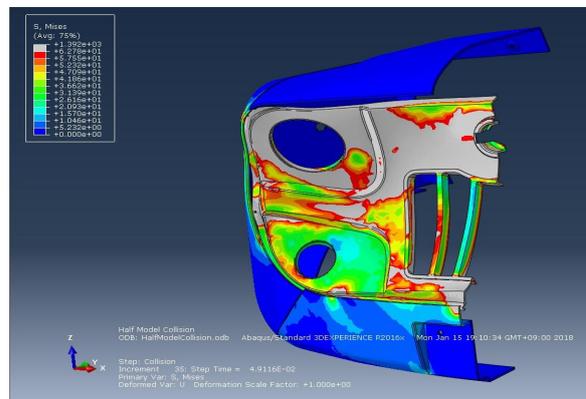


Fig. 11. Result of collision simulation of the front part

충격에 대한 안정성을 확보하기 위하여 Fig. 12의 붉은 색 부분에 해당하는 그릴 뒷부분에 SS400 재질의 지지부를 구성하는 것이 불가피 하였다.

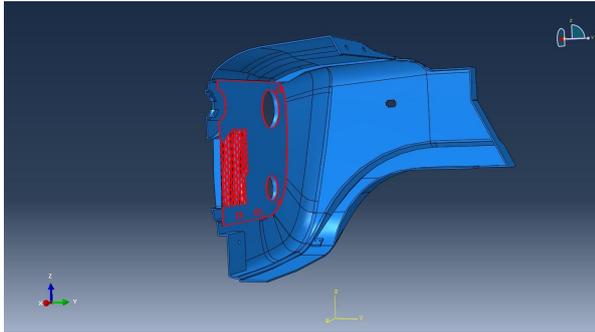


Fig. 12. Additional components to support stability

Fig. 13과 같이 오상훈[16]의 연구에서 제시된 SS400의 물성치를 통한 탄소성 해석을 실시하였으며 지지부 두께를 1.5mm에서부터 증가시키면서 해석한 결과, 두께가 3mm 이상일 때 충돌에도 안정성을 유지할 수 있음을 확인하였으며 소규모의 소성변형은 존재하지만 파괴부는 발생하지 않음을 Fig. 14와 같이 확인할 수 있었다.

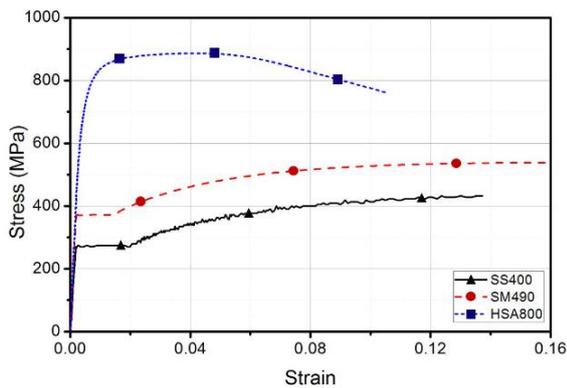


Fig. 13. Stress-strain Relationships[16]

구조해석 결과를 바탕으로 차량에 두께 3mm의 지지부를 적용함으로써 정면부와 측면부의 충돌 안정성을 강화함과 아울러 양쪽 휠더와 그릴 하부의 지지를 강화하였다.

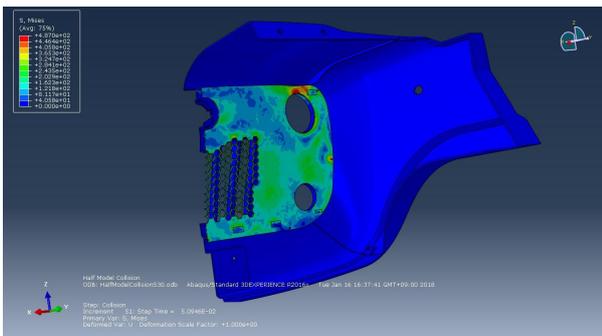


Fig. 14. Collision simulation results after components reinforcement

V. Conclusions

본 논문은 기존의 SS400의 철강재로 구성된 농업용 전기차의 전면부에 대해 경량화 및 생산의 효율성 개선을 위하여 ABS 대체소재를 통한 진공성형 방식의 설계 방법을 제안하였다. 제안하는 방식에 따른 결과물의 성능평가를 위하여 3차원 모델링을 기반으로 구조해석을 통한 안정성을 증명하였고 시제품 제작을 통해 기존 제품보다 38.82%의 경량화율을 개선을 확인하였다. 무게 측정은 전면부 5개 품목 및 지지부에 대한 통합측정을 실시하였으며, 측정에 사용된 시제품은 Fig. 15와 같고 측정 결과는 Table 3과 같다.

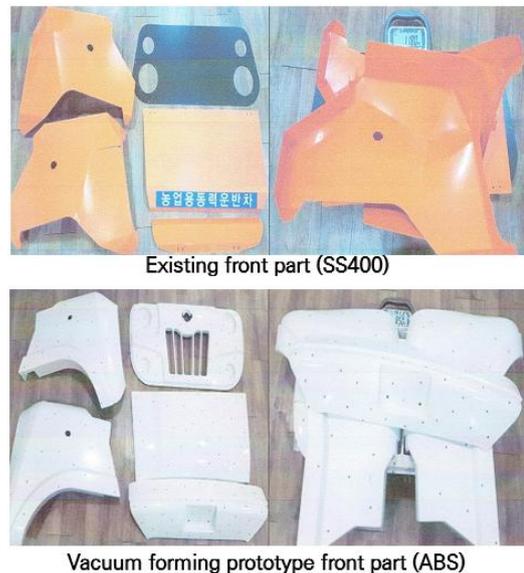


Fig. 15. Measuring scene for lightweight testing

Table 3. Results of Lightweight Test

Material	Weight	Lightweight ratio
Previous(SS400)	11.80Kg	38.82%
Proposal(ABS) + Support fixture(SS400)	8.50Kg	

또한, 주행안정성을 확인하기 위하여 등판/하강, 최고속도, 노면상태, 거리의 4가지 항목에 대한 주행시험을 실시하였다. 실제 농업용 전기차 사용환경에서의 시험을 위하여 13° 등판/하강 시 전면부 변형, 결합여부 및 최고속도 시속 30km 주행 시 변형 및 결합여부를 확인하였다. 총 주행거리는 10km(포장 도로 5km, 비포장 도로 5km)이며 전면부 변형, 차량과의 결합상태 등의 이상 유무를 검사하여 이상 없음이 확인되었다. 본 연구는 차량의 안전성 및 생산 공정의 간소화를 고려한 3차원 설계 기술을 제안하여

농업용 전기차 전면부 진공성형 제작을 통한 제조 공정 단축으로 생산성 높은 양산 체계 구축에 큰 도움이 된 것으로 사료된다. 향후, 농업용 외의 다품종 차량에 대한 전산 구조해석을 통한 구조화된 진공성형 공정의 연구를 지속적으로 진행할 것이다.

REFERENCES

- [1] HMG JOURNAL, <https://news.hmgjournal.com/>
- [2] Sang soon Kwon, "Global EV Trend & Korea Automotive Strategy for Electrification," Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 43(9), pp. 35-38, Sep. 2021.
- [3] Jiyoung Park, Jain Kim, Youngmo Koo, "Strategic Plans to Introduce Fuel Cell Electric Vehicle Considering Marketability and Eco-friendly Car Industry," The Korea Transport Institute(Basic research report), pp. 1-241, Nov. 2020.
- [4] Youngmo Goo, "Cooperation between Fuel Cell Electric Vehicle and Hydrogen Mobility," Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 43(6), pp. 44-47, June 2021.
- [5] Innovation Growth Portal, <https://www.moef.go.kr/>
- [6] AVL, <https://www.avl.com/web/>
- [7] Kulan Utility Vehicle, <https://www.greencarreports.com/news/>
- [8] TE 4x2 Electric Utility Vehicle, <https://www.deere.com/en/>
- [9] Electric Agricultural Carrier 'AGREV10', <http://www.hjp.kr/>
- [10] Hun-Kee Lee, Myeong-Chul Park, "Design and Implementation of the Front part of Agricultural Electric Vehicles using Vacuum Forming," Proceedings of the Korean Society of Computer Information Conference, Vol. 29(2), pp. 107-108, Jul. 2021.
- [11] Lee, J. K., Virkler, T. L. Scott, C. E., "Influence of initial sheet temperature on ABS thermoforming," Polymer Engineering & Science, Vol. 41(10), pp. 1830-1844, Oct. 2001. DOI : 10.1002/pen.10880
- [12] Yuan, H. L., "The Design of the Vacuum Plastics- Absorption Mould for Fridge Freezer Inner Shell," Advanced Materials Research, Vol. 530, pp. 29-33, June 2012. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMR.530.29
- [13] Lee, Ho Jin, et al. "Three-Dimensional Thermoforming Analysis of an Inner Case with Three Cavities for Refrigerator," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 40(5), pp. 505-511, May 2016. DOI : 10.3795/ksme-a.2016.40.5.505
- [14] Hongling, Y., Guoquan, F., "Refrigerator Cabinet Foaming Mold Accurate Design and Manufacture based on the Vacuum Deformation Mechanism," 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, pp. 1342-1346, Sep. 2012. DOI : 10.2991/emeit.2012.297
- [15] Yehia Abdel-Nasser, et al. "Frontal Crash Simulation of Vehicles Against Lighting Columns in Kuwait Using FEM," International Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol. 2(5), pp. 101-105, Dec. 2013. DOI : 10.5923/j.ijtte.20130205.02
- [16] Sang Hoon Oh, Hae Yong Park, "A Study on Beam-to-Column Connections with Plate Type Energy Absorption System," Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 25(1), pp.103-114, Feb. 2013. DOI : 10.7781/kjoss.2013.25.1.103
- [17] Ho Jin Lee, Dong Gyu Ahn, "Methodology of Three-Dimensional Thermoforming Analysis to Simulate Forming Process of Medium and Large-Sized Plastic Parts," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 32(11), pp. 953-960, Nov. 2015. DOI : 10.7736/KSPE.2015.32.11.95
- [18] M.M. Rimy and A.A. Faieza, " Simulation of Car Bumper Material using Finite Element Analysis," Journal of Software Engineering, Vol. 4(3), pp. 257-264, Dec. 2010. DOI : 10.3923/jse.2010.257.264

Authors



Hun-Kee Lee received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Kyungpook National University in 2003, and M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from POSTECH in 2005 and 2009 respectively.

He is currently a Professor in the Department of Aero Mechanical Engineering, Kyungwoon University. He is interested in Design and Strength Evaluation of Structures, Optimization Technique and Optimal Shape Design.



Myeong-Chul Park received the B.S. degree in Computer Science from Korea National Open University in 1999, and the M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science from GyeongSang National University in 2002 and

2007, respectively. He is currently a Professor in the Department of Avionics Engineering, KyungWoon University. He is interested in Visualization, Simulation, Education of Software, Virtual Reality, and Parallel Programming.