

적재 용이성 향상을 위한 휠체어 프레임 구조 설계

오민성¹, 문태용¹, 이창연¹, 홍석무^{2,3*}

¹공주대학교 기계자동차공학부, ²공주대학교 미래자동차공학과, ³그린카기술연구소

Design for Improved Stowability of Wheelchair Frame Structure

Minseong Oh¹, Taeyong Moon¹, Changyeon Lee¹, Seokmoo Hong^{2,3*}

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

²Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University

³Institute of Green Car Technology

요약 최근 통계에 따르면, LPG 가스 택시가 국내 택시의 88%를 차지하고 있다. LPG 차량의 연료 탱크는 트렁크 내부에 위치하며, 일반 가솔린 차량 대비 16.7%의 공간 손실이 발생하기 때문에 거동불편 대상자의 휠체어를 적재하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 협소한 공간에 적재가 가능한 접이식 휠체어 프레임의 설계 구조를 제안하고자 한다. 트리즈 기법을 통해 설계된 접이식 휠체어 프레임은 기존 휠체어 프레임의 좌우 폭을 조절할 수 있는 기능을 그대로 유지하면서 전후방 폭을 조절이 가능하도록 개선하였고, 휠체어 사용 시 구조적 안정성을 보장할 수 있도록 설계되었다. 해당 설계를 통해 개선 이후 부피가 약 11.8 % 감소하였다. 프레임의 설계 구조에 대한 안정성을 검증하기 위해 휠체어 사용에 따른 경계조건을 고려해 유한요소해석으로 구조해석과 피로해석을 수행하였으며, 등가응력 분포와 최대 응력 값에 대하여 확인하였다. 최종적으로 설계된 프레임에 대한 시제품을 제작해 적재 상황을 구현하여 개선된 설계 결과의 유효성을 입증하였다.

Abstract According to recent statistics, LPG gas taxis account for 88% of the taxis in Korea. The fuel tank of an LPG vehicle is located inside the trunk, resulting in 16.7% space loss compared to a regular gasoline vehicle. Hence, the wheelchair of a person with mobility impairment cannot be loaded. Therefore, this study proposes a design structure for a folding wheelchair frame that can be loaded in a narrow space. The folding wheelchair frame designed using the TRIZ technique allows adjustments of the front and rear widths while maintaining the function of adjusting the left and right widths of the existing wheelchair frame. The frame was designed to ensure structural stability when the wheelchair was used. This design resulted in an approximately 11.8% volume reduction after the improvement. The stability of the designed structure of the frame was verified by structural analysis and fatigue analysis using finite element analysis considering the boundary conditions for wheelchair use. The equivalent stress distribution and maximum stress values were also verified. Finally, a prototype of the designed frame was manufactured, and a loading situation was realized to demonstrate the validity of the improved design results.

Keywords : Fatigue Analysis, Folding Wheelchair, Stowability, Structure Analysis, TRIZ

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju Univ.)

email: smhong@kongju.ac.kr

Received November 16, 2023

Accepted February 6, 2024

Revised December 26, 2023

Published February 29, 2024

1. 서론

국토부, 카이즈유 데이터 연구소에 따르면, 국내 택시의 약 23만 대 중 약 20만 대(88%)가 LPG 택시로 구성되며, 이 중 가장 많은 차종은 H사의 S 모델로 약 1.6만 대로 조사되었다[1]. 이처럼 LPG 가스 차량이 택시업계에서 널리 채택되는 이유는 LPG의 우수한 연비와 경제적인 연료비용 때문이다. 또한 LPG 연료 저장 탱크는 트렁크 내부 공간에 위치하기 때문에, 차량의 중량 분포를 최적화하여 차체를 개선하고 승차감을 향상시킨다. 하지만 LPG 가스탱크의 부피로 인해, 동일 차종의 가솔린 차량 대비 트렁크 공간이 약 16.7% 감소되는 단점이 있다. 이러한 제약은 최근 사회적 문제로 대두되는 장애인 이동권과 결합해 부정적인 상호작용을 일으켜 거동 불편 대상자의 휠체어를 LPG 택시 트렁크에 적재하지 못하는 불편을 겪는다. 따라서 본 연구에서는 LPG 차량의 협소한 트렁크에 적재할 수 있는 접이식 휠체어 프레임 설계를 하는 것을 목적으로 한다. 이때 LPG 택시 차량의 기준은 LPG 택시로 가장 많이 사용되는 H사의 S 모델로 한다.

접이식 휠체어 형상을 구체화하기 위해 트리즈(TRIZ) 기법을 이용한다. 트리즈 기법은 창의적 문제 해결 이론으로써 기술 관련 문제를 해결하기 위해 개발되었으나, 현재는 다양한 분야에서 활용되고 있다[2-4]. Lee 등[5]

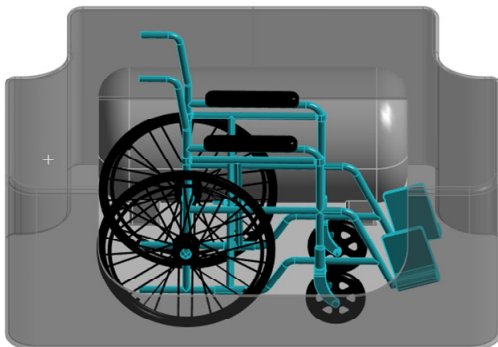


Fig. 1. Interior of LPG gas vehicle trunk

은 트리즈 기능 분석 기법을 통해 타투 머신의 잉크 튜브 현상의 근본원인을 파악하고, 트리즈의 트리밍 기법을 통해 벨로우즈가 없는 비늘 유닛 설계를 진행하여 위 현상을 해결하였다. Choi 등[6]은 에어컨디셔너 제품에 트리즈 모순 행렬표를 적용하여 소음과 강도 개선함으로써 트리즈에서 제시하는 해법으로 시형작업을 줄이고 체계적 해결이 가능함을 확인하였다. 따라서 본 논문 또한 트리즈 기법을 활용하여 프레임 구조설계를 진행한다.

먼저, 트리즈 기법을 활용하여 휠체어 설계의 문제점에 대하여 구체화하고 3차원 CAD 프로그램을 활용하여 접이식 휠체어를 설계한다. 이후 접이식 휠체어에 대한 구조해석과 피로해석을 진행하여 접이식 휠체어의 안정성을 검증하였다. 최종적으로 설계된 모델의 프레임 목업을 제작하고, 실제 LPG 차량에 적재하여 변경된 설계의 유효성을 검증하였다.

2. 접이식 휠체어 설계

2.1 수동 휠체어 기본 구성

휠체어의 구조물은 좌석(Seat), 등받이(Backrest), 손잡이(Handle), 뒷바퀴(Main wheel), 앞바퀴(Caster), 발판(Footrest) 등으로 이루어진다. 휠체어는 사용자에게 편안함과 안정성을 제공하도록 설계되며, 좌석과 등받이는 사용자의 체형에 맞게 조절된다. 예시로 좌석 너비의 경우 앉은 자세에서 골반의 가장 넓은 면을 측정 한 후, 그 수치에 2~5 cm를 추가하여 적절한 좌석 너비를 설정한다. 또한 팔걸이 높이는 착석 면에서 팔꿈치까지의 수직 길이를 측정 한 후, 해당 길이에 1인치를 더하여 팔걸이 위치를 고정한다[7]. 자세한 형상은 Fig. 2에 도시되어 있다.



Fig. 2. Components of manual wheelchair

2.2 접이식 휠체어 설계

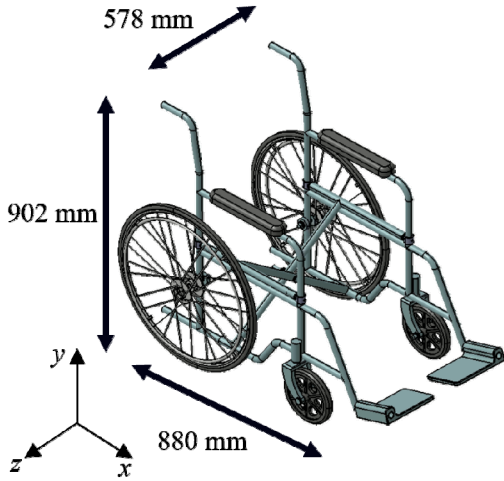


Fig. 3. Basic specification of conventional wheelchair

Fig. 3과 같이 기존 휠체어를 설계할 때 편안함과 안전성을 고려하여 x축 길이는 880 mm, y축 길이는 902 mm, z축 길이는 578 mm로 설정하였다. 이때 일반적인 수동 휠체어의 경우, z축 방향으로 축소가 가능하지만 x축 방향의 길이는 상대적으로 고정되어 있어 LPG 트렁크의 x축 방향 길이 530 mm에 적재하기에 어려움이 있다. 이에 따라, 전체 프레임의 x축 방향 축소가 요구된다. 일반적으로 휠체어 뒷바퀴의 지름은 26~20인치(660.4~508 mm)로 사용한다. 따라서 휠체어 뒷바퀴 지름을 530 mm 이하로 고정하고 휠체어 프레임의 길이를 축소하여 LPG 트렁크에 적재할 수 있도록 설계를 진행하도록 한다.

2.3 트리즈 기법에 따른 프레임 설계

2.3.1 트리즈 기법

트리즈(TRIZ)는 구소련 해군의 겔리히 알츠슐러(Genrich S. Altshuller)가 1946년부터 개발하기 시작한 체계적인 발명 이론으로, 창의적 문제 해결 이론을 뜻하는 러시아어(Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch)의 머리글자이다[8,9]. 트리즈는 기술 시스템을 개선할 때 다양한 종류의 모순을 해결하기 위한 도구로 사용된다. 이 모순은 한 특성을 개선하려고 할 때 다른 특성이 악화되는 기술적 모순(Technical Contradiction)과, 동일한 요소 또는 기술 시스템 내에서 두 가지 반대되는 속성이 필요할 때 발생하는 물리적 모순(Physical Contradiction)으로 나뉜다. 트리즈에 따른 문제 해결

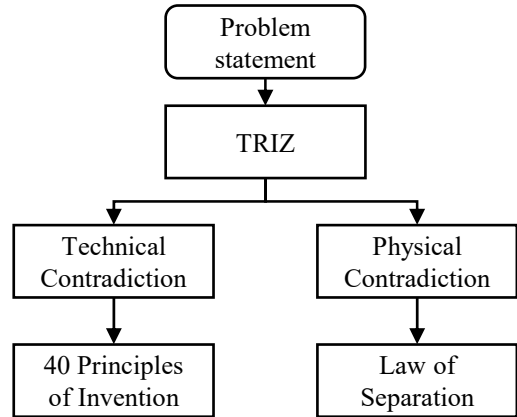


Fig. 4. TRIZ problem statement and solutions according to the problem statement

과정은 Fig. 4와 같다. 이를 참고해 프레임 형상 변경에 트리즈 기법을 이용한다.

2.3.2 프레임 제작

프레임은 CATIA V5 프로그램을 사용하여 상용화된 휠체어 프레임을 기반으로 3차원 설계를 진행하였다[10]. 일반적인 휠체어의 경우 Fig. 5의 (b)에서 (c) 과정으로 변경 시에 구조상의 장애가 발생한다. 이것은 트리즈 기법에 의해 기술적 모순으로 정의된다. 이를 해결하기 위해 모순 행렬표를 활용하였다[11]. 모순 행렬표를 통해 선정된 40 가지 실험 원리 중 2, 26, 12, 17번 원리가 선정되었으며, 그중 17번 “차원 변경”을 적용하고자 한다.

Fig. 5 (a)와 같이 기존 휠체어의 형상은 3차원 6면체 형상이기에, Fig. 5 (b)는 폭을 줄여 면으로, Fig. 5 (c)는 면에서 선으로 변형시켰다. 그림과 같은 형상을 구현하기 위해 양측 프레임에 힌지를 추가하고, 중심의 x자 프레임 제거 및 특정 동작을 적용하면 구부러지는 1차 프레임을 설치하였다. 또한 1차 프레임과 평행한 프레임을 좌석 후방에 배치하여 구조 안정성을 보완하였다.

프레임의 전체 크기는 Fig. 5 (c)와 같이 291 mm × 1270 mm로 개선하였으며 기존 프레임 설계 대비 약 11.8 % 부피 감소 효과를 확인하였다. 이후 LPG 택시 차량의 기준으로 설정한 H사의 S 모델 차종의 트렁크 사이즈인 530 mm × 1370 mm에 적재할 수 있음을 3D CAD를 통해 확인하였으며 그 형상은 Fig. 6과 같다. 프레임 설계 변경을 통해서 프레임 부품 수와 무게는 기존과 동일하면서도 적재 용이성이 향상시킨 제품 설계가 수행되었다.

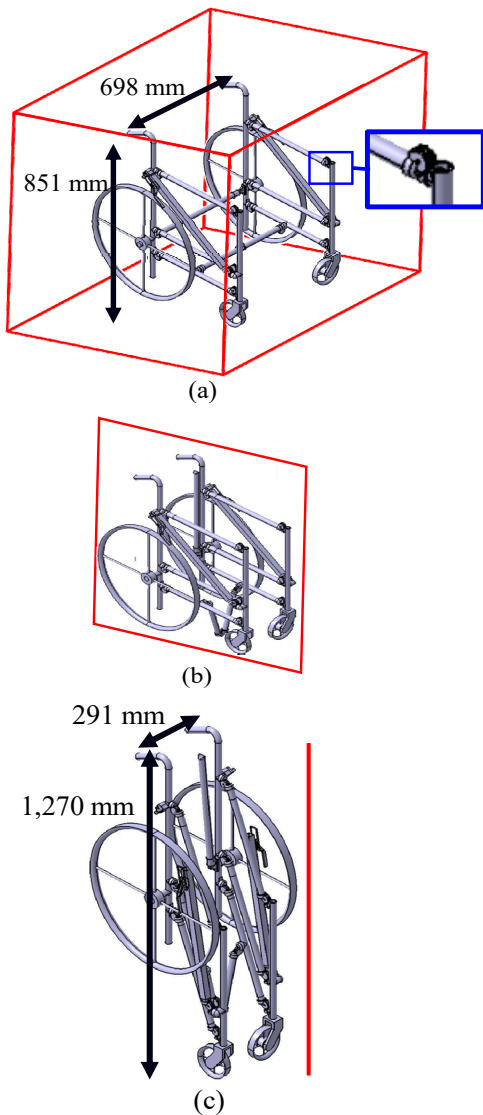


Fig. 5. Folding process according TRIZ (a)unfolded state, (b)folding process, and (c)folded state

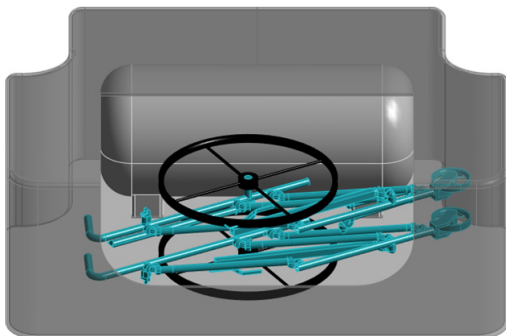


Fig. 6. Folded wheelchair loaded in 3D cad

3. 구조해석 및 검증

3.1 재료의 기계적 성질

휠체어 프레임은 일반적으로 알루미늄 재질을 사용하여 제작하여 경량화와 높은 강도를 확보하지만, 본 논문은 이후 목업 작업 시 작업환경을 고려하여 Steel(강철) 재질로 제작하였다. 유한요소해석 또한 동일 소재로 진행하였으며 소재 특성은 Table 1에 제시한 바와 같이 ANSYS 소프트웨어 Database에서 Structural steel의 일반적인 물성을 사용하였다[12].

Table 1. Material properties for FEA

Material	Structural steel
Density [kg/m ³]	7,850
Young's modulus [GPa]	200
Poisson's ratio [-]	0.3
Yield strength [MPa]	250
Ultimate strength [MPa]	460

3.2 경계 조건 및 메쉬 설정

Fig. 7와 같이 구속 조건의 경우 운전자가 휠체어에 앉았을 때 발생하는 중력과 하중을 고려한 경계조건을 정하고 유한요소해석을 진행하였다. 이때 터미의 무게는 성인 남성의 평균 몸무게인 70 kgf 적용하였으며, 전후방 바퀴의 경우 기존 프레임을 그대로 사용하였기 때문에 구조상 문제가 없을 것으로 판단하고 강체(Rigid body)로 제한했다.

Mesh 크기는 Fig. 8에 도시한 바와 같이 프레임 중 터미의 둔부에 맞닿아 과도한 응력이 발생할 것으로 예측하여 핸들 프레임(Handle frame)을 25 mm로 설정하였다. 부품별 Mesh 크기와 요소 및 노드 수는 Table 2와 같다.

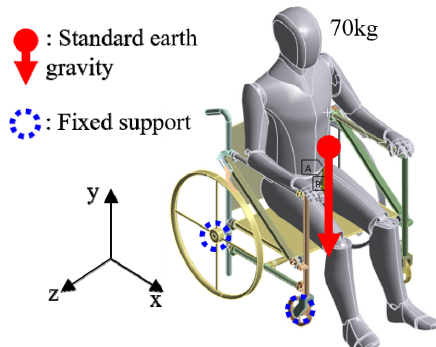


Fig. 7. Loading and boundary conditions

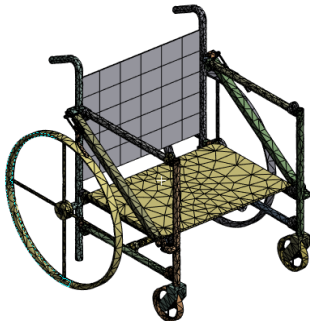


Fig. 8. Mesh in Wheelchair

Table 2. Comparison of analysis result after optimization

	Handle frame	Seat, Backrest	Frame	Total
Elements	4,298	8,242	21,147	33,687
Node	8,654	16,926	47,633	73,213
Mesh size [mm]	25	100		
Materials	Structural steel			

3.3 구조해석 결과

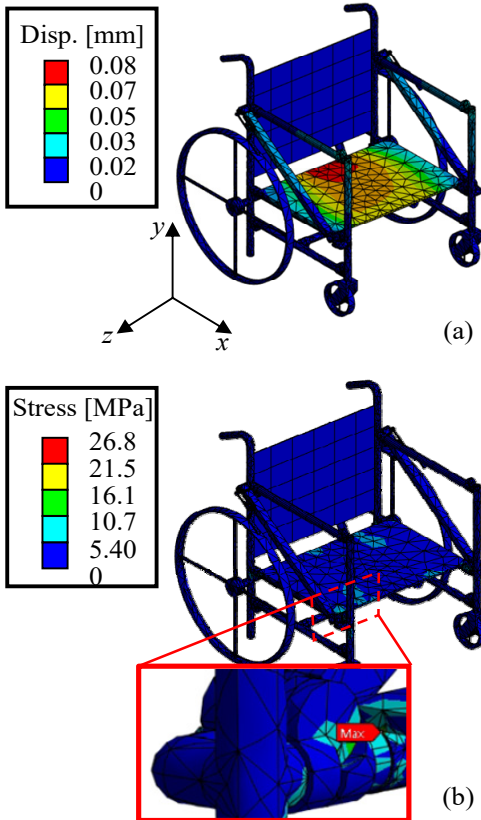


Fig. 9. FE results from Ansys structural analysis (a)total deformation, (b)equivalent stress

Fig. 9 (a), (b)는 모델의 변형량과 응력을 시각적으로 나타낸다. 해석 결과, 최대 변형량은 좌석에서 0.08 mm 이며, 최대 응력은 우측 앞 힌지의 연결부에서 26.8 MPa, Safety Factor는 9.32이다. 응력의 경우 Structural steel의 항복응력인 250 MPa를 초과하지 않기 때문에 휠체어가 안전하게 작동할 수 있을 것으로 예측된다.

3.4 피로수명 예측

피로해석은 구조물에 대한 반복적인 응력 적용과 해제로 인한 파손 가능성을 평가하는 프로세스로, 구조물의 안전성을 평가하기 위해 진행된다[13].

피로해석은 주로 응력-수명 이론과 변형률-수명 이론 두 가지 중 하나에 근거하여 진행된다[14]. 응력-수명 이론은 재료에 적용되는 응력이 탄성 영역 내에 있는 경우 적용되며, 이론적으로 수명이 긴 상황에 해당된다. 반면 변형률-수명 이론은 재료에 적용되는 응력이 탄성 및 소성 영역에 영향을 미치는 경우로 그 결과 수명이 짧은 상황에 해당된다.

휠체어 프레임의 경우 구조해석 결과 탄성 영역 내에서 안전하게 거동하므로 응력-수명 이론이 적용된다. 따라서 휠체어 프레임의 소재로 사용된 Structural steel의 S-N 선도(S-N(stress-N. of cycles) curve)를 적용하였고, 해당 S-N 선도는 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 11는 Cyclic loads 설정을 나타내었다. 평균응력이론은 굿맨 이론을 적용하였으며[15], 하중에 대한 비율을 설정하여 26.8 MPa에서 0 MPa까지의 반복하중을 구현하였다.

Fig. 11는 해석을 통해 예측한 피로수명 결과를 나타내었다. 해석 결과 100만 회 이상이므로, 설계된 휠체어 프레임은 반복하중에 대하여 피로수명을 만족하였다.

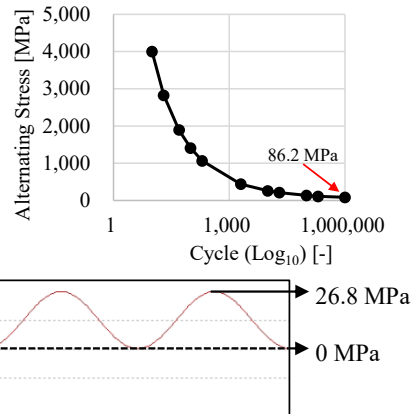


Fig. 10. S-N Curve for Structural steel and cyclic loads Setting

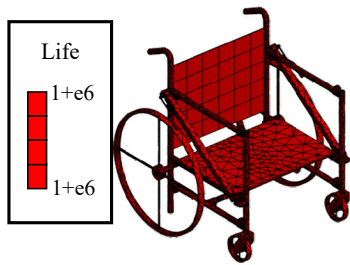


Fig. 11. The results of minimum fatigue life

4. 목업 제작 및 실물 검증

4.1 휠체어 목업 제작

CATIA V5를 이용한 설계를 기반으로 휠체어 프레임에 CO₂ 용접을 진행하였다. 용접 중 아크 용접을 선택한 이유는 전류밀도가 높아 용입이 깊고 용접 속도가 빠르기 때문이다. Fig. 12 (a) ~ (c)는 실제 제작된 휠체어의 거동을 나타내고 있다. Fig. 12 (a)는 사용을 위해 펼쳐진 형태이다. 이를 화살표 방향으로 접을 경우 Fig. 12

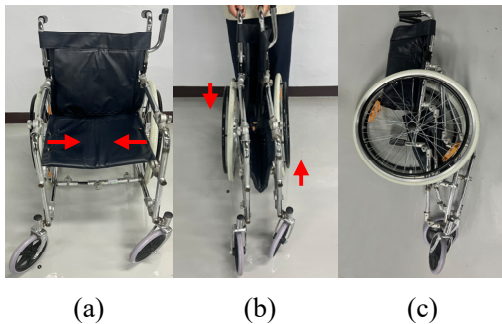


Fig. 12. Folding process of wheelchair mockup (a) unfolded state, (b) folding process, and (c) folded state



Fig. 13. Folded wheelchair loaded

(b) 형태가 된다. 이를 세로 방향으로 접어 놓힌 형태가 Fig. 12 (c)이자 최종 형태이다. 최종적으로 휠체어를 접은 상태에서 H사의 S 모델의 트렁크에 적재하여 논문의 설계 의도에 적합한 프레임 목업 제작을 완료하였다. 이는 Fig. 13에 도시하였으며, 추가로 그림 속 트렁크 안 흰 상자의 경우 LPG 가스에 의해 제거된 공간을 효과적으로 표현하기 위해 사용되었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 휠체어에서 적재 용이성을 증가시키기 위해 힌지를 추가하고, 구조를 변경하여 새로운 접이식 휠체어를 설계하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존 휠체어의 모서리 구조에 총 15개의 힌지를 장착하여, 전후방 폭을 880 mm에서 530 mm로 약 40% 감소시키면서, 높이 방향을 851 mm에서 1,270 mm로 약 49% 증가시킨 새로운 모델을 설계하였다. 설계가 완료된 모델의 안정성 확인을 위해 실제 사람이 앉은 것과 동일한 조건으로 구조해석과 피로해석을 진행하였다.
- (2) 해석 결과 휠체어가 받는 최대 등가 응력은 26.8 MPa이다. 프레임에 적용된 물성인 Structural Steel의 항복응력 250 MPa과 비교 시 Safety factor 9.32로 해당 프레임 구조의 안전성이 검증되었다. 또한 피로해석 결과 휠체어의 수명은 1E6 회로 시뮬레이션 상으로 파손되지 않을 것으로 예측된다.
- (3) 실제 차량 트렁크에 적재 가능 여부를 검증하기 위해 접이식 휠체어 목업을 제작하였으며, LPG 차량의 트렁크에 적재에 성공하여 접이식 휠체어 모델이 적재 용이성을 가진다는 것을 증명하였다.

References

- [1] Y. J. Kim, Even electric cars are a burden... The LPG industry sighs at the discontinuation of Sonata taxis, [Internet], Chosun Biz, c2023 [cited 2023 September 10] Available From: <https://biz.chosun.com/industry/company/2023/06/30/KXUPV4FKX5CBRAOMP3W74NO4LQ> (Sep. 20, 2023)
- [2] H. G. Hwang, W. J. Chung, S. S. Sul, D. Y. Kim, "A Study on Variable Mold for Improving the Forging Process of Transition Nozzle using TRIZ and DEFORM(SUP)®"

</SUP>", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.19, No.6, pp.29-35, Jun, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.06.0>

[3] S. M. Seo, C. E. Kim, "Development of HPS (Hydrogen Plasma-treatment System) using TRIZ", Korea Management Engineers Society, Vol.25, No.2, pp.171-185, Jan, 2020.
DOI: <http://doi.org/10.35373/KMES.25.2.10>

[4] J. S. Yang, S. J. Park, "Development of Badminton Shuttlecock Alignment Device using TRIZ", Journal of Sport and Leisure Studies, Vol.62, pp.11-21, Nov, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.51979/KSSLS.2015.11.62.11>

[5] C. Y. Lee, B. H. Kim, Y. T. Park, "Development on A Semi Permanent Cosmetic Device with Removable Ink Cartridge Using the TRIZ Method", Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol.20, No.4, pp.516-521, Jan, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.17958/ksmt.20.4.201808.516>

[6] H. Y. Choi, Y. M. Jeong, J. S. Lee, "Design of Air-Conditioner Frame Structure Using TRIZ Based Contradiction Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.21, No.6, pp.961-967, Oct, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7735/ksmt.2012.21.6.961>

[7] knat, Understanding and Repairing Manual Wheelchairs (Theory), [Internet], Central Assistive Device Center, c2023 [cited 2023 January 16] Available From: https://www.knat.go.kr/KNW/home/board/brd_vew.php?tb_no=67&brd_no=2678 (Sep. 20, 2023)

[8] J. H. Jeong, Y. W. Park, "TRIZ Problem Definition through Requirements Engineering", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.19, No.4, pp.440-448, Aug, 2010.
<http://www.triz.or.kr/main/>

[9] http://ps-2.kev009.com/CATIA-B18/icons_C2/CATIApenot.htm, (2008)

[10] Y. M. Park, "A Case Study on the Application of Solving a Problem through TRIZ Contradiction in Design Class", Journal of Basic Design, Vol.19, No.1, pp.225-236, Jan, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.47294/KSBDA.19.1.17>

[11] https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html?lang=en, Nov, (2022)

[12] S. S. Kang, J. H. Lee, "Evaluation of Fatigue Life and Structural Analysis for Dish-Type and Spoke-Type Automobile Wheels", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol.35, No.10, pp.1315-1321, Oct, 2011.

[13] Rashiga Walallawita, H. H. Lee, S. Y. Park, T. K. Kim, K. J. Lee, "Shape Design Improvement and Fatigue Life Prediction of Air Compressor Rotor Assembly", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.27, No.7, pp.577-583, Jul, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2019.27.7.577>

[14] Y. B. Seo, G. Y. Park, C. Kim, "Structural Design and

Fatigue Life Prediction of an Ultra-High-Pressure Vessel (Type I) to be Used in a Hydrogen Gas Station", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol.47, No.3, pp.255-261, Mar, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2023.47.3.255>

오 민 성(Minseong Oh)

[준회원]



• 2018년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 기계자동차공학부

<관심분야>

유한요소해석, 최적 설계

문 태 용(Taeyong Moon)

[준회원]



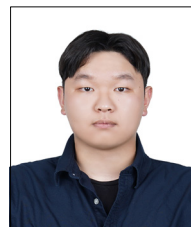
• 2019년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 기계자동차공학부

<관심분야>

유한요소해석, 3D 모델링

이 창 연(Changyeon Lee)

[준회원]



• 2020년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 기계자동차공학부

<관심분야>

유한요소해석, 자작 자동차

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[종신회원]



- 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 석사)
- 2007년 3월 : Technical University of Munich, Germany, Department of Mechanical Engineering (기계공학박사)
- 2007년 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자 GTC, 수석연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 미래자동차공학과 교수

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조, 유한요소해석, 최적 설계