

# 휠체어 설계를 위한 구조 안전성 평가 플랫폼 연구

<sup>1</sup>\*이용우, <sup>2</sup>이진희

## A Study on Safety Assessment Platform for wheelchair structural design

<sup>1</sup>\*Yongwoo Lee, <sup>2</sup>Jinhee Lee

### 요약

본 연구는 휠체어 사용자의 안전성을 확보하기 위한 목적으로, 유한요소 해석을 활용하여 휠체어의 구조 안전성을 평가할 수 있는 플랫폼의 개발을 위한 연구를 수행하였다. 차량 탑승 휠체어의 안전 평가 기준은 ANSI/RESNA WC 19 및 ISO 7176-19에서 정의되어 있다. 이러한 기준을 기반으로 유한요소 해석을 수행하여 휠체어의 각 부재의 단면력을 분석하고 제원에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 휠체어의 주요 부재에 대한 등가 복합하중을 도출하고, 휠체어 설계 시 주요 부재가 가져야 하는 단면 제원을 확인하며 안전성 평가 검증 프로세스를 연구하였다. 연구 결과, 휠체어 프레임의 주요 부재의 단면값이 변화함에 따라 부재력이 변화하는 것을 확인할 수 있었으며, 안전 설계를 위해 측면부의 전후방향 하부 부재와 후면부 상하방향 부재가 가장 높은 단면값의 확보가 필요한 것으로 나타났다. 이를 통해 휠체어 설계단계에서 안전성을 사전에 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 향후 연구에서는 이 결과를 기반으로 휠체어의 설계 제원에 따른 안전평가 플랫폼의 연구를 수행하고자 한다.

### Abstract

*With the goal of ensuring the safety of wheelchair users, this study was conducted using finite element analysis, focusing on the development of a platform that can be used to evaluate safety during the design stage. Safety evaluation criteria for wheelchairs used in vehicles are defined in ANSI/RESNA WC19 and ISO 7176-19. Based on these standards, finite element analysis was performed to assess the sectional forces of each component of the wheelchair and sensitivity analysis was conducted based on the specifications. These results were used to derive equivalent composite loads for the wheelchair's main components, determine the necessary sectional specifications for these main components in the wheelchair design phase, and investigate the process of safety assessment verification. The study showed that member forces vary with changes in the cross-sectional values of the wheelchair frame's main components, with the front and rear lower members, as well as the rear upper and lower members, requiring the highest cross-sectional values for safety design. This study offers a proactive method for evaluating safety in the wheelchair design stage, and in future research, we plan to develop a safety evaluation platform based on these results.*

**Keywords:** Person with Disability, Wheelchair Design, Frontal Crash, WTORS, Hybrid III 50th FE Dummy, Finite Element Method

<sup>1</sup>\* 교신저자 신한대학교, 미래자동차공학과, 부교수 (ywlee@shinhan.ac.kr)

<sup>2</sup> 신한대학교 산학협력단 연구교수 (dlwlsqml630@naver.com)

## I. 서론

우리나라는 1998 년 이후 「장애인·노인·임산부 등의 편의증진 보장에 관한 법률」을 시행하고 있으며, 교통수단을 이용한 이동 편의에 대한 제도적 보완의 필요성을 고려하여 2006 년에 「교통약자의 이동편의 증진법」을 통해 교통약자의 이동권을 증진하기 위해 휠체어 탑승 가능한 교통수단을 확대하고 있다. 이러한 교통 수단을 이용하는 교통약자는 차실(cabin)내에서 일반 차량 좌석으로 옮겨 착석한 후 이동하거나, 휠체어에 탑승한 상태로 이동하여야 한다. 일반 좌석으로 옮겨 이동하는 경우 차량 제작 시 규정된 안전법규를 충족하므로 일반승객과 동등한 수준의 안전을 보장받을 수 있으나, 휠체어를 탑승한 상태로 이동하는 경우 휠체어가 차량의 일반 좌석 수준의 안전성을 확보하여야 하나 현실적으로 차량 충돌이나 긴급 상황 발생 시 부상 위험이 더 높게 보고되고 있다[1][2][3].

이에 따라, 차량에서 휠체어에 앉아 이동하는 경우, 국내외 법규에서는 차량 접근성, 휠체어 고정 위치, 대중교통 장비에 대한 요구 사항을 규정하고 있으나, 장비와 휠체어의 호환성 보장 및 휠체어에 앉은 탑승자의 안전에 대한 규제는 부족한 실정이다. 이에 국내외적으로 차량 좌석으로 사용되는 휠체어 및 휠체어 탑승자에 대한 안전성 평가기준의 확립을 위한 자발적 산업 표준을 개발하고 발전시키기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있다[4][5].

이러한 휠체어 자발적 산업 표준에도 불구하고, ANSI/RESNA WC19[6]은 자동차 좌석으로 사용하기 적합한 휠체어의 규격, 시험 방법 등의 표준을 제시하고 있다. 이 표준은 자동차에 사용하기 위한 휠체어의 고정 및 탑승자 구속장치에 대한 SAE J2249[7]의 표준에서 누락된 차량 좌석 역할을 보완하며, 이를 위해 설계 및 시험되지 않은 휠체어에 대한 최소 요구사항을 설정하고 있다. 또한, 휠체어 운송 안전(Wheelchair transportation safety, WTS)과 관련된 국제 표준인 ISO 7176-19[8]과 유사하지만 보다 엄격한 규정을 적용하고 있다. 국내에서도 이에 따라 휠체어 고정장치, 휠체어 탑승 교통수단 및 휠체어 탑승자의 안전성 평가를 위한 다양한 연구가 진행되었다. Kim et.al의 연구[9]에서는 휠체어가 좌석으로 이용되는 경우 안전벨트의 형태에 따른 승객의 거동 및 상해에 대하여 해석을 통한 연구를 수행하였으며, Kim et.al의 연구[10]은 ANSI/RESNA 에서 규정하고 있는 3 점식 벨트를 적용한 경우 전방과 측면 충돌시의 상해 거동의 연구를 수행하였다. 또한, Han et.al의 연구[11]에서는 다물체 동역학 모델을 구성하고 차량 주행 시 발생할 수 있는 휠체어의 거동 및 안정성에 대한 연구가 수행되었다. 실제 장애인 탑승용 차량에 대한 실험적 연구로는 Kim et.al[12]와 Kim et.al[13]에서 수행되었으며, 주로 승객의 안전성 평가를 중심으로 연구되었다. 휠체어 고정장치는 Oh et.al[14]의 연구에서 제시되었는데 승객의 안전성 평가를 기준으로 조사되었다.

이러한 자발적 표준들은 법규로 규제 받는 차량제작사 좌석으로 이동하는 승객과 동일한 수준의 안전을 확보할 수 있도록 규정하고 있으나 휠체어에 대한 연구는 많지 않은 실정이다. 해외의 경우 이러한 자발적 규정을 만족하는 휠체어를 시험 평가를 통해 평가 결과를 일부 공개[15]하고 있으나, 국내 휠체어의 경우 규정을 충족하지 못하는 경우가 대부분이다. 이에 본 연구에서는 해석적 방법을 통해 휠체어의 주요 부재에 대한 충돌 특성을 검토한 후 부재에 대한 강도요구사항을 분석하여 실제 시험 이전 휠체어의 안전성을 사전에 검토할 수 있는 플랫폼의 평가기준에 대한 연구를 수행하였다.

## II. 연구절차 및 방법

본 연구는 실제 시험 및 해석을 수행하지 않고 휠체어 안전성능 검토를 위한 안전성 평가를 수행하기 위한 플랫폼의 판정기준을 도출하는 방법으로 WC 19 표준에 따른 평가방법을 기준으로 도출되었다.

이에 따라, UMTRI(University of Michigan Transportation Research Institute)에서 제시된 모델에 대하여 유한요소 해석 모델을 구성하고 각 부재에 대한 민감도 분석을 통해 대표 부재별 제원 변경에 따른 특성을 분석하였다. 이를 기반으로 각 부재에 작용하는 충격하중에 대한 분석을 통해 방향별 등가 하중을 추출하고 복합 하중을 고려하여 안전성능을 충족하는 최소요구

사항을 도출하였다. 그림 1 은 본 연구에서 수행하고자 하는 평가 기준 도출에 대한 절차를 보여주고 있다.

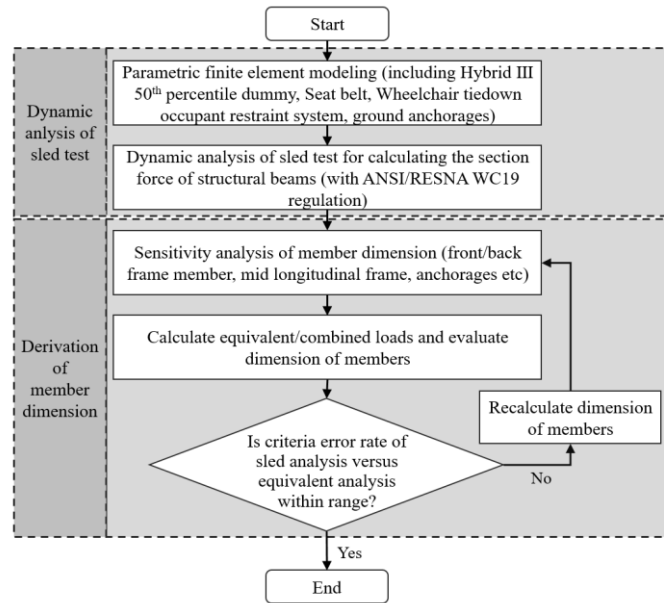


Figure 1. Flow chart of WTS (wheelchair Transportation safety) evaluation for wheelchair design

그림 1. 휠체어 설계를 위한 휠체어 안전성 평가 절차도

### III. 연구결과

#### 3.1 휠체어 및 인체 유한요소 모델 구성

휠체어 및 휠체어 탑승자의 안전성 평가를 위한 휠체어 해석 모델은 UMTRI 에서 미국도로교통안전국(NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration)의 지원으로 수행된 프로젝트[16]의 결과물로 공개된 모델[17]을 활용하였다. 그림 2는 WC19에서 정의하고 있는 휠체어 전방충돌 슬레드 시험 해석을 위한 4 점 고정 휠체어 고정구 및 3 점 탑승자 구속장치(WTORS, Wheelchair Tiedown Occupant Restraint System)를 나타내고 있다.

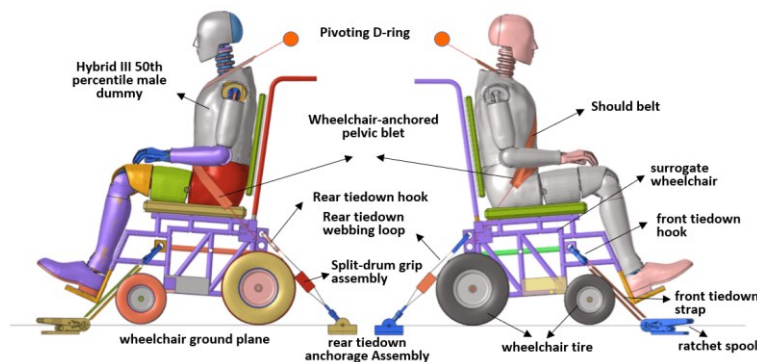


Figure 2. FE model of sled analysis

그림 2. 슬레드 해석 용 유한요소 모델

슬레드 해석을 위하여 비선형 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA 와 휠체어 탑승자의 상해

및 동적거동 파악을 위한 해석용 Dummy 로 LSTC (Livermore Software Technology Corporation)와 NCAC(National Crash Analysis Center)가 공동으로 개발한 Hybrid III 50th Percentile Male 을 사용하였다. 슬레드 해석에 사용된 하중조건으로 그림 3 과 같이 WC19 에서 제안한 30mph/20g 를 사용하였으며, UMTRI 슬레드 시험 장치의 감속도 펄스[18]를 사용하였다.

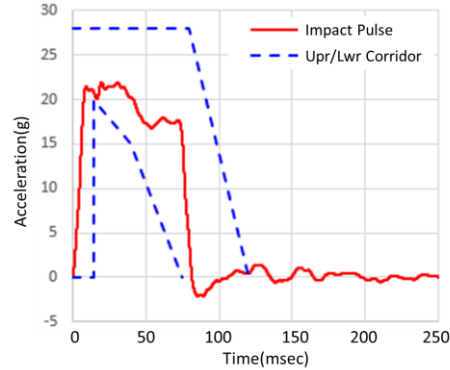


Figure 3. Sled impact pulse(deceleration) and corridor for frontal-impact sled analysis  
그림 3. 슬레드 해석을 위한 하중조건

해석 시 FMVSS 208 에서 규정하고 있는 두부 상해 기준(head injury criteria, HIC)과 ISO7176-19 과 WC19 에서 안전기준으로 제시하는 흉부 가속도 및 휠체어와 더미 전방 이동량을 검토하여 허용기준 충족 여부를 검토하였다. 또한, 휠체어를 구성하고 있는 주요 부재(member)에 대한 축하중, 비틀림 및 굽힘 모멘트를 검토하여 요구사항 충족 기준의 단면값을 도출하게 된다.

### 3.2 정면 슬레드 해석 결과

WC19 시험의 주요 성능 평가 기준은 휠체어와 고정 장치가 충돌 시 파손 없이 충분한 강도를 유지하는 것, 시험용 인체 모형과 휠체어의 전방 이동을 제한하고, 충돌 후 인체 모형이 안전하게 착좌 자세를 유지하는 것을 확인하는 것이다. 그림 4 는 휠체어 및 인체 동적 거동을 시간별로 나타낸 것이며, 표 1 은 휠체어와 인체모형의 안전성 평가를 위해 두부상해 기준, 흉부 가속도(chest acceleration), 휠체어와 인체모형의 전방 이동량을 해당 허용치와 함께 제시하였다.

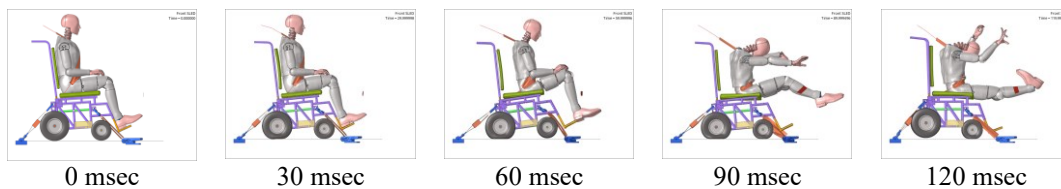


Figure 4. Wheelchair and dummy kinematics during sled test analysis  
그림 4. 휠체어 및 더미의 동적 거동

Table 1. Wheelchair sled analysis results based on injury criteria

표 1. 인체 모형 상해 기준에 따른 휠체어 동적 거동 해석 결과

Requirement	Allowable Limit	Analysis Results	Regulation
Head Injury Criteria (HIC)	1000	396	FMVSS 208
Chest Acceleration(g)	60	52.2	ISO7176-19 & WC19
Head Excursion(mm)	650	499	
Knee Excursion(mm)	375	267	
Wheelchair Excursion(mm)	200	88	
Ratio of knee/wheelchair Excursion	> 1.1	1.875	

그림 4 에서 충돌 이후 인체 모델은 휠체어에서 이탈하지 않음을 알 수 있으며, 표 1 에서 WC19 시험의 주요 성능을 충분히 만족함을 알 수 있다. 두부상해기준과 흉부가속도와 표준 상해평가 값은 자동차 안전기준에 준하는 허용치로 판단할 때, 안전성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

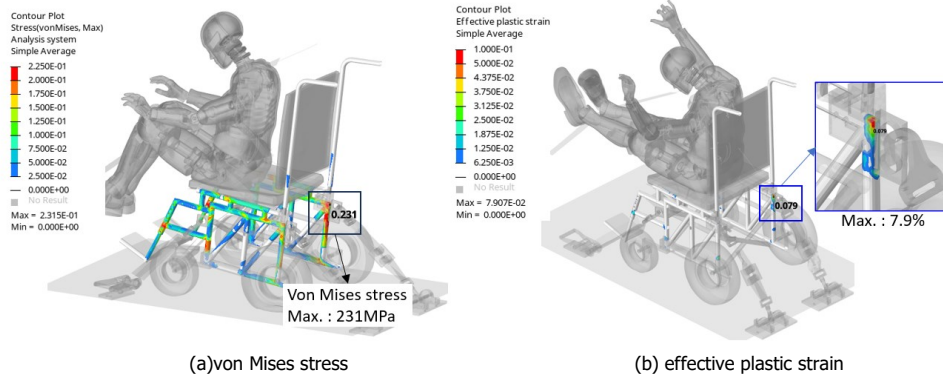


Figure 5. Distributions of stress and plastic strain on Wheelchair

그림 5. 휠체어의 상당응력 및 소성변형률 분포

또한, 휠체어 프레임의 구조 특성은 그림 5 와 같이 휠체어의 상당응력(von Mises stress) 및 소성변형률(effective plastic strain) 분포를 통해 평가할 수 있다. 해석 결과, 휠체어 고정점(wheelchair securement points) 부위에서 가장 높은 값이 나타났으며, 이 값은 부분적으로 항복응력을 초과하지만, 파손은 발생하지 않았으며 소성변형률은 7.9%로 파손이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 이 모델은 휠체어와 고정 장치가 충돌 시 파손 없이 충분한 강도를 유지하고 있음을 볼 수 있다.

### 3.3 부재 단면력 도출 및 민감도 분석

슬래드 해석결과를 바탕으로 그림 6 에서 표시된 부재에 대하여 단면력 분포를 검토하고, 최대 단면력을 나타낸 부재 8 개에 대하여 5% 단위로 6 단계 변화를 주어 민감도 분석을 수행하였다. 부재의 단면력은 충돌 초기 휠체어 후방부에서 높게 나타나며, rebound 가 나타나는 후기 전방부재 및 길이방향 부재에서 높게 나타남을 볼 수 있었다. 또한, 휠체어 고정부의 경우 belt force 를 통해 계산하였으며, 최대 하중은 후방 고정부에서 27.9 kN 이 나타났으며, 전방 고정부의 경우 rebound 에 의하여 10.4 kN 이 나타남을 그림 7 을 통해 확인할 수 있다.

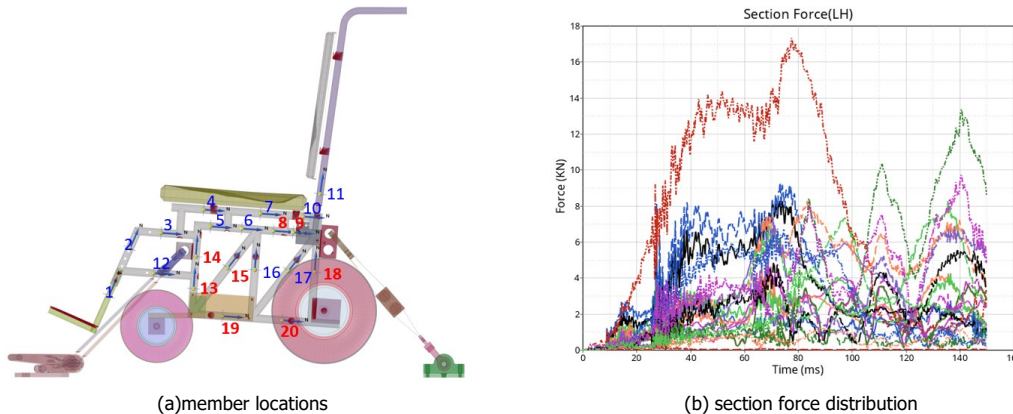


Figure 6. Wheelchair member locations and section force distribution

그림 6. 휠체어 부재 위치 및 단면력 분포

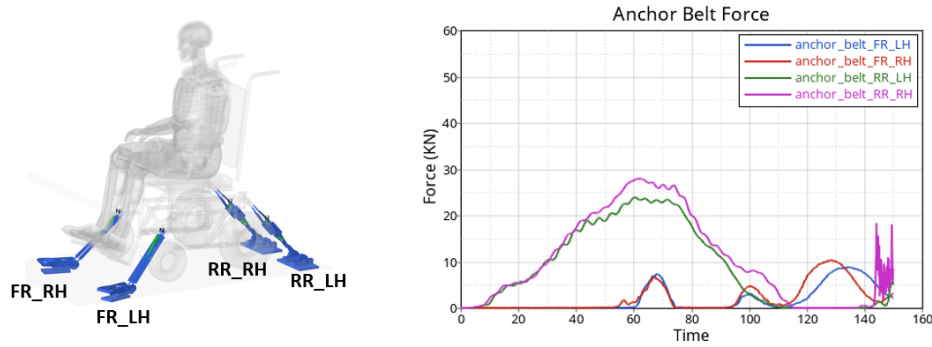


Figure 7. Wheelchair tiedown belt tensile loads

그림 7 휠체어 체결 벨트 인장 하중

주요 부재별 단면력의 분포는 표 2에 나타나 있으며 18번 부재(후방 상하방향 하단부)에서 최대값이 나타났으며, 15번 부재(전방 상하방향 하단부)에서 다음으로 높게 나타났다. 또한, 부재의 단면적 30%변화에 따른 민감도 평가 결과 편차가 19.38%로 가장 크게 나타나는 부재는 9번 부재(후방 상하방향 상단부)에서 나타남을 볼 수 있었으며, 다음으로 15번 부재에서 18.24%가 나타났으며, 18번 부재에서 가장 작은 민감도를 나타냄을 볼 수 있었다. 단면 변화에 따른 민감도 고려시 20.0%이내로 보수적인 설계 기준을 적용시 해당 부재는 최대 인가되는 하중을 고려하여 단면의 선정이 필요한 것으로 분석되었다.

Table 2. Section forces on members for sled analysis

표 2. 슬레드 해석에 대한 주요부재의 단면력

Member number		8	9	13	14	15	18	19	20
Section force (kN)	Min.	8.815	9.290	8.578	6.972	16.365	16.365	12.263	8.897
	Max.	10.376	11.090	10.633	9.482	8.244	17.308	14.219	10.021
Deviation Ratio (%)		17.71	19.38	14.11	10.54	18.24	5.76	15.95	12.63

### 3.4 부재별 안전 설계 제원 도출

슬레드 해석 결과를 기반으로, 부재의 등가 하중을 도출한 후 단면의 형상과 재질 특성을 고려하여 안전 기준을 도출하였다. 도출된 안전성 평가 모델은 설계 시 초기 설정된 단면의 형상, 재료의 특성, 휠체어의 제원 등의 정보가 제공되면 최소 요구 단면 설계 사양을 검토할 수 있다.

그림 8은 안전성 평가 절차를 통해 도출된 제원의 예를 보여주고 있다. 검토는 중량이 다른 수동 휠체어와 전동 휠체어 2종에 대하여 진행되었으며, 단면형상은 원형 중공으로 가정하였다. 또한, 사용된 재료는 일반적으로 사용되는 강으로, 항복 강도는 370 MPa로 설정되었으며, 수동 휠체어와 전동 휠체어의 중량은 각각 20 kg과 230 kg로 설정하였다.

평가 플랫폼에서는 모든 방향의 등가하중을 고려하여 최종의 단면 요구사항만을 제시하게 설계되었으나 하중에 따른 영향을 검토하기 위해 그림 8에서는 축방향과 굽힘방향에 대해 구분하여 도시하였다.

그림 8(a)와 (b)는 수동 휠체어의 외경 및 두께를 보여주며, 그림 8(c)와 (d)는 전동 휠체어의 사양을 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이, 외경이 줄어들면 두께가 증가하는 경향을 볼 수 있으며, (a)와 (c)의 축방향 하중 대비 (b)와 (d)의 굽힘 하중이 단면 대비 더 큰 두께를 필요로 하는 것을 볼 수 있다. 전동 휠체어는 수동 휠체어에 비해 더 큰 단면 값을 요구하는데, 이는 중량에 따른 하중의 변화가 반영되고 있음을 확인할 수 있다.

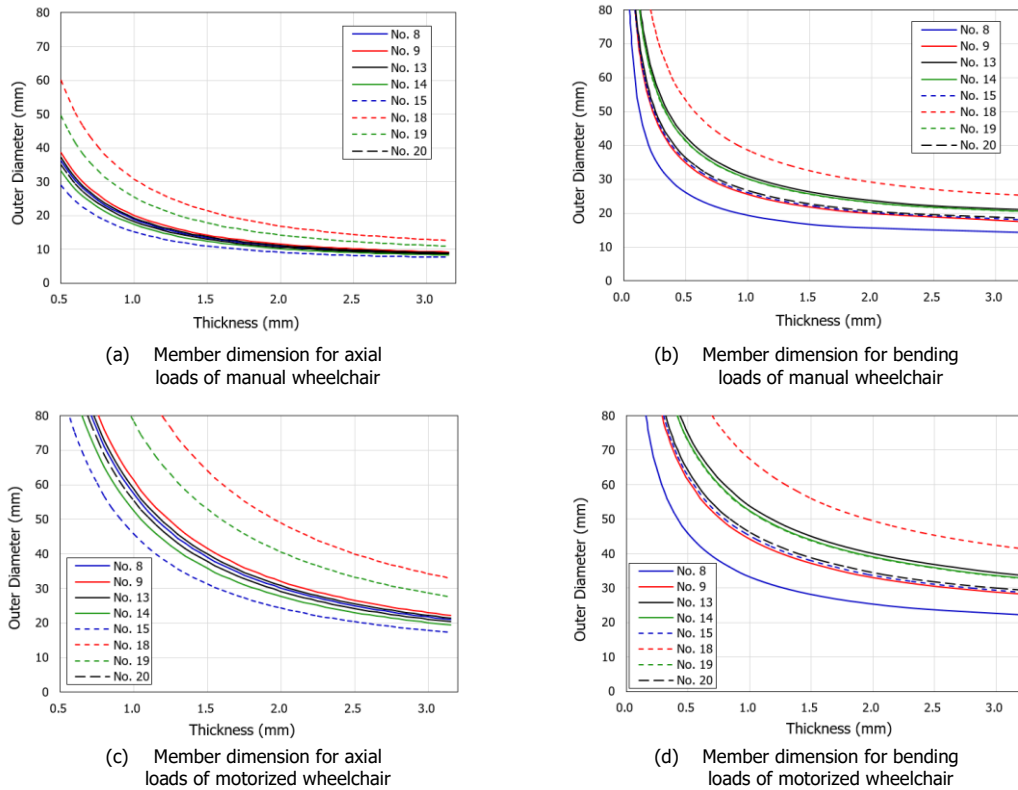


Figure 8. Member dimension requirements based on loading conditions

그림 8 하중 조건에 따른 부재별 요구 제원

#### IV. 결론

휠체어 설계 단계에서 안전성 평가를 수행할 수 있는 플랫폼을 개발을 목적으로, 유한요소해석을 활용하여 부재의 단면 제원을 도출하는 연구를 수행하였다. WC19 규정에 의거한 슬레드 해석을 통해 모델을 검증하고, 주요 부재별 단면력에 대한 민감도 검토를 수행하였다. 도출된 단면력을 등가 하중으로 변환하고, 이를 기준으로 휠체어 설계 시 필요한 최소 안전 기준 치수를 계산할 수 있는 모델을 도출하고, 실제와 유사한 모델을 통해 방법적 정합성을 검토하였다. 이를 통해, 휠체어 초기 설계 단계 시 재질, 단면 형상, 중량 등의 설계 사양이 설정되면 안전기준을 만족하는 제원을 도출하는 절차 및 방법을 제시하였다. 향후 본 연구를 바탕으로 휠체어가 탑승하는 다양한 차량 조건과 이에 따른 법규 및 규정에 따른 안전성 평가 방법 연구에 대한 추가적인 연구를 수행하고자 한다.

#### V. 감사의 글

본 연구는 국토교통부 “자동차전용도로 주행이 가능한 저상 좌석버스 표준모델 개발”사업의 연구비 지원(과제번호# RS-2023-00253588)에 의해 수행되었습니다.

#### VI. 참고문헌

[1] T. J. Songer, S. G. Fitzgerald and K. A. Rotko, "The Injury Risk to Wheelchair Occupants Using Motor Vehicle Transportation," Annual proceedings of Association for the Advancement of

- Automotive Medicine, Vol.48, pp.115-129, 2004
- [2] S. G. Fitzgerald, T. Songer, K. A. Rotko and P. Karg, "Motor Vehicle Transportation Use and Related Adverse Events Among Persons Who Use Wheelchairs," *Assistive Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 180-187, 2007.
  - [3] L. W. Schneider, M. A. Manary, N. R. Orton, J. Hu, K. D. Klinich, C. A. Flannagan and J. L. Moore, "Wheelchair Occupant Studies," UMTRI, UMTRI-2016-8, Jul. 2016.
  - [4] L. W. Schneider, D. A. Hobson and G. E. Bertocci, "A Rationale and Guideline to Recommended Practice SAE J2249-Wheelchair Tiedowns and Occupant Restraint Systems for Use in Motor Vehicles," Technical Report No. 8, RERC on Wheeled Mobility, University of Pittsburgh, Jun. 1999.
  - [5] M. A. Manary, N. L. Ritchie and L. W. Schneider, "WC19: A wheelchair transportation safety standard-Experience to date and future directions," *Medical Engineering & Physics*, Vol.32(3), pp. 263-271, Apr. 2010.
  - [6] American National Standards Institute (ANSI) Rehabilitation Engineering Society of North America(RESNA), "WC-19 Wheelchairs Used as Seats in Motor Vehicles," 1999
  - [7] Society for Automobile Engineers International, SAE J2249, "Wheelchair Tiedown and Occupant Restraint Systems for Use in Motor Vehicles," 1999
  - [8] International Organization for Standardization., ISO 7176-19:2019, "Wheelchairs - Part 19: Wheeled mobility devices for use as seats in motor vehicles," 2019
  - [9] S. M. Kim, S. J. Kim, T. G. Kang, B. H. Jun, K. H. Kim and M. S. Moon, "A Safety Assessment by Risk Analysis Method on Wheelchair Occupant in Frontal & Side Impact of Wheelchair Loaded Vehicle," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.21, No.6, pp. 179-187, 2004.
  - [10] S. M. Kim, M. P. Lee and S. Y. Park, "Analysis of Criteria Regarding Frontal and Side Impacts of Wheelchair Occupant in Vehicle by Computer Simulation Method," *Journal of biomedical engineering research*, Vol.27, N0.6, pp.365-369, 2006.
  - [11] J. S. Han and J. B. Choi, "A Study on the Impact Safety Test for Wheelchairs," *International Journal of Safety*, Vol.7, No.1, pp.30-34, 2008.
  - [12] T. Y. Kim, S. J. Shim, S. W. Kim and B. D. Kang, "A Study on Wheelchair Occupant Injury in Wheelchair Accessible Vehicle by the Sled Test," *Transactions of KSAE*, Vol. 25, No. 2, pp.140-148, 2017.
  - [13] K. Kim, J. Shin, B. Yong and B. Kang, "Occupant Safety Analysis for Wheelchair Bus Development," *Journal of Auto-vehicle Safety Association*, Vol.12, No.1, pp. 39-45, 2020.
  - [14] H. S. Oh, G. S. Kim and S. S. Cheon, "A Study on the Analysis of Human Injury According to the Fixed Position of the Tie-down Type Wheelchair," *Korean Society of Mechanical Technology*, Vol.19, No.4, pp.478-483, 2017.
  - [15] UMTRI, "Website on Wheelchair Transportation Safety: <https://wc-transportation-safety.umtri.umich.edu/>," Updated in Mar. 2022.
  - [16] K. D. Klinich, M. A. Manary, A. Miriam, N. R. Orton, K. J. Boyle, and J. Hu, "Development of Side Impact Test Procedures for Improved Wheelchair Transportation Safety," UMTRI, May 2023. Available: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/177516>
  - [17] K. D. Klinich, J. Hu, K. J. Boyle, M. A. Manary and N. R. Orton, "Finite Element Models of Wheelchairs and Associated Components to Support Wheelchair Transportation Research [Data set]," University of Michigan-Deep Blue Data, Aug. 2023. Available: <https://doi.org/10.7302/xqqe-ef62>
  - [18] UMTRI, "Testing Wheelchairs, Wheelchair Seating Systems, and Wheelchair Tiedown and Occupant Restraint Systems (WTORS) to Industry Wheelchair Transportation Safety (WTS) Standards", *Wheelchair Transportation Safety Testing Brochure*, 2021. Available: [UMTRI Impact Test Services – Wheelchair Transportation Safety \(umich.edu\)](https://umtri.umich.edu/impact-test-services-wheelchair-transportation-safety)



## 저자소개



**이용우 (Yongwoo Lee)**

2003 년 8 월 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 학사  
2005 년 8 월 연세대학교 기계공학과 석사  
2017 년 9 월~현재 신한대학교 미래자동차공학과 부교수

관심분야: AI, 스마트 모니터링 시스템, 차량 사물통신(V2X)



**이진희 (Jinhee Lee)**

1999 년 8 월~2000 년 2 월 삼성 SDI 선임연구원  
2006 년 2 월~2023 년 3 월 한국이에스아이(주) 본부장  
2020 년 9 월~현재 신한대학교 산학협력단 연구교수

관심분야: AI, 디지털트윈, 충돌안전, 의료기기 유한요소해석