

## 동적 특성을 고려한 수소 튜브 트레일러의 구조 안전성 평가

김유빈<sup>1</sup> · 김민기<sup>2,\*</sup> · 고대철<sup>3,#</sup>

# Evaluation of Structural Safety for Hydrogen Tube Trailer Considering Dynamic Property

Y. B. Kim, M. G. Kim, and D. C. Ko

(Received April 11, 2024 / Revised May 20, 2024 / Accepted May 21, 2024)

### Abstract

Recently, hydrogen energy has been widely used because of strict regulations on greenhouse gas emissions. For using the hydrogen energy, it is required to supply hydrogen through a tube trailer. However hydrogen tube trailer can have excessive load problems during transportation due to reasons such as road shape and driving method, which may lead a risk of hydrogen leakage. So it is necessary to secure a high level of safety. The purpose of this study is to evaluate structural safety for the conservative design of hydrogen tube trailer. First, finite element(FE) modeling of the designed hydrogen tube trailer was performed. After that, safety evaluation method was established through static structural simulation based on the standard GC207 conditions. In addition, effectiveness of the designed model was confirmed through the results of the structural safety evaluation. Finally, driving simulation was used to derive acceleration graph according to time, which was considered as a dynamic property for the evaluation of conservative tube trailer safety evaluation. And dynamic structural simulation was conducted as a condition for actual transportation of tube trailer by applying dynamic properties. As a results, conservative safety was evaluated through dynamic structural simulation and the safety of hydrogen tube trailer was confirmed through satisfaction of the safety rate.

**Keywords** : Hydrogen tube trailer, Structural safety evaluation, Structural simulation, Dynamic property

## 1. 서론

최근 온실가스 배출 감소는 전세계적으로 중요한 문제이며 온실가스 배출량에 대한 규제가 단계적으로 강화되고 있다[1]. 현재 온실가스 문제를 해결하기 위해 친환경 에너지를 이용한 산업들이 확대되고 있으며[2], 그 중 수소 에너지는 에너지 밀도가 높으며 환경문제를 해결할 수 있는 에너지원으로 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

수소 에너지를 사용하기 위해서는 수소의 공급이 필수적으로 요구되며, 대부분 외부에서 생산된 수소를 공급받는 오프사이트(off-site) 방식을 통해 수소 충전소에 공급이 가능하다. 해당 방식은 수소 저장 용기의 효율적인 저장 및 운반이 필요하며, 일반적으로 용기를 고정하는 구조물인 Skid를 적용한 Tube trailer를 사용한 운송 방법을 채택하고 있다.

한편 Tube trailer를 통한 수소 공급 방식은 운송과정에서 도로 형태 및 운전 방식 등으로 인해 Trailer에 과도한 하중부하와 같은 문제가 작용할 수 있다. 이는 수소의 누출이 발생할 수 있으며, 이 때 누출된 수소의 연소반응으로 인한 화재 및 폭발과 같은 위험한 사고가 야기될 수 있다. 또한 수소 저장용기 제작을 위해 수행되는 Deep drawing과 Ironing공정은

1. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 석사과정

2. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 박사과정

3. 부산대학교 나노메카트로닉스공학과, 교수

\* This author equally contributed to this work as first author

#Corresponding Author: Department of Nanomechatronics Engineering,

Pusan National University, E-mail: dcko@pusan.ac.kr,

ORCID: 0000-0002-4064-739X

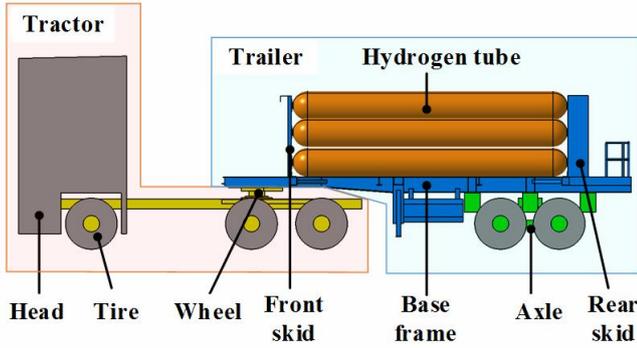


Fig. 1 Shape of full model for hydrogen tube car

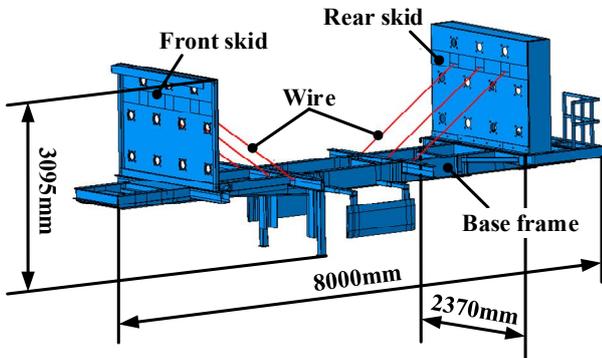


Fig. 2 Simplified geometry of hydrogen tube trailer

벽 두께가 얇아지며, 용기 입구인 돔(dome)부 성형을 위한 Spinning 공정은 좌굴(buckling) 현상으로 정밀한 치수정밀도 확보가 어렵기 때문에 Trailer 운송 과정에서 하중이나 진동에 영향을 크게 받게 된다. 이는 곧 수소 누출의 발생 가능성을 높이는 문제로 귀결될 수 있다.

상기 문제를 방지하기 위해 높은 수준의 안전 수준 확립이 필요하며, 이를 위해 Trailer 구조물의 안전성에 관한 다양한 연구들이 수행되고 있다. Park 등[3]은 Arm-roll system으로 구성된 tube skid의 작동 조건에 따른 정적 구조해석을 수행하여 안전을 평가 및 보강 설계를 진행하였다. Kim 등[4]은 Trailer 위상최적설계 및 구조강도 해석을 통해 경량화 및 구조 안전성을 평가하였다. Lee[5] 또한 경량화 및 진동 억제를 통한 하중부하를 방지하기 위해 복합재를 적용한 고정 프레임 설계를 진행하였으며, 최대 변형량과 최대 주응력 평가를 통해 설계 방향성을 제시하였다. 하지만 대부분의 연구들은 정적 상태에서의 안전을 평가를 통해 설계가 진행되었다. 이는 수소와 같은 고압가스의 위험성을 고려하였을 때, 더욱 보수적인 설계가 요구되므로 실제 Tube

trailer 주행시의 동적 특성을 반영한 안전성 평가에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 수소 Tube trailer의 보수적인 설계를 위한 구조 안전성 평가를 수행하고, 그 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 설계 도면을 기반으로 수소 Tube trailer의 모델링을 수행하였으며, 가스안전공사에서 제시하는 기준 규격 GC207고압가스 운반차량의 용기 고정프레임 조건에 의거한 안전성 평가 방법을 확립하였다. 이 때 Tube trailer의 구조적 안전성은 Von-Mises 파손이론을 이용하여 해석 결과를 평가하였다. 또한 구조 안전성 평가의 결과 분석을 통해 설계 모델의 유효성을 확인하였다. 최종적으로 동적 특성을 고려한 보수적인 Tube trailer 설계를 위해 주행 시뮬레이션을 통한 동적 특성을 도출하였으며, 이를 반영하여 Tube trailer의 실제 운반 시의 구조 안전성을 평가하였다.

## 2. 구조해석을 위한 유한요소 모델

### 2.1 수소 Tube trailer 모델

수소 Tube trailer의 구조 안전성을 평가하기 위해 설계된 도면을 기준으로 3D CAD 모델링을 수행하였다. 이후 안전성 평가를 위해 ABAQUS S/W를 사용하여 구조해석을 진행하였다. 전체 차량 형상을 Fig. 1에 나타내었으며, 크게 Tractor와 Trailer로 구성되어 있다. 효율적인 유한요소 해석을 수행하기 위해 구조적 거동에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 모델 단순화를 진행하였다. 모델 단순화를 위해 타이어(tire), 트레일러 축(trailer axle), 트레일러 휠(trailer wheel) 부분을 제거하였다. 최종적으로 유한요소 해석에 사용되는 수소 Tube trailer의 모델은 Fig. 2과 같이 전체 길이 8000 mm, 전고 3095 mm, 최대 폭 2370 mm로 이루어져 있고 Base frame, Front skid, Rear skid, Wire 부품들로 구성하였다. 각각의 구성 부품별 재질에 따른 재료의 기계적 물성을 Table 1에 나타내었다.

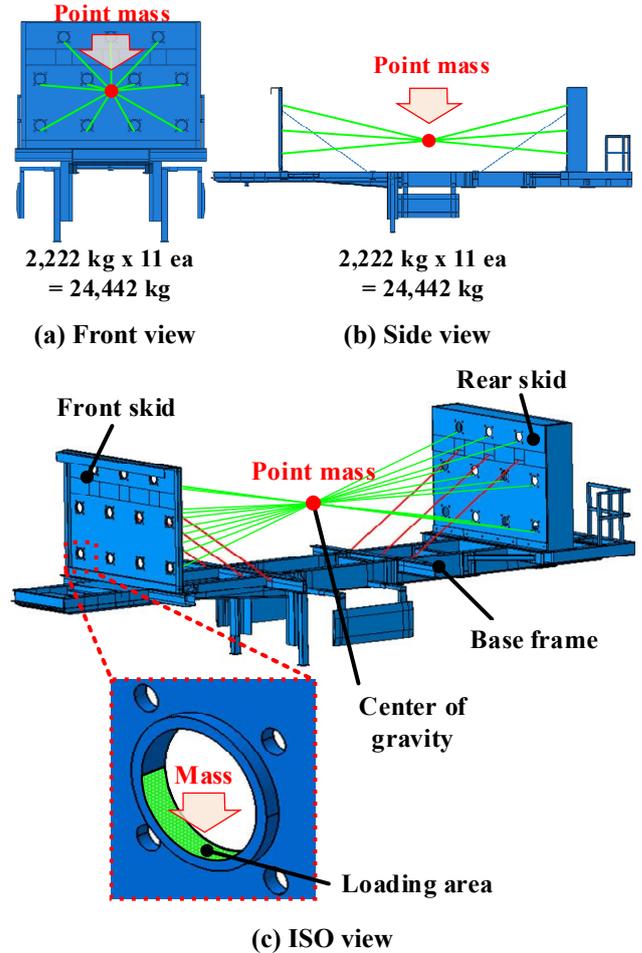
### 2.2 유한요소 모델링 및 조건

구조해석을 위한 Tube trailer의 유한요소 모델은 빔 요소(1D beam element)로 구성된 Wire를 제외한 모든 구성 부품들을 솔리드 요소(3D solid element)로 모델링하였으며 321,991개의 절점(node)과 191,603개의 요소(element) 수준으로 요소망을 구성하였다. 또

**Table 1** Material properties of hydrogen tube trailer

Part	Base frame	Front skid	Rear skid	Wire
Material	SM355A	SM355A	SM355A	S45C
Young's modulus (MPa)	202	202	202	205
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3	0.29
Yield strength (MPa)	449	449	449	360
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,850	7,850	7,850	7,850

한 서로 차원이 다른 빔 요소와 솔리드 요소의 연결을 위해 kinematic coupling[6]을 적용하였다. 한편, Tube trailer는 모델 단순화를 위해 생략한 트레일러 전방부의 휠과 후방부의 축을 통해 발생하는 움직임 고려하기 위해 Fig. 1에 나타난 부품별 결속되는 Base frame 위치에 실제 운용조건에 따른 자유도 구속을 각각 수행하였다. 전방부 휠의 경우 Z-dir. rotation을 제외한 나머지 자유도를 구속하였으며, 후방부 축의 경우 Z-dir. rotation, Y-dir. translation을 제외하고 구속조건을 적용하였다[7-9]. 추가적으로 접촉(contact) 최소화를 통한 해석 수렴성 향상 및 해석 시간 단축을 위해 수소저장용기인 11개의 Tube들을 생략하고 kinematic coupling을 통한 Point mass[10] 방법으로 대체하여 전체 Tube 질량을 고려하였다. 이를 위해 Fig. 3과 같이 튜브들의 무게 중심에 Point mass를 이용하여 전체 11개의 수소 Tube 질량인 24,442 kg를 부여하였다. 이를 통해 Fig. 3(c)에 나타난 양쪽의 Skid와 튜브들이 접촉되는 수직 하부 면적인 Loading area마다 전체 tube 질량이 동등하게 나뉘어 작용하도록 수행하였다. 최종적으로 Tube trailer의 안전성 평가 및 설계 모델의 유효성을 확인하기 위해 GC207 규격의 하중조건을 적용하여 구조해석을 수행하였다. 하중조건인 경우 GC207 규격에 따라 전 중량을 고려해야 하므로 전체 모델에 대하여 중력가속도(G) 적용을 통해 진행하였다. 이때 하중조건은 차량 진행 시의 전면 방향으로 전 중량의 2배(2G), 측면 방향으로 전 중량의 1배(1G), 수직 상부 방향으로 전 중량의 1배(1G), 수직 하부 방향으로 전 중량의 2배(2G)의 4가지 Case로 구성되며, Table 2에 세부 조건을 요약하여 나타내었다. 이러한 4가지 하중조건을 각각 적용한 Case 별 구조해



**Fig. 3** Condition of point mass for minimizing contacts

**Table 2** Load conditions according to GC 207

Case	Condition	Value (mm/s <sup>2</sup> )
1	Twice force of total weight in forward direction	19,612
2	Force of total weight in lateral direction	9,806
3	Force of total weight in upward direction	9,806
4	Twice force of total weight in downward direction	19,612

석을 통해 Tube trailer의 안전성을 평가하였다.

### 3. 정적 구조해석을 통한 안전성 평가

상기 구축한 유한요소 모델 및 Table 2의 해석조건을 기반으로 Tube trailer의 안전성을 평가하기 위해

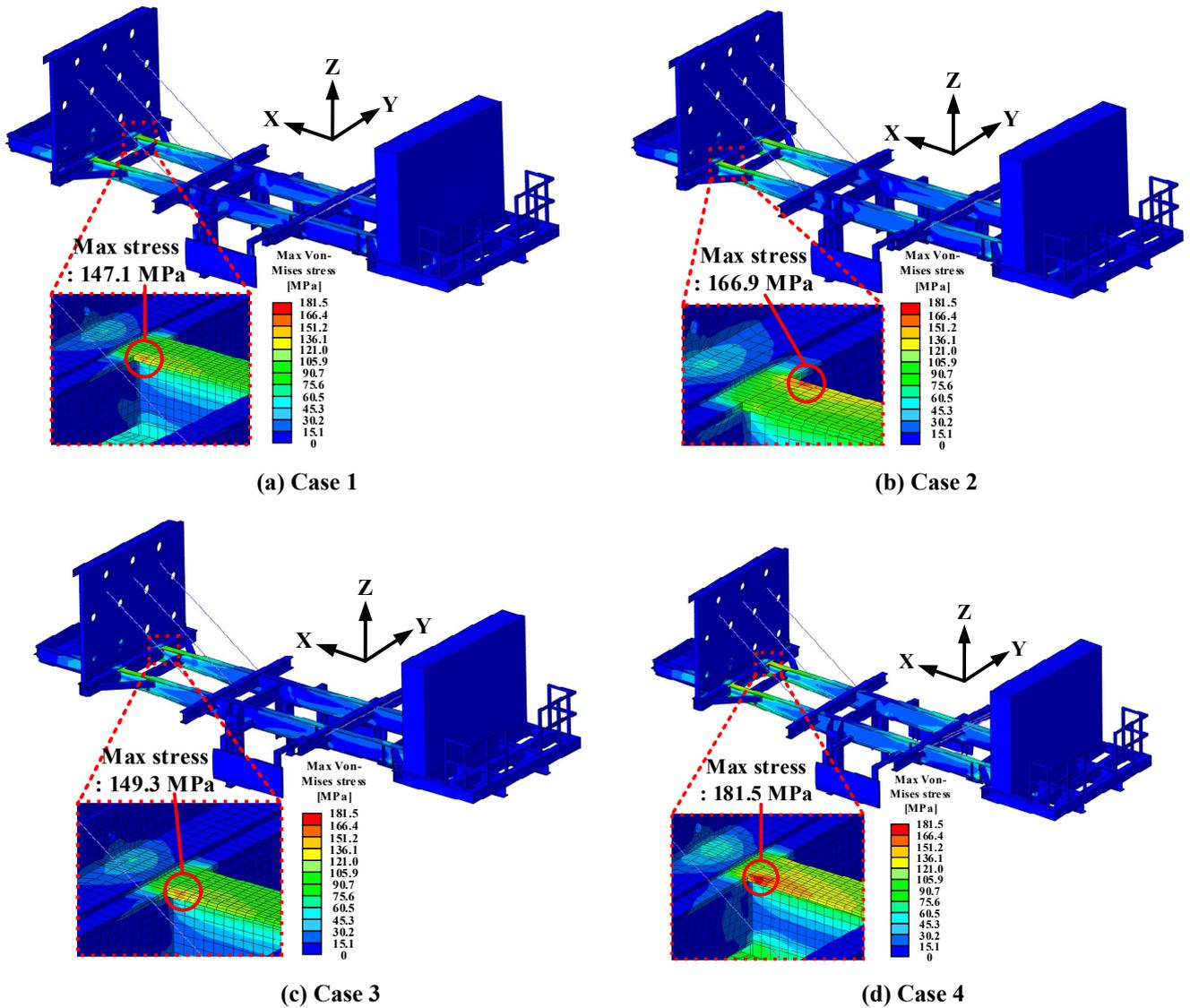


Fig. 4 Results of static structural simulation for tube trailer

구조해석을 수행하였다. GC207에서 제시하는 안전율 1.5 이상의 기준 만족을 확인하기 위해 각각의 하중 조건에 따라 정적 구조해석을 진행하였으며, 예측된 결과를 분석하였다.

수소 Tube trailer의 하중조건에 따른 정적 구조해석 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 안전성 평가를 위해 최대 응력의 도출 지점과 그 값을 표기하였다. 해석결과, 대부분 Base frame의 I-beam 형상의 전방 쪽 위치에서 대칭적으로 최대 응력이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 4(d)와 같이 수직 하부 방향의 하중이 가해지는 Case 4 조건에서 181.5 MPa의 가장 높은 최대 응력이 발생하는 것을 확인하였다.

이는 Fig. 4(b), (c)와 비교하였을 때, 하중조건 크기의 영향이 존재하는 것을 알 수 있었다. 반면, Fig. 4(a)와 비교 및 최대 응력 발생 위치의 유사함을 통해 구속조건 영향이 지배적으로 작용한다고 판단하였다. 따라서 하중조건과 구속조건이 복합적으로 작용하기 때문에, 단순 계산이 아닌 정밀한 안전성 평가가 요구된다. 특히 정확한 구속조건이 필수적이며, 이는 상기의 진행 방식을 통해 적용할 수 있다. 이러한 해석적 결과를 바탕으로 수소 Tube trailer의 안전성 평가 진행방법을 확립하였다.

이와 더불어 설계 모델의 유효성을 확인하기 위해 하중조건 별 안전율 계산을 수행하였으며, 안전

Table 3 Results of static structural simulation

Case	Max Von-mises stress (MPa)	Safety factor
1	147.1	3.05
2	166.9	2.69
3	149.3	3.00
4	181.5	2.47

을  $S$ 는 식 (1)을 통해 도출하였다.

$$S = \sigma_y / \sigma_{max} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_y$ 는 항복강도(Yield strength),  $\sigma_{max}$ 는 최대 응력을 의미한다. 이 때 Tube trailer에 발생하는 최대 응력이 모두 Base frame에서 발생하므로 Table 1의 Base frame 항복강도를 사용하였다. 안전율 계산 결과, 최소 2.47에서 최대 3.05로 도출되었다. Table 3에 모든 하중조건에서의 안전율 결과를 요약하였으며, GC207에서 제시하는 기준 안전율 1.5 이상을 모두 만족하므로 설계 모델의 유효성을 확인하였다.

#### 4. 동적 특성을 고려한 보수적 안전성 평가

앞서 정적 구조해석을 통한 안전성 평가 결과, 1.5 이상의 높은 안전율을 가지는 것을 확인하였다. 하지만 필요 이상으로 높은 안전율은 과도한 설계로 취급될 수 있는 반면 보수적 설계가 요구되는 구조물일 경우 높은 안전율이 필수적이다. 본 연구의 수소 Tube trailer 또한 누출 시의 위험성 때문에 실제 주행을 고려한 더욱 보수적인 설계가 필요하다. 이에 따라 실제 Tube trailer 운용 시의 동적 특성을 고려한 안전성 평가를 진행하였다.

##### 4.1 주행해석을 통한 동적 특성 확립

동적 구조해석을 통한 안전성 평가를 진행하기 위해 동적 특성 구축이 요구되며, 이는 실제 Tube trailer 운용 시의 시간에 따른 3축 가속도 그래프 도출이 필요하다. 따라서 동적 특성, 즉 시간에 따른 가속도 그래프를 도출하기 위해 주행해석을 수행하였다. 주행해석은 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS S/W를 사용하였으며, 해석 모델링을 Fig. 5 과 같이 구성하였다. 정적 구조해석 진행 시 생략한 부품들을 포함하였으며, Tractor 부분까지 고려한

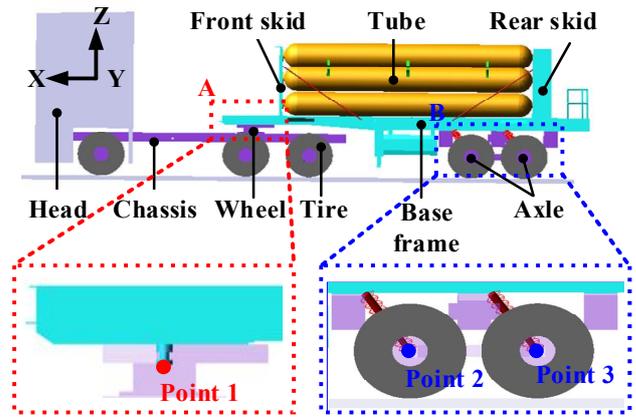


Fig. 5 Full modeling for driving simulation

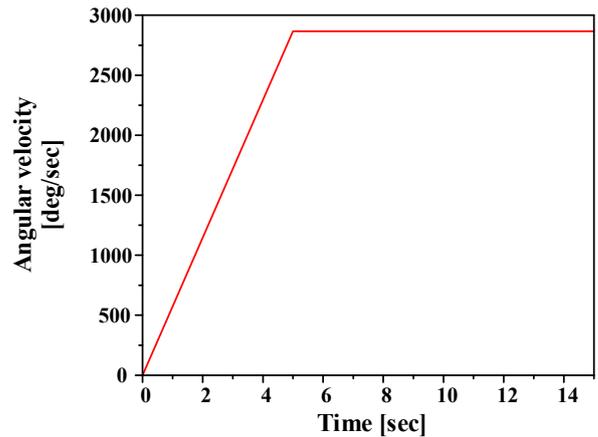


Fig. 6 Velocity condition of driving simulation

전체 차량 모델링을 수행하였다. 각 부품에 적용된 물성은 Table 1과 동일하며, 추가된 부품들의 물성은 참고문헌을 이용하여 적용하였다[11, 12]. 주행해석은 국가법령정보센터 자동차안전기준에 관한 규칙에 명시되어 있는 최대 90 km/h[13]로 차량 속도를 설정하였고, 15 sec동안 주행하는 것으로 선정하였다. 이 때 0 ~ 5 sec 구간은 90 km/h까지 도달하는 가속 구간으로 등가속도 운동으로 적용하였으며, 5 ~ 15 sec 구간은 90 km/h의 속도로 등속도 운동으로 진행하였다. 이를 Fig. 6에 나타내었으며, 실제 타이어의 회전을 통해 차량이 주행되므로 타이어 중심을 기준으로 시간에 따른 각속도 그래프로 적용하였다. 이후 구조해석과 동일하게 GC207 규격에 따른 4가지 하중조건을 각각 적용하여 주행해석을 수행하였다.

각 하중조건에 따라 총 15 sec 동안의 주행해석[14, 15]을 수행한 결과를 통해, 시간에 따른 3축의 가속

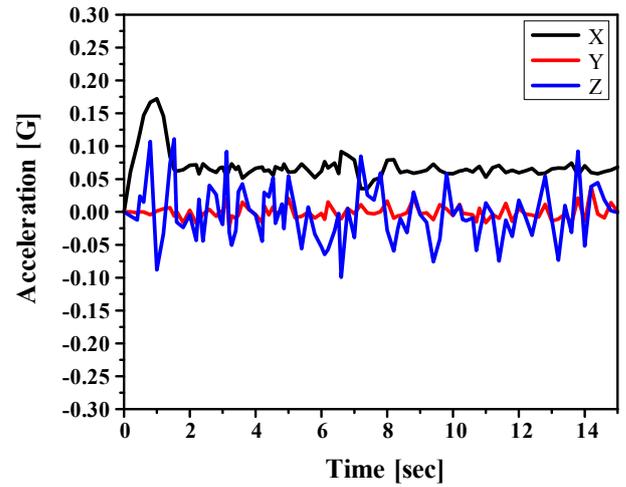
**Table 4 Rotary inertia for dynamic structural simulation**

Rotary inertia	Value	Unit
Ixx	22,100	kg×m <sup>2</sup>
Iyy	2,600	kg×m <sup>2</sup>
Izz	21,800	kg×m <sup>2</sup>

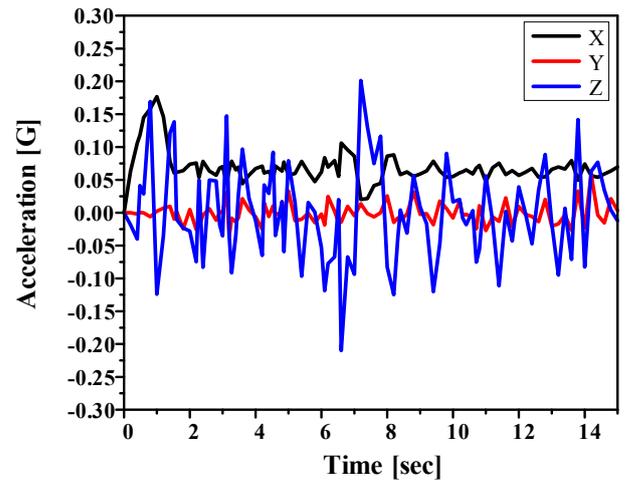
도 그래프를 도출하였다. Fig. 5의 휠 부분의 A와 축 부분의 B를 통해 Trailer 움직임이 수반되므로 A, B 부분의 각각의 Point에서 가속도 그래프를 추출하였으며, 이는 곧 구조해석 모델의 구속조건을 적용한 위치와 일치한다. Fig. 7에 정적 상태일 때의 안전율이 가장 낮은 Case 4 조건에 대해, 해당 위치 별 추출한 시간에 따른 3축 가속도 그래프를 나타내었다. 가속도 그래프는 동적해석에 경계조건으로 적용을 위한 크기 형태로 중력가속도(G) 값을 기준으로 표현하였다. Fig. 7을 통해 시간에 따른 가속도 그래프 확인 결과, 차량 진행방향인 X축 그래프의 초기 구간이 모든 지점에서 급격하게 가속되는 것을 확인하였다. 이는 상기 적용한 속도 그래프의 초반 5 sec 까지 가속되는 구간의 영향으로 판단하였다. 또한 Fig. 7의 (b)와 (c)는 대체적으로 유사한 경향을 나타내었다. 반면 Fig. 7(a)는 (b), (c)의 가속도 그래프와 비교하였을 때, 전체적으로 낮은 가속도 수치가 도출되는 것을 확인하였다. Point 1의 경우, 차량 Tractor와 trailer 간의 Suspension을 통해 연결되는 부위이므로 감쇠영향을 받기 때문에 낮은 결과 값이 도출된다고 판단하였다.

**4.2 동적 특성을 고려한 구조해석**

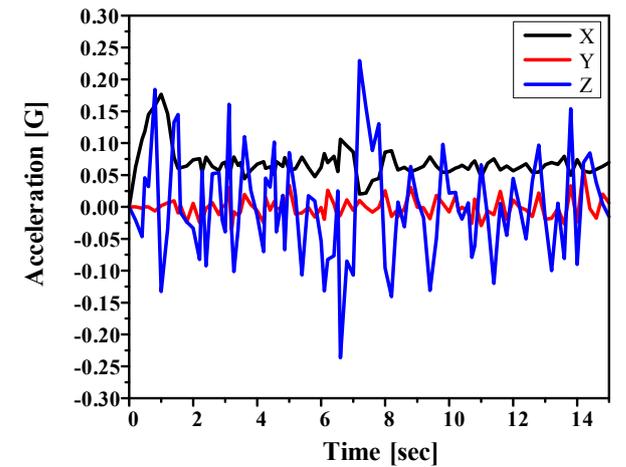
수소 Tube trailer의 보수적 설계를 위해, 동적 특성을 고려한 안전성 평가를 진행하였다. 동적 상태의 안전성 평가를 위해 정적 구조해석의 유한요소 모델링 구성 및 해석 조건 모두 동일하게 설정하였다. 추가적으로 동적 구조해석의 경우 관성(inertia) 적용이 필요하며, 이를 고려하기 위해 Table 4와 같이 회전 관성 모멘트를 사용하였다. 또한 주행해석을 토대로 구축한 시간에 따른 가속도 그래프를 적용하여 동적 특성을 반영하였다. 정확한 동적 특성 반영을 위해 주행해석에서 추출한 위치, 즉 정적 구조해석에서 구속조건을 적용한 전방부 휠 및 후방부 축과 연결되는 Base frame의 해당 부분에 각각 시간에



(a) Point 1



(b) Point 2



(c) Point 3

**Fig. 7 Three-axis acceleration graph according to time of case 4 for dynamic simulation**

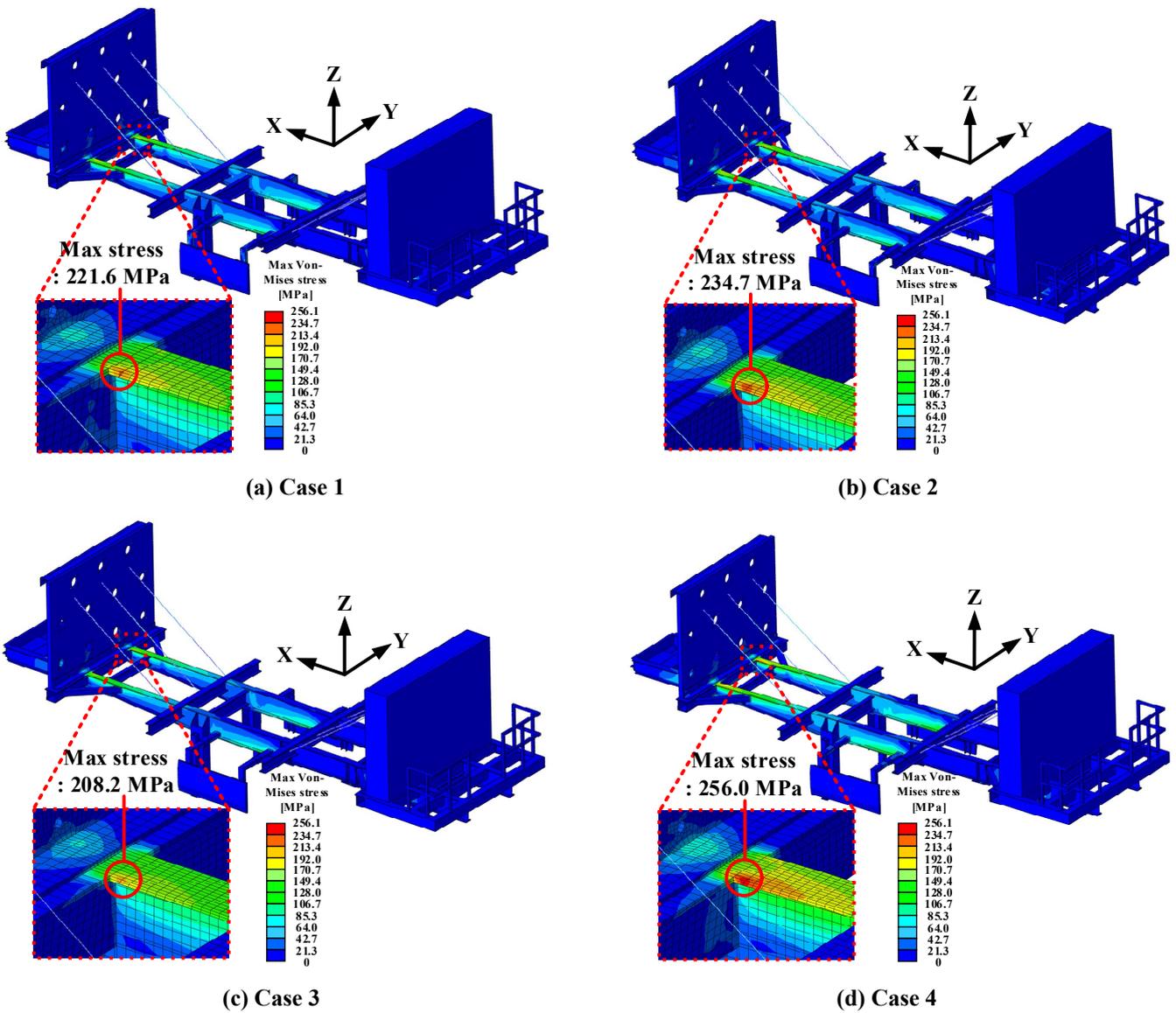


Fig. 8 Results of dynamic structural simulation for tube trailer

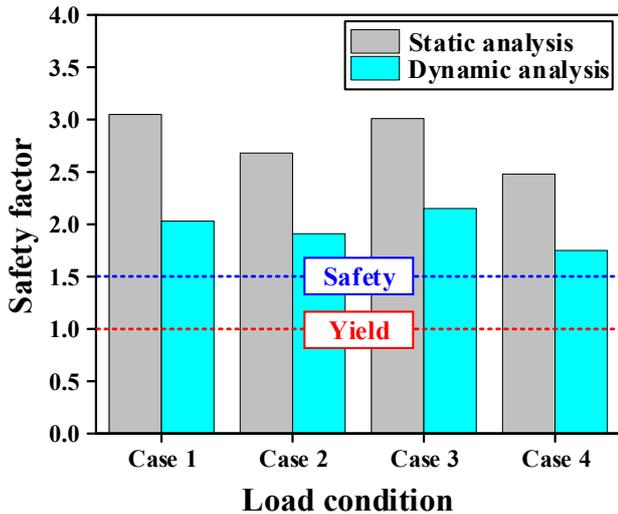
따른 가속도를 적용하였다.

확립된 안전성 평가 방법을 기반으로 수소 Tube Trailer의 동적 특성을 고려한 구조해석 진행결과를 Fig. 8에 Case별 나타내었으며, 최대 응력의 도출 위치와 그 크기를 파악하였다. 각 Case마다 정적 구조 해석 결과와 유사하게 Base frame의 전방 I-beam 위치에서 대칭적으로 최대 응력이 발생하였다. 최대 응력은 정적 구조해석과 마찬가지로 Case 4에서 가장 높았지만 그 수치가 256 MPa로 앞선 정적 구조 해석 결과보다 증가함을 확인하였다. 본 결과들을 토대로 안전율 계산을 수행하였으며, Table 5에 결과

를 요약하였다. 최소 안전율은 최대 응력이 발생한 Case 4 조건에서 1.75로 도출되었다. 이는 보수적인 안전성 평가에서도 안전율 1.5 이상을 만족하므로 설계된 모델이 안전하다고 판단하였다. 한편 정적 상태에서의 안전성 평가 결과 비교를 Fig. 9에 나타내었으며, 전체적인 동적 상태의 안전율이 낮게 도출되는 것을 확인하였다. 일반적으로 설계 단계에서 대부분 정적 상태만을 고려하여 안전성 평가를 진행한다. 하지만 본 연구를 바탕으로 실제 주행특성을 고려해야 하거나 보수적인 설계가 요구될 때, 본 연구에서 제시한 동적 특성을 반영한 안전성 평가

**Table 5 Results of dynamic structural simulation**

Case	Max Von-mises stress (MPa)	Safety factor
1	221.6	2.02
2	234.7	1.91
3	208.2	2.15
4	256.0	1.75

**Fig. 9 Comparison of safety factor between static and dynamic simulation results**

방법이 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 수소 Tube trailer의 보수적인 설계를 위해 동적 특성을 반영한 안전성 평가에 관한 연구를 수행하였다. 안전성 평가를 위해 구조해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 효율적인 해석을 위해 모델 단순화를 진행하였으며, 생략된 부품들을 통해 발생하는 움직임을 고려하기 위해 실제 운용조건과 동일하게 구속조건을 적용하였다. 또한 해석 수렴성 향상 및 시간 단축을 위해 Point mass 기법을 사용하여 수소 Tube들을 대체하였다.

(2) GC207 규격에서 제시하는 4가지 하중조건에 따른 정적 구조해석을 수행하였다. 해석결과, Case 4 조건에서 최대응력 181.5 MPa로 가장 높게 도출되었으며, 또한 각 결과 별 비교를 통해 정확한 구속조건 적용이 필수적임을 확인하였고, 이를 바탕으로

안전성 평가 방법을 확립하였다. 안전율은 요구조건 1.5 이상인 2.48로 도출되어 설계 모델의 유효성을 확인하였다.

(3) 보수적 안전성 평가를 위해 실제 주행 시의 동적 특성을 고려한 구조해석을 수행하였다. 동적 특성은 시간에 따른 3축 가속도 그래프로 반영하였으며, 이는 주행해석을 통해 구축하였다. 또한 Trailer 움직임이 수반되는 위치, 즉 구속조건과 동일한 위치에 적용하였다. 이를 기반으로 동적 구조해석 수행결과, 정적해석과 동일하게 Case 4 조건에서 최대 응력이 도출되었고 그 값이 더 큰 것을 확인하였다. 해석결과를 토대로 안전성 평가 결과, 최소 안전율이 1.75이므로 모든 조건에서 안전성이 만족됨을 확인하였다.

(4) 정적 및 동적 안전성 평가 결과를 비교하였을 때, 동적 상태에서 전체적으로 낮은 안전율이 도출되었다. 이를 통해 더욱 보수적인 안전성 확인이 필요할 경우, 제시된 평가 방법을 통한 설계를 진행할 수 있을 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] K. H. Yim, 2023, A Comparative study on low-carbon vehicle sales and policy responses in Korea and Japan, *J. Digital Convergence*, Vol. 21, No. 1, pp. 9-13. <https://doi.org/10.14400/JDC.2023.21.1.009>
- [2] J. G. Oh, 2018, Comparative analysis of the 2030 GHC reduction target for eleven major countries and its implications, *J. Climate Change Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 357-368. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.4.357>
- [3] E. J. Park, C. H. Nam, S. J. Choi, I. S. Kim, J. H. Hwang, 2019, Structural analysis of skid for hydrogen transport with Arm-roll system, *Korean Soc. Automot. Eng.*, pp. 947-952.
- [4] J. S. Kim, H. S. Roh, Y. J. Min, S. H. Hur, S. J. Shin, I. G. Jang, 2017, Lightweight design of a bulk trailer using topology optimization, *Trans. Kor. Soc. Automot. Eng.*, Vol. 25, No. 5, pp. 548-554.
- [5] J. C. Lee, 2022, Design of fixing frame with foam cored CFRP sandwich composite for hydrogen storage vessels, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 39, No. 1, pp. 45-50.

- [6] Dassault system simulia corporation, Abaqus analysis user's manual version 6.14.
- [7] R. A. Rahman, M. N. Tamin, O. Kurdi, 2008, Stress analysis of heavy duty truck chassis as a preliminary data for its fatigue life prediction using FEM, *J. Mekanikal*, No. 26, pp. 76-85.
- [8] H. Zhu, J. Yang, Y. Zhang, 2017, Nonlinear dynamic model of air spring with a damper for vehicle ride comfort, *Nonlinear Dyn.*, Vol. 89, pp. 1545-1568. <https://doi.org/10.1007/s11071-017-3535-9>
- [9] H. Zhang, G. Huang, D. Yu, 2020, Numerical modeling for the frame structure of light van-type electric truck, *Sci. Prog.*, pp. 1-27. <https://doi.org/10.1177/0036850420927204>
- [10] S. W. Kang, H. J. Kim, J. W. Kim, H. C. Kim, J. S. Jang, B. M. Kwak, K. S. Choi, H. L. Jang, 2021, Transient structural analysis of a skid mounted on a hydrogen tube trailer under shock and vibration induced by road irregularities, *Appl. Sci.*, Vol. 11, No. 9, pp. 1-12. <https://doi.org/10.3390/app11093779>
- [11] Technical Report, 1998, DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL, OECD.
- [12] C. W. Kim, M. Kawatani, K. B. Kim, 2005, Three-dimensional dynamic analysis for bridge-vehicle interaction with roadway roughness, *Comput. Struct.*, Vol. 83, pp. 1627-1645.
- [13] J. J. Park, Y. S. Choi, J. M. Park, 2021, Analysis for traffic accident of the bus with advanced driver assistance system (ADAS), *J. Korean Auto. Veh. Saf. Assoc.*, No. 13, Vol. 3, pp. 78-85.
- [14] Y. Lu, S. Yang, S. Li, 2010, Numerical and experimental investigation on stochastic dynamic load of a heavy duty vehicle, *Appl. Math. Modell.*, Vol. 34, pp. 2698-2710. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.12.006>
- [15] Y. He, J. Ren, 2013, A comparative study of car-trailer dynamics models, *SAE Int. J. Passenger Car*, pp. 177-186. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0695>