

## 표준화 플랫폼을 위한 저상버스용 현가장치의 강도 해석

하재우<sup>1)</sup> · 이흥식<sup>2)</sup>

충부대학교 미래자동차융합공학과<sup>1)</sup> · 충부대학교 스마트모빌리티공학과<sup>2)</sup>

### Strength Analysis of a Suspension System for a Low-Floor Bus Platform for Standardization

Jaewoo Ha<sup>1)</sup> · Heung-Shik Lee<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Future Vehicle Convergence Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 10279, Korea

<sup>2)</sup>Department of Smart Mobility Engineering, Joongbu University, Gyeonggi 10279, Korea

(Received 27 February 2026 / Revised 1 April 2026 / Accepted 1 April 2026)

**Abstract :** Widespread adoption of low-floor buses has enhanced accessibility for transportation-vulnerable groups. Within this context, designing low-floor seating buses for extended operation requires structural evaluation of major suspension components at the design stage. This study aims to investigate the structural strength characteristics of suspension components applied to a standardized low-floor seating bus platform. Major suspension components, including a suspension bracket, leaf spring, and coil spring, were evaluated using finite element analysis (FEA) in CATIA for geometric modeling and ABAQUS for structural analysis under static load conditions of 1 ton and 2 tons. Under the respective load conditions, the suspension bracket demonstrated maximum stresses of 147.4 kPa and 213.7 kPa. Maximum stresses of 180 MPa and 364 MPa were observed in the leaf spring, with corresponding displacements of 0.67 mm and 1.37 mm. Coil spring analysis considered four geometric configurations (Type 01-04), with Type 03 showing the highest maximum stress of 1743 MPa, while Type 04 exhibited a relatively more uniform stress distribution with higher reaction force characteristics. These findings indicate that the geometric parameters of suspension components significantly influence stress distribution and structural response. Accordingly, this study provides basic data for the structural design and evaluation of suspension systems for low-floor seating buses.

**Key words :** Suspension bracket(서스펜션 브라켓), Leaf spring(판스프링), Coil spring(코일 스프링), Stress(응력), Reaction force(반력), Displacement(변형량)

## 1. 서론

우리나라는 급속한 고령화와 함께 장애인·노약자·임산부 등 교통약자 인구가 지속적으로 증가함에 따라, 이들의 이동권 보장과 교통 접근성 향상을 위한 다양한 정책을 추진해왔다. 특히 저상버스 도입을 비롯하여, 정류장 시설의 개선, 휠체어 탑승 공간 확충, 차량 내부 구조의 개선 등 교통약자의 실질적 이동 편의 증진을 위한 제도적 기반이 확대되어 왔다.<sup>1)</sup> 「교통약자의 이동편의 증진법」은 국가 및 지방자치단체의 책임을 명확히 하였고, 제3조에서는 교통약자가 일반 시민과 동등하게 교통

수단 및 관련 시설을 안전하고 편리하게 이용할 수 있는 권리를 규정하여 관련 제도의 기반을 마련하였다.<sup>2)</sup>

이러한 제도적 기반 위에서 국토교통부는 「제3차 교통약자 이동편의 증진계획」을 수립하고, 교통약자의 장거리 이동권 보장을 중요한 정책 과제로 제시하였다. 특히 고속·시외버스의 접근성 확보를 위해 제도적·기술적 대안 마련이 요구되었고, 이에 따라 도시형 저상버스에 국한되지 않는 장거리 운행이 가능한 저상 좌석버스 표준모델 개발이 추진되었다.<sup>3)</sup>

해외 선진국들도 교통약자의 이동권을 법적 권리로

\*Corresponding author, E-mail: jsheung@joongbu.ac.kr

<sup>\*</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

명시하고 저상버스 도입을 정책적으로 뒷받침해왔다. 미국은 「Americans with Disabilities Act (ADA)」를 제정하여, 장애인을 포함한 교통약자가 대중교통 이용 과정에서 차별받지 않도록 보장하고, 신규로 도입되는 대중교통수단에 대해 장애인 접근성 요건을 충족하도록 규정하였다. 또한 ADA에서는 고정노선 서비스를 이용하기 어려운 이용자를 위해 보완적 교통수단(Paratransit service)의 제공을 의무화하였으며, 이에 따라 미국 내 주요 도시 교통기관들은 저상버스(Low-floor bus)를 포함한 접근성 향상형 차량을 도입하여 교통약자의 이동 편의성을 실질적으로 개선하였다.<sup>4)</sup>

영국은 「Disability Discrimination Act(DDA)」와 이후 제정된 「Equality Act」를 통해 대중교통의 접근성을 강화하고, 저상버스를 주요 도시 노선에 확대 도입함으로써 대중교통을 사회적 포용(Social inclusion)의 수단으로 발전시켰다.<sup>5)</sup>

일본은 2000년 제정된 「교통배리어프리법(Transportation Barrier-Free Law)」과 2006년 「고령자·장애인 등의 이동원활화 촉진법」을 통해 ‘논스텝 버스(Non-Step Bus)’ 도입을 확대하고, 철도역·여객시설의 배리어프리 설계를 추진함으로써 대중교통 접근성을 지속적으로 개선하였다.<sup>6)</sup>

2021년 기준, 국내 전체 인구의 약 30 %가 교통약자로 분류되며, 이들은 의료, 복지, 문화 등의 다양한 목적으로 장거리 이동 수요를 가진다. 그러나 국내에는 자동차 전용도로 운행이 가능한 고속 저상버스가 사실상 존재하지 않아, 장거리 이동권이 실질적으로 제약되고 있다. 일부 지역에서 휠체어 리프트형 버스가 운행 중이나, 도시간 주행이 가능한 새로운 대중교통 수단의 개발이 시급한 실정이다.

기술적 측면에서 고속 저상 좌석버스는 일반 저상버스에 비해 더 높은 구조적 안정성, 진동 흡수 성능, 승차감이 요구되며, 이는 고속 운행과 장거리 주행에서 필수적인 성능이다. 이러한 성능 확보를 위해서는 차량 하부구조와 현가장치(Suspension system)의 적절한 설계와 성능 해석이 필요하다. 현가장치는 주행 중 발생하는 진동 및 충격을 완화하여 승차감과 안전성을 확보하는 핵심 부품으로, 차량의 내구성과 피로 수명에 결정적인 영향을 미친다.

국내의 현가장치 관련 연구는 상용차를 중심으로 주요 하위 부품 단위에서 이루어져 왔으며, 주로 단일 부품에 대한 응력 분포나 강도 특성을 정적 조건에서 검증하는 데 초점이 맞추어져 있다.

먼저 서스펜션 브라켓의 경우, Hwang 등<sup>7)</sup>은 상용차 캡(Cab)에 적용되는 서스펜션용 마운팅 브라켓을 대상

으로 유한요소해석(FEA)을 수행하여 응력 집중 부위를 도출하고 부품의 안전성을 분석하였다. 또한 Lee 등<sup>8)</sup>은 사시 암브라켓에 위상최적화 기법을 적용하여 경량화와 강성 유지가 가능한 설계 개선을 시도하였다. 그러나 이러한 연구들은 모두 개별 브라켓에 한정되어 수행되었으며, 현가장치 구성 부품의 구조적 특성을 종합적으로 비교한 연구는 부족한 실정이다.

판스프링에 관한 연구에서는 Choi와 Cho<sup>9)</sup>가 대형트럭에 장착된 리프스프링을 대상으로 장수 구성 변화에 따른 처짐량과 응력 분포의 경향을 비교 분석하였다. 그러나 이 연구 또한 스프링 부품 자체의 거동에 국한되어 있으며, 실제 하중 조건을 반영한 구조 해석은 수행되지 않았다.

코일 스프링의 경우, 기존 연구들은 가공 공정 최적화나 신소재 적용 등 개별 기술 요소에 집중되는 경향이 강하다. 예를 들어, Kwon과 Shin<sup>10)</sup>은 자동차 코일 스프링의 내구성 확보를 위해 GFRP 복합재를 적용하고 유효 권선수 변화에 따른 구조 강도 및 피로 특성을 유한요소해석과 시험을 통해 비교하였다. 이는 소재 변화와 경량화 효과에 초점이 맞추어져 있었다. 또한 Jung 등<sup>11)</sup>은 경강선재의 롤인발 공정을 해석하여 공정 중 발생하는 응력과 형상 오류를 분석하고, 최적 설계 조건을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들은 모두 소재 가공 공정이나 재료 특성에 초점을 맞춘 한계가 있다.

종합하면, 기존의 선행연구들은 서스펜션 브라켓, 판스프링, 코일 스프링 등 개별 부품에 대한 해석과 소재·형상 개선에 초점이 맞추어져 있으며, 저상 좌석버스용 현가장치 주요 구성요소를 대상으로 한 설계 검토용 정적 강도 해석 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 저상 좌석버스를 대상으로 서스펜션 브라켓, 판스프링, 코일 스프링의 구조 특성을 정적 하중 조건에서 유한요소해석을 통해 비교·분석하고, 각 부품의 구조적 안전성을 평가하고자 한다.

따라서 저상 좌석버스의 설계 단계에서는 서스펜션 브라켓(Suspension bracket), 판스프링(Leaf spring), 코일 스프링(Coil spring) 등의 주요 구성요소에 대해 정량적인 구조 해석과 검증이 필수적이다. 본 연구는 교통약자의 장거리 이동권 보장을 위한 기술적 기반을 마련하기 위해, 저상 좌석버스의 현가장치 구성 요소에 대한 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 수행한다. 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, 본 연구는 교통약자의 이동권 확대라는 정책적 요구를 저상 좌석버스 현가장치의 구조해석과 연계하여 검토하였다는 점에서 기술적 의의를 가진다.

둘째, 다양한 형상의 코일스프링 모델링을 통해 직경,

단면 지름 및 권선수 변화에 따른 응력 및 변형 특성을 정량적으로 비교함으로써 설계변수의 영향을 분석하였다.

셋째, 본 연구 결과는 향후 저상버스 표준 플랫폼 설계의 근거 자료로 활용될 수 있으며, 산업 현장에서 적용 가능한 설계 지침 마련에 기여할 수 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 모델

본 연구에서는 실제 양산 부품을 직접 해석하는 대신, 저상 좌석버스용 표준 플랫폼의 구조 강도 평가를 위한 연구 전용 모델을 설계·제작하였다. 전체 차량을 단순화하기보다, 설계 단계에서 구조 안전성 검토가 필요한 현가장치 주요 부품을 중심으로 해석 범위를 설정하였다.

분석 대상은 차체와 차축을 연결하는 서스펜션 브라켓, 하중을 지지하며 충격을 완화하는 판스프링, 그리고 진동 저감을 담당하는 코일스프링으로 구성하였다. 이러한 부품들은 차량의 구조 안전성과 내구성에 직접적인 영향을 미치는 주요 요소로서 연구 대상으로서 적합성이 충분하다.

각 부품은 3차원 모델링을 거쳐 유한요소해석(FEA)에 적용되었으며, 설정된 정적 하중 조건과 경계조건 하에서 응력 분포와 변형 거동을 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 저상버스 플랫폼 현가장치의 구조적 특성을 비교하고, 향후 설계 검토 및 구조 안전성 평가를 위한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

### 2.2 서스펜션 브라켓 해석

서스펜션 브라켓은 판스프링을 프레임에 고정하는 부품으로, 하중 전달과 고정 안정성에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 브라켓 해석을 위해 Case 1에 1 ton, Case 2에 2 ton의 하중 조건을 적용하였으며, 선행된 판스프링 해석에서 산출된 반력 조건(RF: 20 N, 29 N)을 경계조건으로 사용하여 각 조건에서의 응력 분포와 변형 거동을 분석하였다.



Fig. 1 Suspension bracket 3d model

### 2.3 판 스프링 해석

판스프링은 5겹의 리프와 댐퍼가 결합된 구조로 모델

링하였다. 차량 중량의 1/4에 해당하는 조건으로 1 ton과 2 ton의 하중을 각각 적용하고, 응력 분포와 변형량을 도출하였다. 이를 통해 하중 증가에 따른 구조적 거동과 강도 특성을 분석하였다.

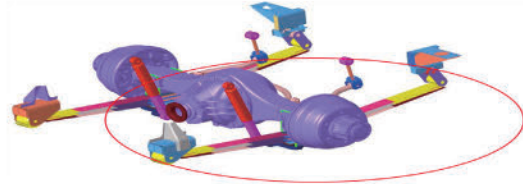
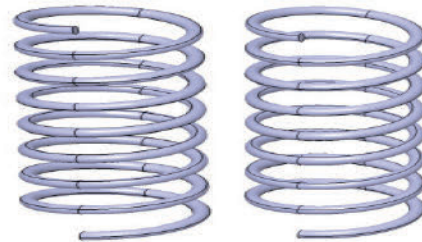


Fig. 2 Leaf spring 3d model

### 2.4 코일 스프링 해석

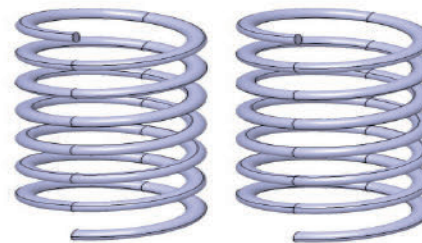
코일 스프링은 단면 형상과 외경, 권선수에 따라 4가지 형상(Type 01~04)으로 모델링하였다. 각 형상에 대해 동일한 조건의 하중을 적용하고, 최대 응력 및 반력의 차이를 비교 분석하였다. 이를 통해 스프링 설계 변수의 영향도를 수치적으로 비교·분석하였다.



Type 01

Type 02

Fig. 3 Coil spring 3d model



Type 03

Type 04

Fig. 4 Coil spring 3d model

### 2.5 해석 절차 및 프로그램

모든 부품은 CATIA를 이용하여 형상을 모델링하였으며, 구조 해석은 ABAQUS 2020을 사용하여 수행하였다. 재료 물성은 각 부품에 적용되는 소재 특성을 기반으로 입력하였고, 경계조건과 하중조건은 설계 검토 목적에

맞추어 설정하였다. 서스펜션 브라켓은 일정한 두께를 갖는 비교적 단순한 형상 구조로 2D mesh 적용에 용이하므로, 본 연구에서는 해석 효율성과 수렴 안정성을 고려하여 2D mesh 기반의 단순화 모델을 적용하였다. 이 모델은 설계 단계에서 하중 조건 변화에 따른 구조 응답 특성을 비교·검토하기 위한 해석 모델로 사용하였다. 브라켓의 하중 조건은 1 ton 및 2 ton으로 설정하였다. 판스프링은 3D 모델의 양단에 지지조건을 부여하였으며, 차량 중량의 1/4을 고려하여 Case 1은 1 ton, Case 2는 2 ton으로 설정하였다. 코일 스프링은 하단을 고정하고 상단에 압축 변위를 부여하였으며, 전체 높이의 절반(1/2)까지 압축하는 조건으로 해석을 수행하였다. 본 해석은 선형 정적 해석(Linear Static Analysis)을 기준으로 수행하였고, 결과는 응력 분포( $\sigma$ ), 반력(R), 변형량( $\delta$ )을 중심으로 비교·검토하였다. 또한 결과 그래프에 표시된 시간 축은 실제 주행시간을 의미하는 것이 아니라, 하중 또는 변위를 단계적으로 부여하는 해석 단계(Load step)를 나타낸다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 서스펜션 브라켓(Suspension Bracket) 강도 해석

저상 좌석버스 플랫폼의 주요 하부 구성요소 중 하나인 서스펜션 브라켓을 대상으로, 설정된 정적 하중 조건에서 유한요소해석(FEA)을 수행하여 구조 응답 특성을 분석하였다. 본 연구의 하중 조건은 실제 도로 주행의 동적 하중이나 노면 입력을 재현하기 위한 것이 아니라, 설계 단계에서 하중 변화에 따른 브라켓의 구조 응답을 비교·검토하기 위한 대표 정적 하중 조건으로 설정하였다.

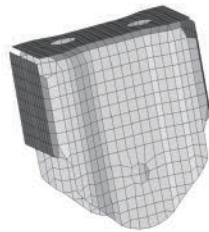


Fig. 5 Meshed model

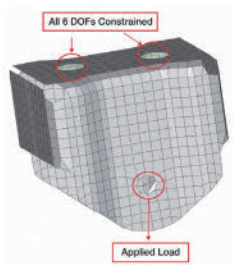


Fig. 6 Boundary conditions

본 연구에서는 2D Mesh 기반의 간소화 모델을 적용하여 해석 효율성과 수렴 안정성을 확보하였다. 해석은 두 가지 하중 조건(1 ton, 2 ton)과 두 가지 반력 조건(RF: 20 N, 29 N)을 적용하여 수행하였으며, 각 조건별 응력 분포와 변형 거동을 비교하였다.

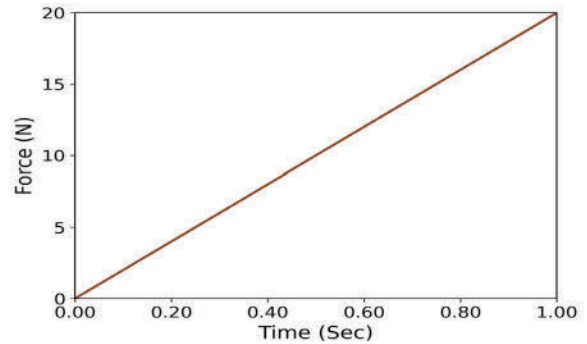


Fig. 7 Reaction force of case 1 : 20 N (time-dependent linear increase of reaction force under a 20 N load)

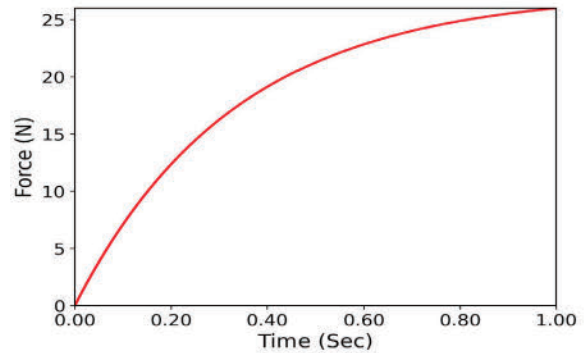


Fig. 8 Reaction force of case 2 : 29N (time-dependent nonlinear increase of reaction force under a 29 N load)

Table 1 Material properties

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| Density         | 7.85 g/cm <sup>3</sup> |
| Young's modulus | 210 GPa                |
| Poisson ratio   | 0.29                   |

Table 2 Finite element model information

|                        |       |
|------------------------|-------|
| Number of nodes        | 975   |
| Number of elements     | 901   |
| Average element length | 10 mm |

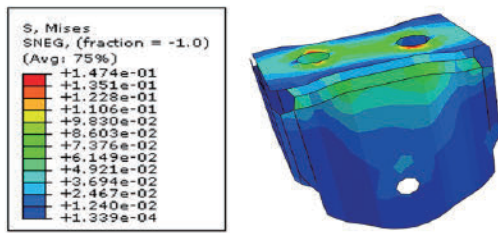


Fig. 9 Reaction force of case 1 : 20N (time-dependent linear increase of reaction force under a 20 N load)

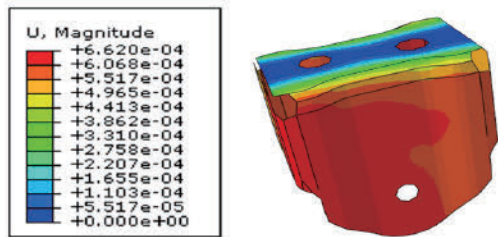


Fig. 10 Reaction force of case 2 : 29N (increased displacement with maximum deformation occurring in the lower region under a 29 N load)

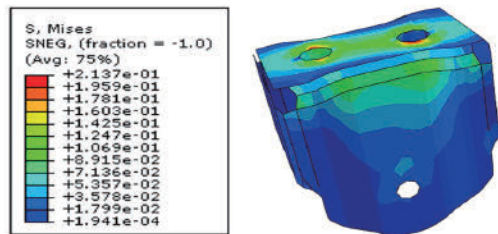


Fig. 11 Reaction force of case 1 : 20N (time-dependent linear increase of reaction force under a 20 N load)

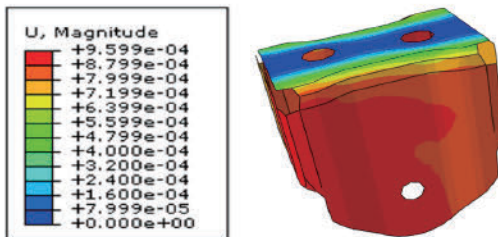


Fig. 12 Reaction force of case 2 : 29N (increased displacement with maximum deformation occurring in the lower region under a 29 N load)

해석 결과, 서스펜션 브라켓은 하중 증가에 따라 응력이 증가하는 경향을 보였으며, 1 ton 하중 조건에서 최대 응력은 147.4 kPa, 2 ton 하중 조건에서 최대응력은 213.7

kPa로 나타났다. 이는 브라켓이 일정한 두께를 갖는 비교적 단순한 형상 구조이며, 하중 전달 경로가 비교적 명확하기 때문에 하중 증가에 따라 구조 응답이 비례적으로 나타난 결과로 판단된다. 최대응력은 주로 고정부 및 형상 변화부 인근에서 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 하중 전달 경계부에서 응력 집중이 발생함을 보여준다. 따라서 본 결과는 서스펜션 브라켓의 정적 하중 조건 변화에 따른 구조 응답 특성을 비교·검토하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

### 3.2 판스프링(Leaf spring) 강도 해석

판스프링(Leaf spring)은 상용차 및 버스의 차축에 주로 사용되는 부품으로, 차체 하중을 지지하고 차륜의 위치를 일정하게 유지하는 역할을 한다. 본 연구에서는 저상 좌석버스용 판스프링의 응력 분포와 변형량을 분석하였다.

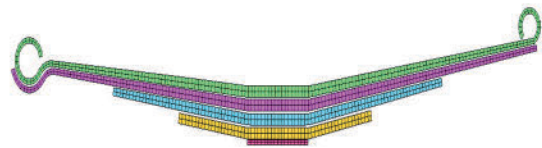


Fig. 13 Meshed model

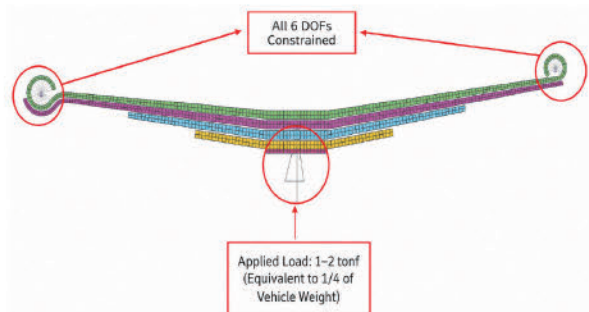


Fig. 14 Boundary conditions

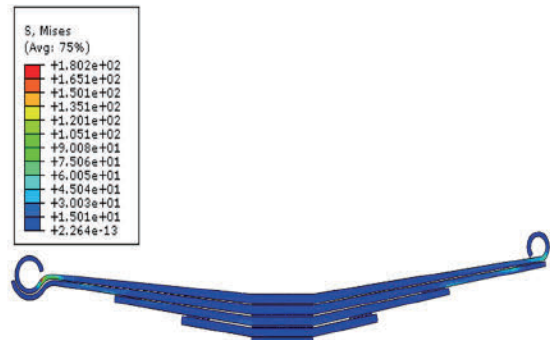


Fig. 15 Stress of case 1

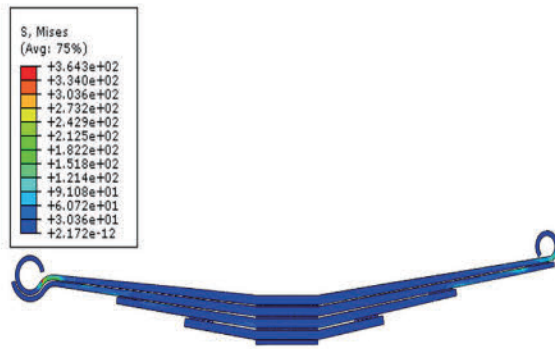


Fig. 16 Stress of case 2

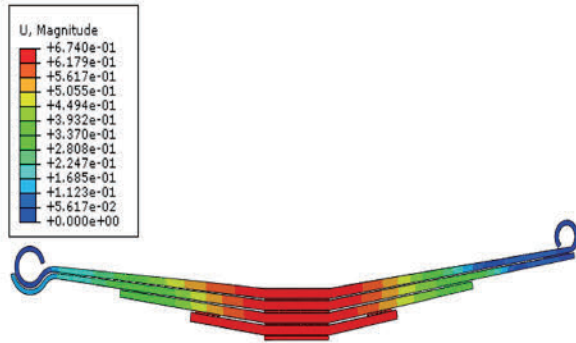


Fig. 17 Displacement of case 1

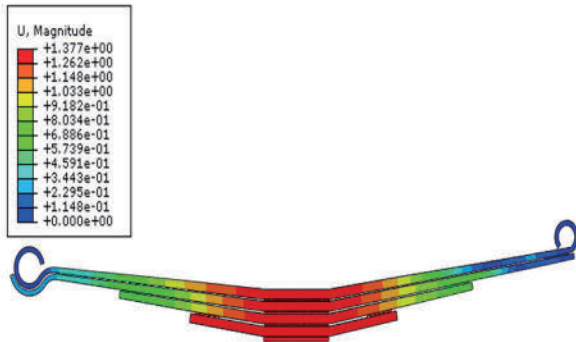


Fig. 18 Displacement of case 2

해석 결과, Case 1의 최대응력은 180 MPa, 최대 변형량은 0.67 mm, Case 2의 최대응력은 364 MPa, 최대 변형량은 1.37 mm로 나타났다. 이는 다층(5장) 스프링 구조와 댐퍼 효과에 의해 하중이 비교적 고르게 분산되었기 때문으로 판단된다. 하중 증가에 따라 응력과 변형량은 증가하는 경향을 보였으며, 국부적인 응력 집중 없이 비교적 균일한 분포가 확인되었다. 이러한 결과는 판스프링의 구조적 거동과 강도 특성을 설계 검토 관점에서 평가하는 데 유효한 기초 자료로 활용될 수 있다.

### 3.3 코일 스프링(Coil Spring) 강도 해석

코일 스프링은 저상 좌석버스 현가장치의 주요 구성 요소로, 차량 하중을 지지하는 역할을 한다. 본 연구에서는 서로 다른 형상의 코일 스프링에 대해 응력 및 반력 특성을 정량적으로 분석하였다. 각 모델은 동일한 경계 조건 하에서 전체 높이의 절반(1/2)까지 압축 변위를 부여하여 해석을 수행하였으며, 형상 변화에 따른 구조 응답 차이를 비교하였다.

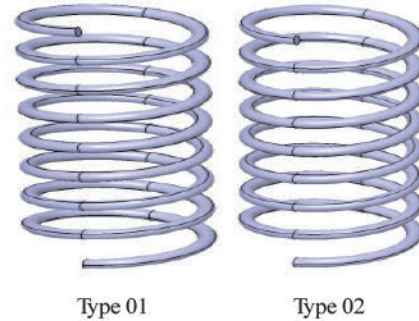


Fig. 19 Coil spring configurations type 01-02

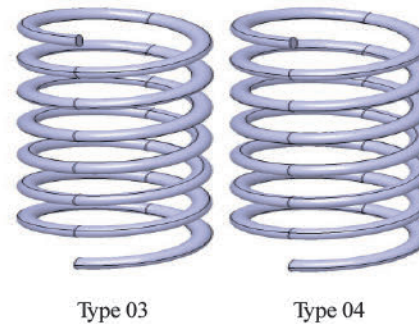


Fig. 20 Coil spring configurations type 03-04

Table 3 Coil spring configurations (Size)

| Type            | Type 01 | Type 02 |
|-----------------|---------|---------|
| Diameter        | 150 mm  | 160 mm  |
| Wire diameter   | 15 mm   | 15 mm   |
| Number of coils | 7 mm    | 7 mm    |
| Total height    | 400 mm  | 400 mm  |

Table 4 Coil spring configurations (Size)

| Type            | Type 03 | Type 04 |
|-----------------|---------|---------|
| Diameter        | 150 mm  | 160 mm  |
| Wire diameter   | 18 mm   | 18 mm   |
| Number of coils | 6 mm    | 6 mm    |
| Total height    | 400 mm  | 400 mm  |

코일 스프링의 형상은 Type 01부터 Type 04까지 직경, 단면 지름, 권선 수에서 차이를 보인다. 먼저 직경은 Type 01과 Type 03이 150 mm로 동일하며, Type 02와 Type 04는 160 mm로 상대적으로 크게 설계되었다. 단면 지름의 경우 Type 01과 Type 02는 15 mm이고, Type 03과 Type 04는 18 mm로 더 두껍게 제작되어 강성이 증가할 것으로 예상된다. 권선 수는 Type 01과 Type 02가 7회전으로 많으며, Type 03과 Type 04는 6회전으로 한 바퀴 적어 구조적으로 더 단단한 특성을 갖는다. 전체 높이는 네 가지 모두 400 mm로 동일하게 유지되어, 높이를 일정하게 둔 상태에서 직경, 단면 지름, 권선 수 변화가 스프링의 거동에 어떤 영향을 주는지를 비교할 수 있도록 하였다.

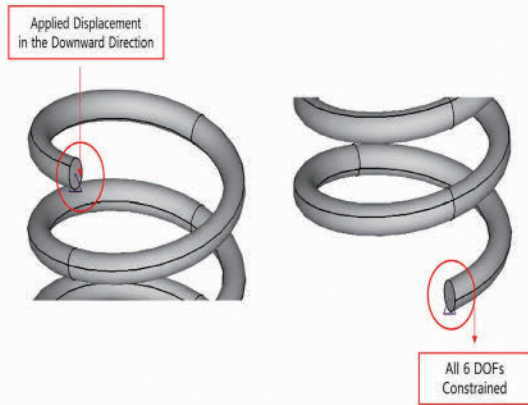


Fig. 21 Boundary conditions

Table 5 Material properties

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| Material        | SAE9254                |
| Density         | 7.85 g/cm <sup>3</sup> |
| Young's modulus | 200 GPa                |
| Poisson ratio   | 0.29                   |

Table 6 Reference mechanical properties of SAE9254-equivalent spring steel<sup>12)</sup>

|                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| Equivalent grade           | JIS SUP12 / DIN EN 54SiCr6 |
| 0.2 % proof stress (Rp0.2) | ≥ 1300 MPa                 |
| Tensile strength (Rm)      | 1450-2050 MPa              |

Table 7 Finite element model

|                        |        |
|------------------------|--------|
| Number of nodes        | 6,456  |
| Number of elements     | 17,071 |
| Average element length | 6 mm   |



Fig. 22 Initial state of type 01

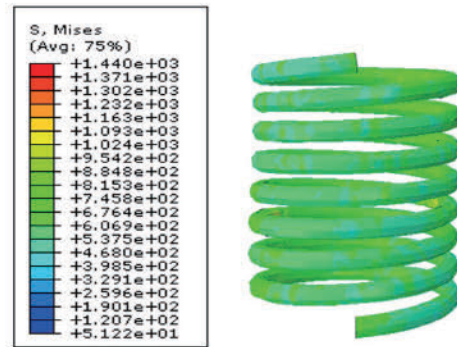


Fig. 23 Stress analysis of coil spring type 01

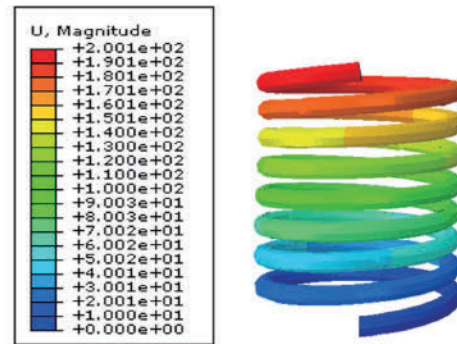


Fig. 24 Displacement analysis of coil spring type 01



Fig. 25 Initial state of type 02

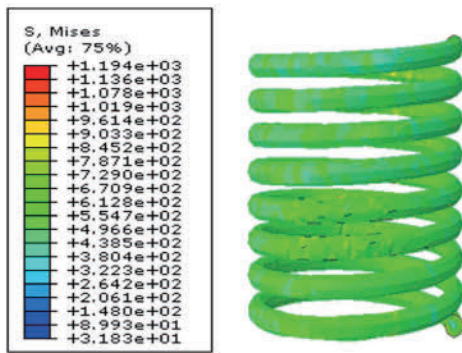


Fig. 26 Stress analysis of coil spring type 02

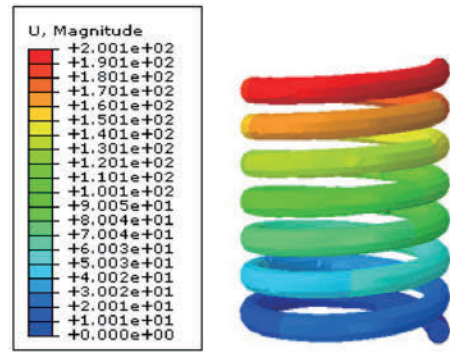


Fig. 30 Displacement analysis of coil spring type 03

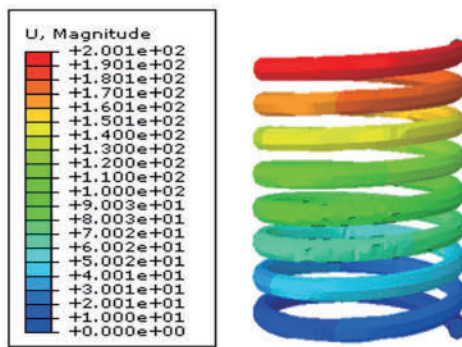


Fig. 27 Displacement analysis of coil spring type 02



Fig. 31 Initial state of type 04



Fig. 28 Initial state of type 03

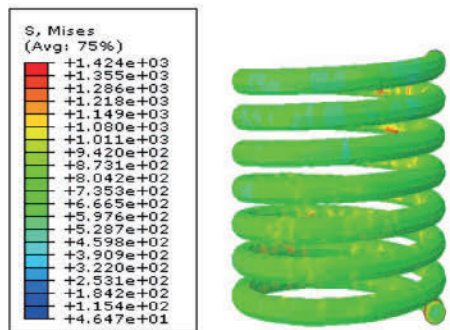


Fig. 32 Stress analysis of coil spring type 04

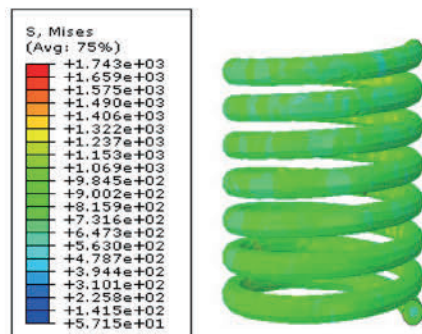


Fig. 29 Stress analysis of coil spring type 03

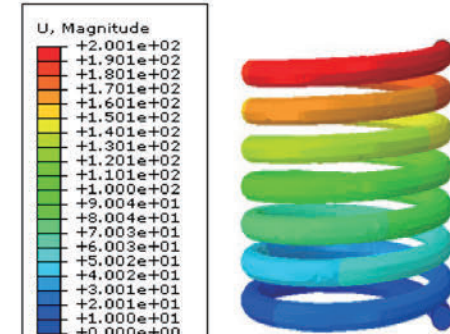


Fig. 33 Displacement analysis of coil spring type 04

코일 스프링 해석결과는 다음과 같다. 전체 형상의 1/2 까지 압축할 경우 Type 01의 최대 응력은 1440.46 MPa, Type 02은 1194.78 MPa, Type 03은 1743.18 MPa, Type 04은 1424.21 MPa으로 나타났다. 코일 스프링을 전체 높이의 절반까지 압축했을 때, 네 가지 형상 모두에서 최대 응력은 코일의 내측 표면에서 확인되었다. 특히 하단 고정부와 연결되는 첫 번째 권선 부근에서 응력 집중이 가장 크게 나타났으며, 단면 지름이 상대적으로 큰 Type 03과 Type 04에서는 압축이 진행되면서 코일 간 간격이 좁아지는 부분에서 국부적으로 응력이 더 크게 증가하는 경향이 나타났다.

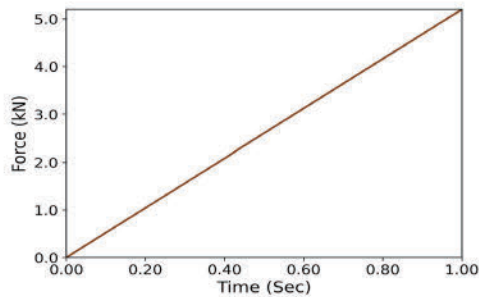


Fig. 34 Reaction force of type 01 (reaction force increases linearly with time)

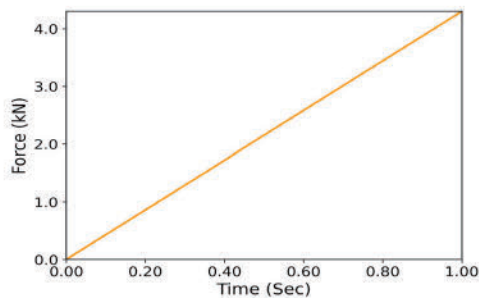


Fig. 35 Reaction force of type 02 (reaction force increases linearly with time)

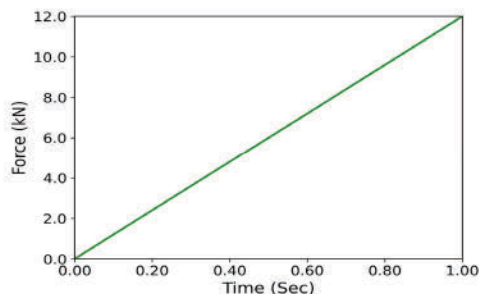


Fig. 36 Reaction force of type 03 (reaction force increases linearly with time)

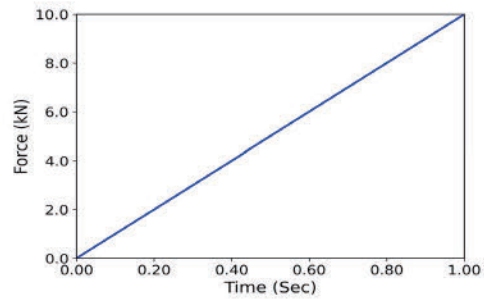


Fig. 37 Reaction force of type 04 (reaction force increases linearly with time)

Table 8 Reaction force

| Time (Sec) | Type 01 | Type 02 | Type 03 | Type 04 |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 0.0        | 0N      | 0N      | 0N      | 0N      |
| 0.1        | 533N    | 439N    | 980N    | 1,189N  |
| 0.3        | 1,066N  | 879N    | 1,960N  | 2,378N  |
| 0.4        | 1,599N  | 1,319N  | 2,941N  | 3,567N  |
| 0.5        | 2,132N  | 1,759N  | 3,921N  | 4,757N  |
| 0.6        | 2,665N  | 2,199N  | 4,901N  | 5,946N  |
| 0.7        | 3,198N  | 2,639N  | 5,882N  | 7,135N  |
| 0.8        | 3,731N  | 3,079N  | 6,862N  | 8,325N  |
| 0.9        | 4,264N  | 3,519N  | 7,843N  | 9,514N  |
| 1.0        | 4,797N  | 3,959N  | 8,823N  | 10,703N |

코일 스프링의 해석 결과, 형상 인자 변화에 따라 응력과 반력의 거동이 뚜렷하게 달라지는 것으로 나타났다. 단면 지름이 18 mm이고 권선 수가 6회인 Type 03은 네 가지 형상 중 가장 높은 최대응력(약 1,743 MPa)을 보였으며, 동일한 단면 조건에서 직경이 큰 Type 04는 응력이 보다 균등하게 분포되어 상대적으로 낮은 최대응력을 나타냈다. 이는 스프링 직경의 증가가 응력 분산에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 다만 Type 03에서 산출된 최대응력 1743.18 MPa는 전체 높이의 절반까지 압축하는 조건에서 선형 정적 해석으로 도출된 국부 최대값으로, 하단 고정부와 연결되는 첫 번째 권선 부근의 응력 집중을 반영한 결과이다. 따라서 본 수치는 형상별 응력 집중 경향을 비교하기 위한 상대적 지표로 해석하는 것이 타당하며, 절대적인 허용응력 또는 파손 여부 판단을 위해서는 재료 비선형성, 접촉 조건 및 실험적 검증을 포함한 추가 검토가 필요하다.

반력 분석에서도 유사한 경향이 확인되었다. 단면 지름이 큰 Type 03과 Type 04 모델은 다른 형상에 비해 높은 반력 값을 나타내어, 형상 변화가 스프링의 강성 특성

에 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

이러한 결과를 종합하면, 단면 크기와 전체 직경은 응력 분포 및 반력 특성에 직접적인 영향을 미치는 주요 설계 인자로 판단된다. 형상이 변화함에 따라 강성은 증가하는 경향을 보였으나, 동시에 일부 조건에서는 국부적인 응력 수준도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 코일 스프링 설계 시에는 강성 향상뿐 아니라 응력 집중 완화 측면을 함께 고려할 필요가 있다.

한편, 본 연구는 저상 좌석버스 구조적 제약 조건을 고려한 범위 내에서 코일 스프링 형상 변화에 따른 구조 응답 특성을 비교·분석하는 데 목적이 있다. 저상버스는 하부 공간 제약이 크므로 스프링의 직경, 단면 지름 및 권선 수는 제한된 설계 범위 내에서 검토될 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 직경 150-160 mm, 단면 15-18 mm, 권선수 6-7회의 조합을 대상으로 해석을 수행하였으며, 이를 통해 형상 변화에 따른 응력 분포와 반력 특성의 차이를 비교하였다.

결국 본 연구는 저상 좌석버스용 코일 스프링의 형상 변화가 구조 응답에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였으며, 향후 설계 검토를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다는 점에서 의의가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저상 좌석버스 현가장치의 주요 구성 요소인 서스펜션 브라켓, 판스프링, 그리고 코일 스프링을 대상으로 유한요소해석을 수행하여 구조 강도 특성을 정량적으로 평가하였다.

해석 결과, 서스펜션 브라켓은 1 ton 및 2 ton의 정적 하중 조건에서 하중 증가에 따라 응력이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 일정한 두께를 갖는 비교적 단순한 형상 구조와 명확한 하중 전달 경로에 기인한 것으로 판단된다. 판스프링은 하중 증가에 따라 응력과 변형량이 함께 증가하였으며, 5장 리프와 댐퍼가 결합된 다층 구조에 의해 하중이 비교적 고르게 분산되는 특성을 나타내었다.

코일 스프링의 경우, 형상 변화에 따라 응력 및 반력 특성이 뚜렷하게 구분되었다. 단면 지름이 큰 모델은 상대적으로 높은 반력 값을 나타내어 형상 변화가 강성 특성에 영향을 미침을 확인할 수 있었으며, 일부 형상에서는 국부적인 응력 집중도 함께 나타났다. 특히 Type 03 모델은 가장 큰 최대응력을 보였고, 직경이 더 큰 Type 04 모델은 응력이 상대적으로 분산되는 경향과 함께 큰 반력 특성을 나타내었다. 이러한 결과는 코일 스프링 설계 시 단면 지름과 전체 직경이 응력 분포 및 반력 특성

에 직접적인 영향을 미치는 주요 설계 변수임을 보여준다. 다만 Type 03에서 산출된 최대응력은 전체 높이의 절반까지 압축하는 조건에서 도출된 국부 최대값으로, 형상별 응력 집중 경향을 비교하기 위한 상대적 지표로 해석하는 것이 타당하다.

종합적으로, 본 연구는 저상 좌석버스 현가장치의 구조 강도 특성을 비교·분석함으로써 설계 단계에서 활용 가능한 기초 자료를 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 보다 정교한 해석 모델의 적용, 피로 해석 및 실험적 검증을 통해 설계 신뢰성을 보완할 필요가 있다.

#### References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "The 4th Plan for Improving Transportation Convenience for Mobility Disadvantaged Persons (2022-2026)," Press Release of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp.1-6, 2022.
- 2) National Assembly, "Act on Promotion of the Transportation Convenience of Mobility Disadvantaged Persons," Act No.7563, 2005.
- 3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "The 3rd Plan for Improving Transportation Convenience for Mobility Disadvantaged Persons (2017-2021)," Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp.14-22, 2016.
- 4) R. D. King, Low-Floor Transit Buses: A Synthesis of Transit Practice, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.1-26, 1994.
- 5) K. Lucas, "Transport and Social Exclusion: Where Are We Now?," Transport Policy, Vol.10, No.4, pp.339-346, 2004.
- 6) T. Akiyama and J. Kim, "Transportation Policies for the Elderly and Disabled in Japan," International Journal of Urban Sciences, Vol.9, No.2, pp.87-98, 2005.
- 7) T. J. Hwang, M. H. Jin and W. Y. Cho, "Structural Analysis of High-Strength Mounting Bracket for Commercial Vehicle Cab Suspension," KSAE Spring Conference Proceedings, p.464, 2015.
- 8) M. K. Lee, H. Y. Chae and K. H. Lee, "A Study on the Design Improvement of a Chassis Arm Bracket Using Topology Optimization," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.365-368, 2022.
- 9) K. K. Choi and J. W. Cho, "A Convergence Study on the Structural Analysis of Leaf Spring in Heavy Trucks," Journal of the Korea Convergence Society, Vol.11, No.12, pp.155-159, 2020.
- 10) J. K. Kwon and J. G. Shin, "Durability Evaluation

- of Effective Coil Turns of GFRP Composite Coil Spring through Structural Analysis and Test,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.47, No.9, pp.721-728, 2023.
- 11) D. H. Jung, H. J. Song, C. I. Kim, J. H. Kim, M. S. Park, J. H. Kim and H. Y. Cho, “Process Design of Spring Washer High-Carbon Wire Using Finite Element Method,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.45, No.10, pp.825-833, 2021.
- 12) Saerstahl, “Material Specification Sheet: 54SiCr6,” Material No.1.7102, DIN EN 10089, SAE 9254, JIS SUP 12.