

# Wheel & Air Spring

노면 충격에 따른 훨 구조 유한요소해석 및 가변 스프링을 통한 충격 완화 설계

2020005532 김시형

2020011012 오정균

# CONTENTS

1. 주제 선정 동기
2. Air spring
3. Simulink
4. Wheel Modeling
5. Comsol
6. 마무리 및 고찰

# 주제 선정 동기

최근 자동차 휠 디자인은 타이어의 편평비를 줄이고 휠의 지름을 늘리는 추세



2006 S500



2023 S500

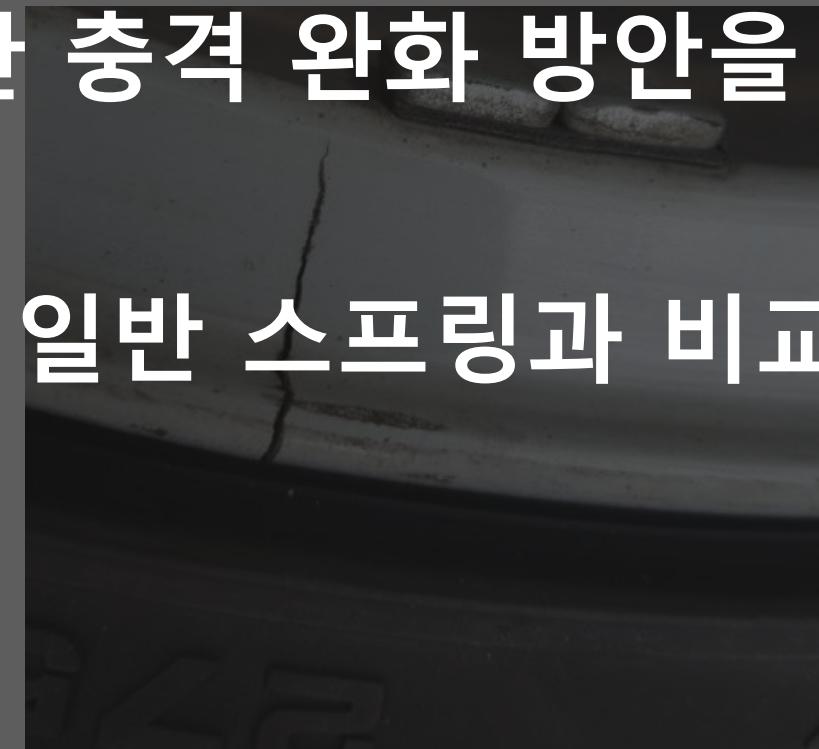
이러한 구조적 변화로 인해 훨은 포트홀 같은 급작스러운 노면 충격에 취약



이러한 구조적 변화로 인해 훨은 포트홀 같은 급작스러운 노면 충격에 취약

가변 에어 스프링을 통한 충격 완화 방안을 연구

휠에 미치는 영향을 일반 스프링과 비교



Air Spring

# Air Spring



<차량용 코일 스프링>



<차량용 에어 스프링>

스프링 강성( $k_s$ )은 변위에 대한 스프링력의 변화량

$$F = A_e(P - P_{atm})$$

$$\therefore k_s = \frac{dF}{dx} = A_e \frac{d(P - P_{atm})}{dx} + (P - P_{atm}) \frac{dA_e}{dx}$$

**Polytropic process**

$$PV^n = P_0V_0^n$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{d(P - P_{atm})}{dx} &= \frac{dP}{dx} = \frac{d}{dx} \left[ P_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^n \right] = -nP \frac{1}{V} \frac{dV}{dx} \\ &= nP \frac{A_e}{V} \quad (\because dV = -A_e dx) \end{aligned}$$

# Air Spring

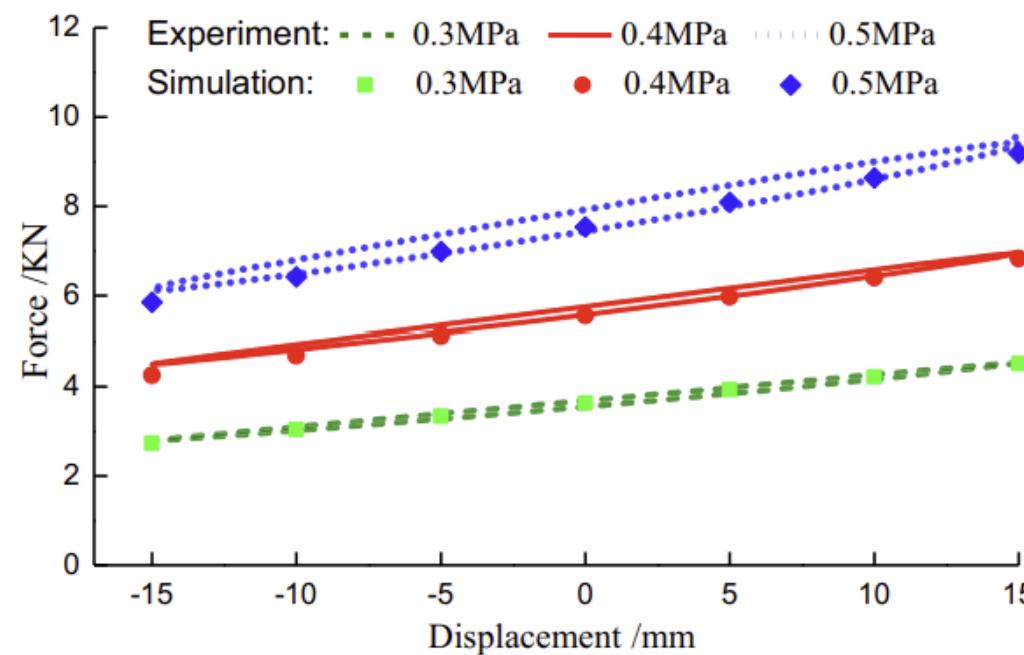
$$k_s = \frac{dF}{dx} = nP \frac{A_e^2}{V} + (P - P_{atm}) \frac{dA_e}{dx}$$

$$\begin{cases} k_{sta} = P \frac{A_e^2}{V} + (P - P_{atm}) \frac{dA_e}{dx} \\ k_{dyn} = \kappa P \frac{A_e^2}{V} + (P - P_{atm}) \frac{dA_e}{dx} \quad (n = \kappa = 1.4) \end{cases}$$

전 공정이 수십 초 걸리는 자동차의 "차고 높이 제어 시스템"은 등온과정으로 간주되며

1Hz 이상의 "공기 현가 시스템"의 작동은 단열과정으로 가정할 수 있다.

# Air Spring

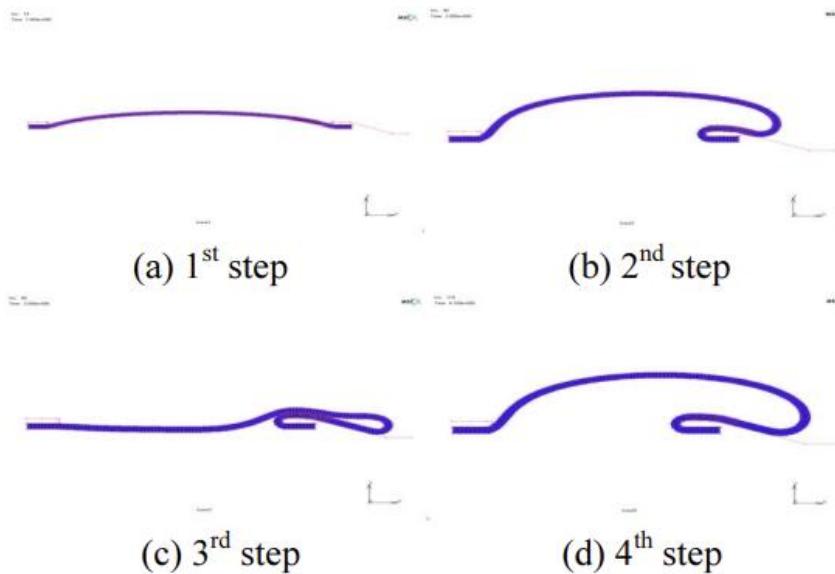


Air Spring의 변위에 따른 스프링력이 선형적인 것을 확인  
 $k_{dyn}$ 이 변위에 영향을 받지 않고 *constant*한 값이라 가정

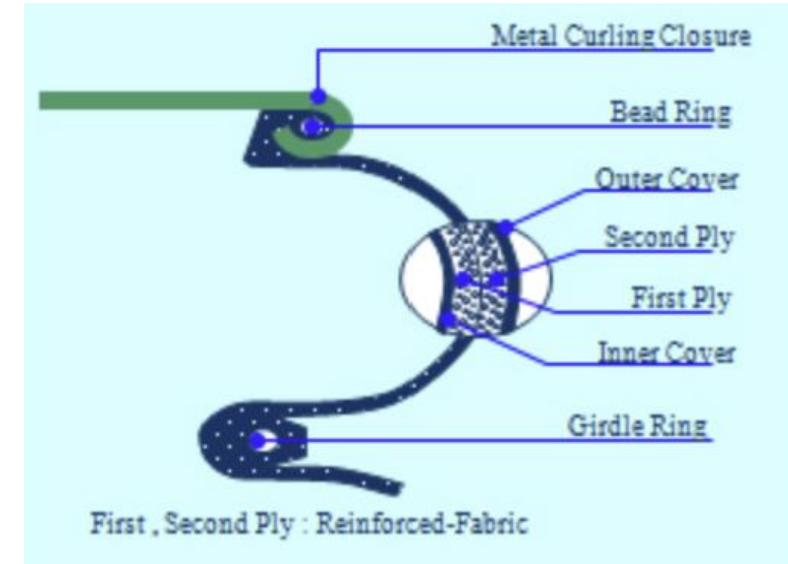
$$k_{dyn} = 1.4 \times P \frac{A_e^2}{V} + (P - P_{atm}) \frac{dA_e}{dx}$$
$$\approx 1.4 \times P_0 \frac{A_{e,0}^2}{V_0}$$

# Air Spring

Deformed shapes of the air spring



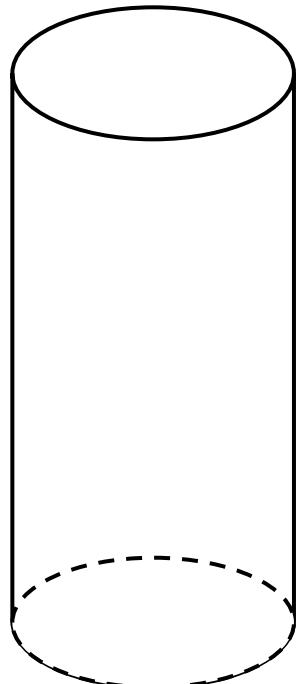
Cross-sectional Structure of Air Spring



에어 스프링은  $A_e$ (유효 단면적)의 변화를 최소화 하기 위해 다음과 같은 구조를 가지고 있음

# Air Spring

해석의 편의성을 위해 다음과 같은 실린더 형태의 Air Spring을 가정



$$k_{dyn} \approx 1.4 \times P_0 \frac{A_{e,0}^2}{V_0} = 1.4 \times P_0 \frac{A_{e,0}}{H_0} \quad (\because A_e H = V)$$

The parameters of the tested samples.

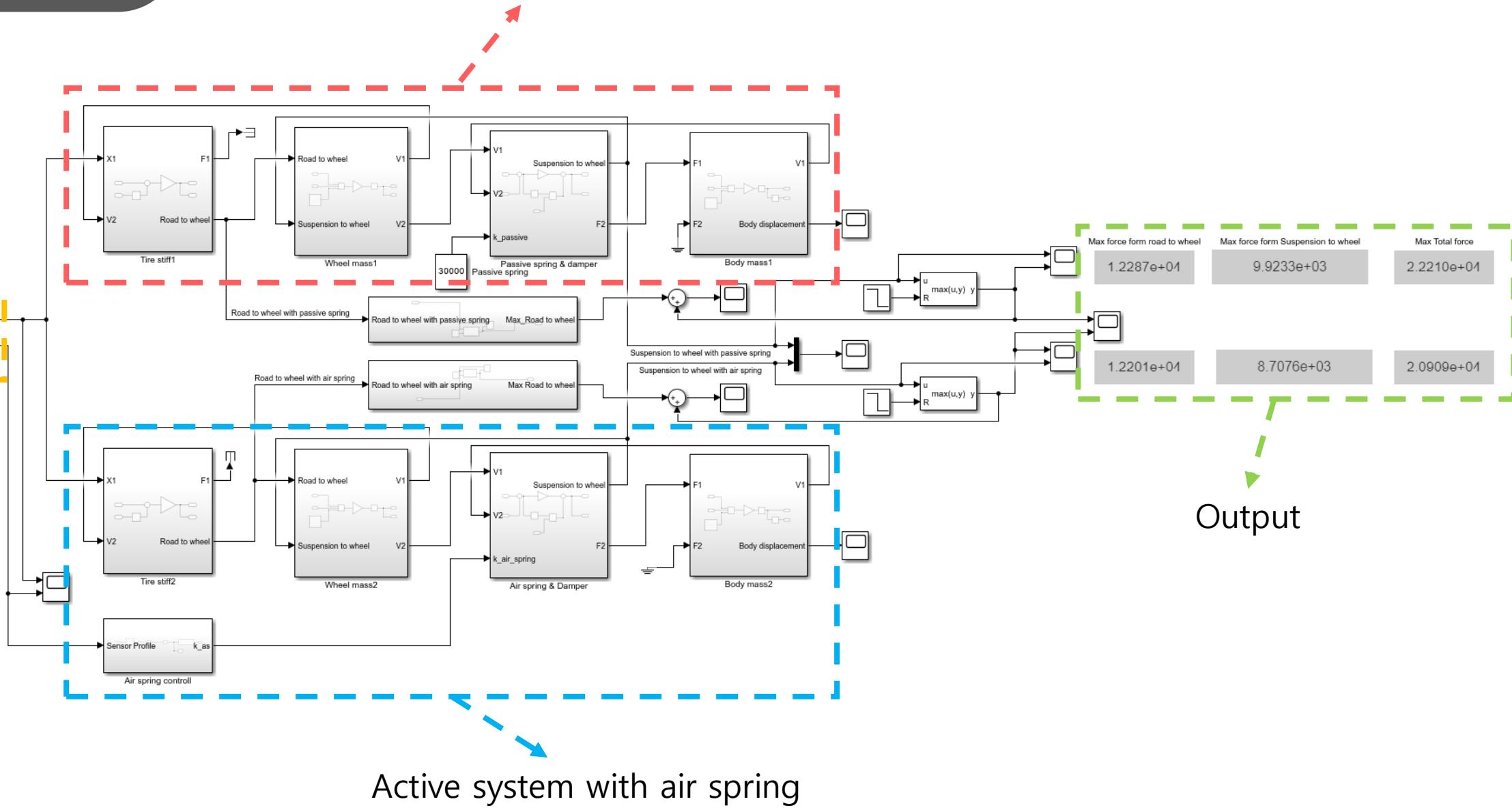
Symbol	Unit	Values for the following CAS type		
		Single-bellowtype	Double-bellow type	Triple-bellow type
$r$	mm	4	4	4
$b$	mm	/	28	28
$t$	mm	8	8	8
$E$	MPa	60.5	60.5	60.5
$V_r$	mm <sup>3</sup>	0	316,069	0
$L_0$	mm	80	80	80
$L_i$	mm	/	82	118
$S_0$	mm	158	126	112
$H_0$	mm	110	210	310
$P_0$	MPa	0.4	0.4	0.4

$$let k_s = k_{dyn} = 0.0908P_0$$

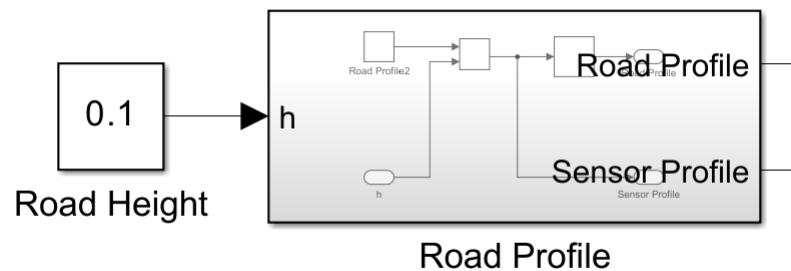
Simulink

## Passive system

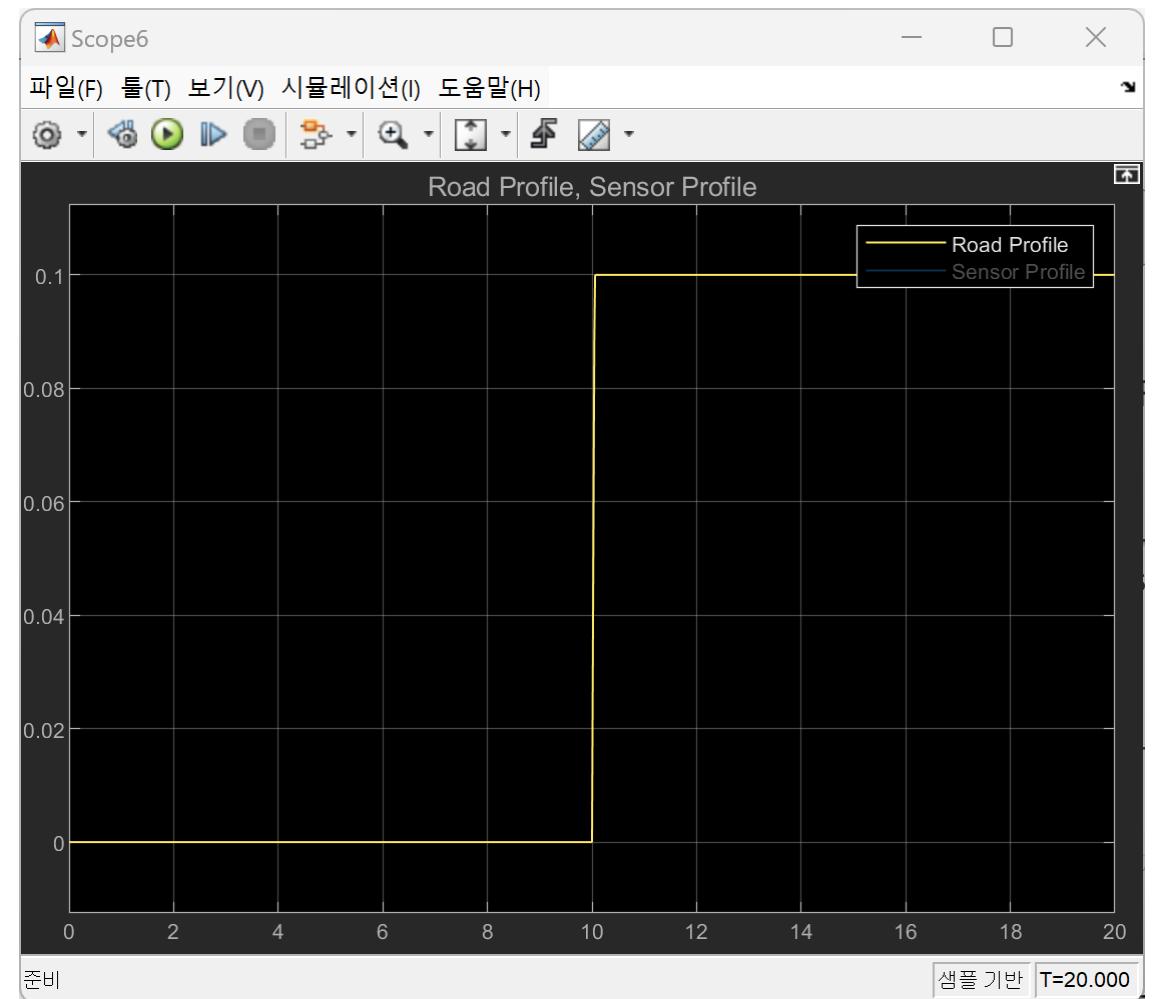
Input



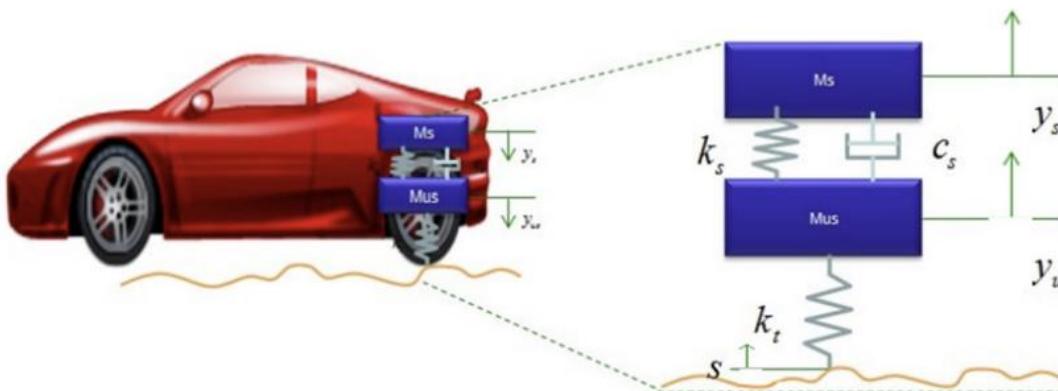
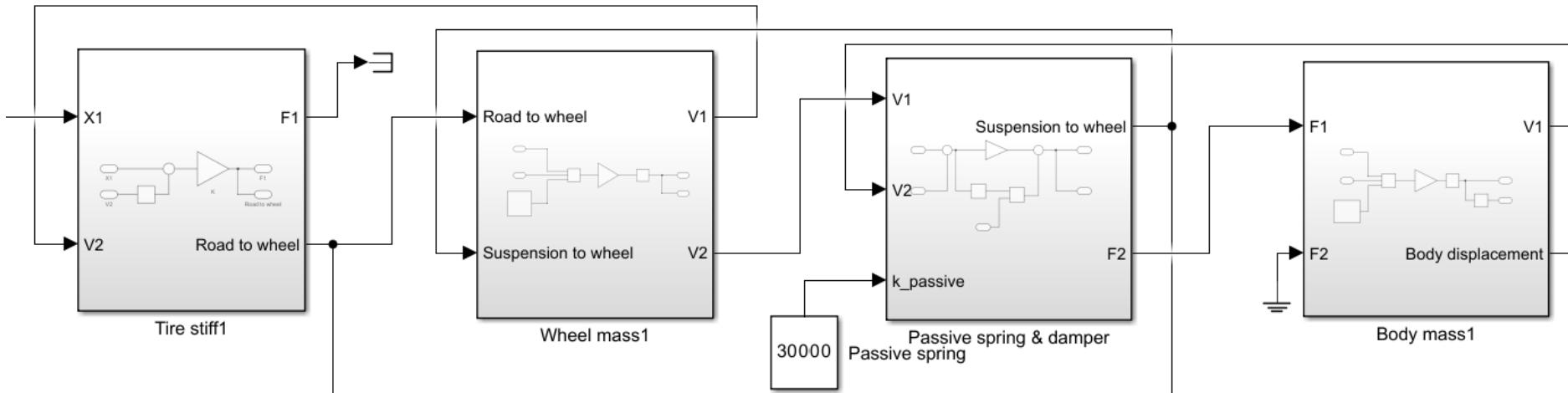
# Simulink



Input : 일정 높이의 Pothole 가정



# Simulink



$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

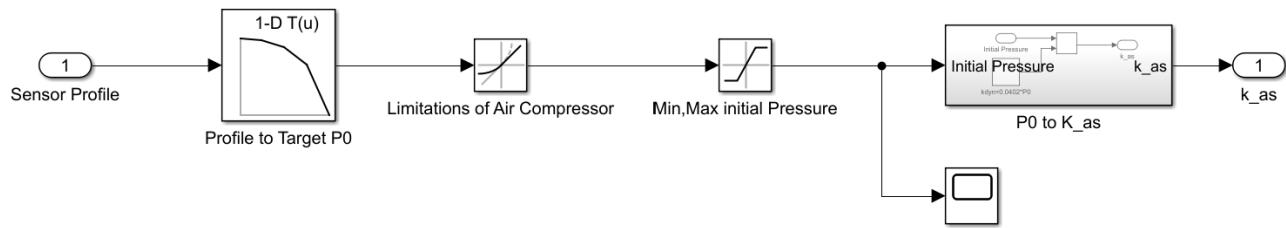
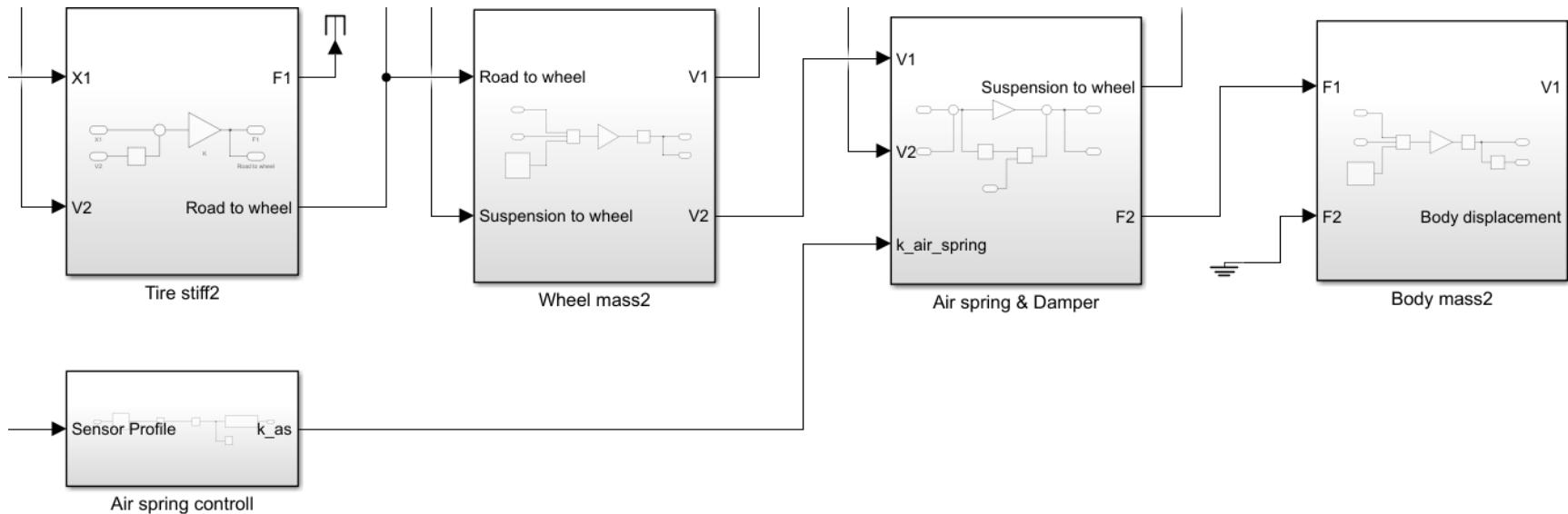
$$k_{tire} = 200,000 \text{ N/m}$$

$$m_{wheel} = 50 \text{ kg}$$

$$k_{sus} = 30,000 \text{ N/m}$$

$$c_{cus} = 1000 \text{ Ns/m}$$

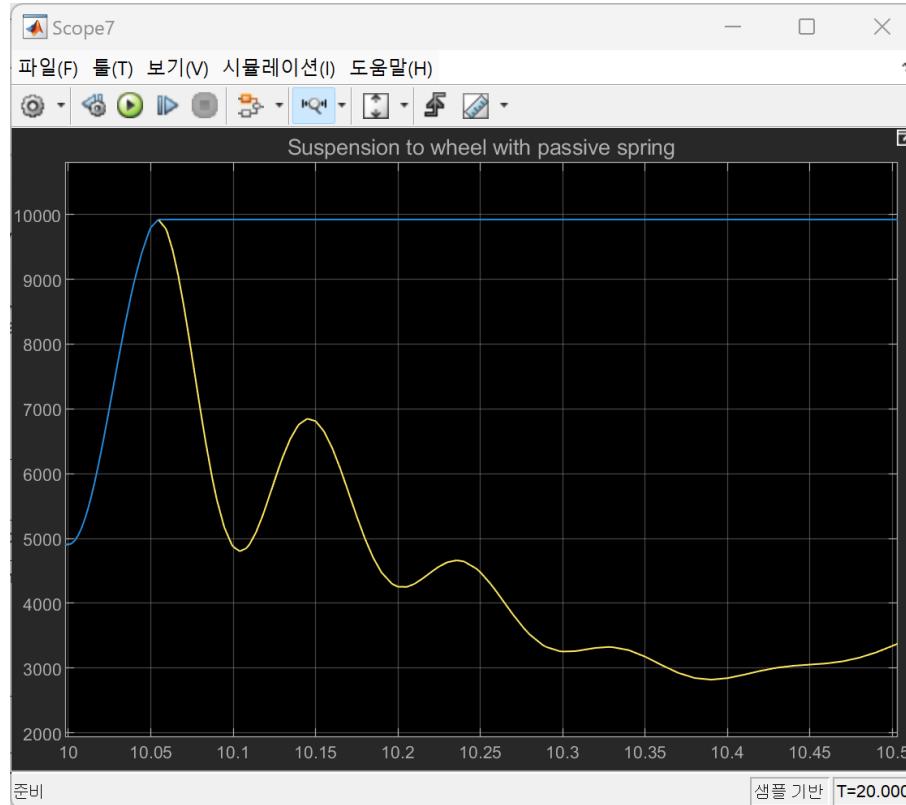
$$m_{body} = 500 \text{ kg}$$



*Air compressor*가 조절 가능한 압력  $\leq 1 \text{ bar/s}$

$0.1 \text{ MPa} \leq P_0 \leq 0.5 \text{ MPa}$

$$k_{air} = k_{dyn} \approx 0.0908 P_0$$

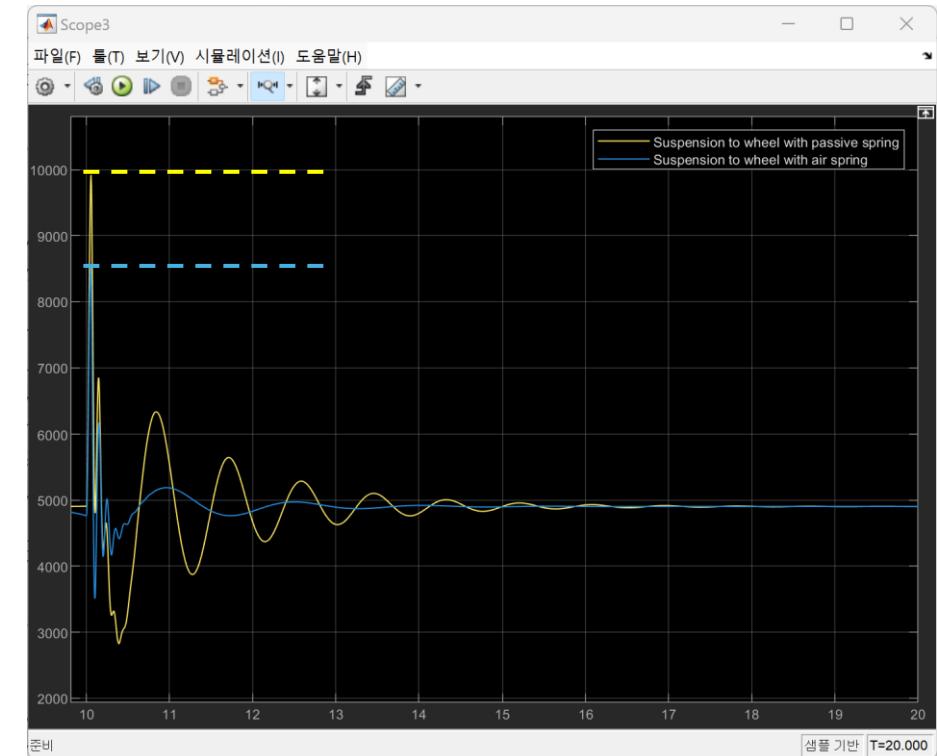
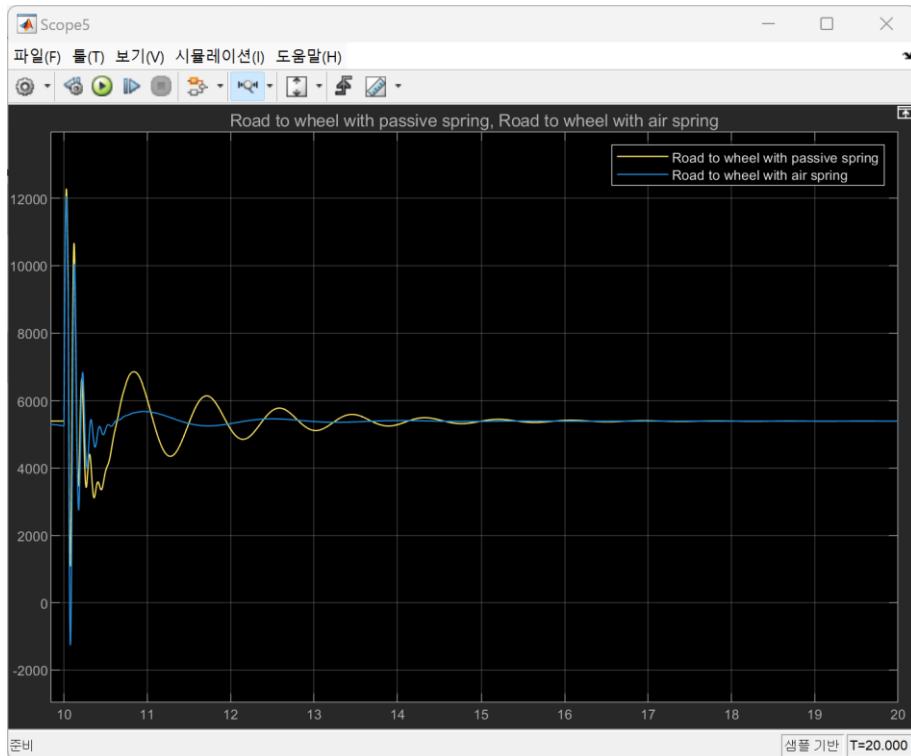


*Air compressor*가 조절 가능한 압력  $\leq 1 \text{ bar/s}$   
Max force에 도달하는데 까지 걸리는 시간 약 0.05초



Feedback 제어 : 에어 스프링의 압력을 충분히 빨 시간이 부족  
☞ Feedforward 제어를 선택

# Simulink



Max force form road to wheel

1.2287e+04

Max force form Suspension to wheel

9.9233e+03

Max Total force

2.2210e+04

0.1

Road Height

1.2070e+04

8.5477e+03

2.0618e+04

# Wheel Modeling

# Wheel modeling

## <S-class wheel spec>

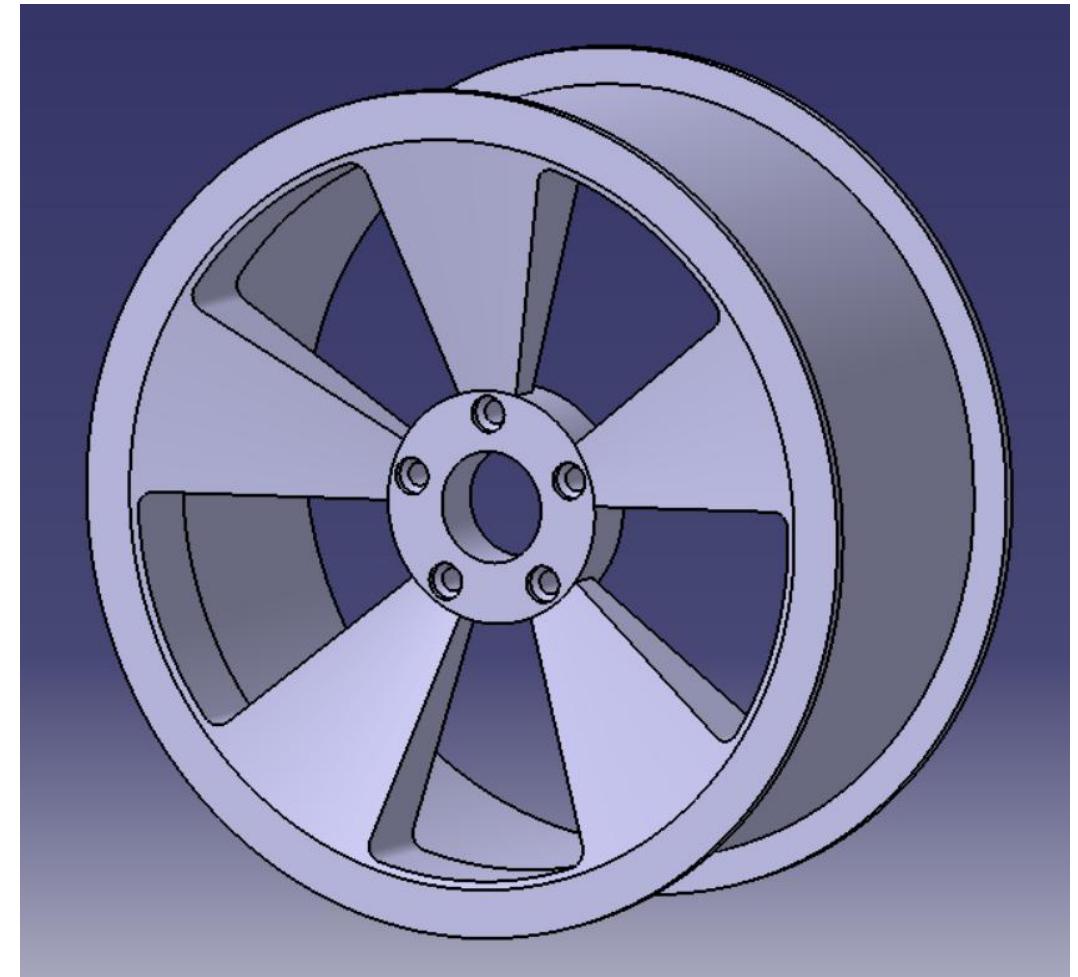
Size: 8.5J×20 ET38

PCD: 5×112

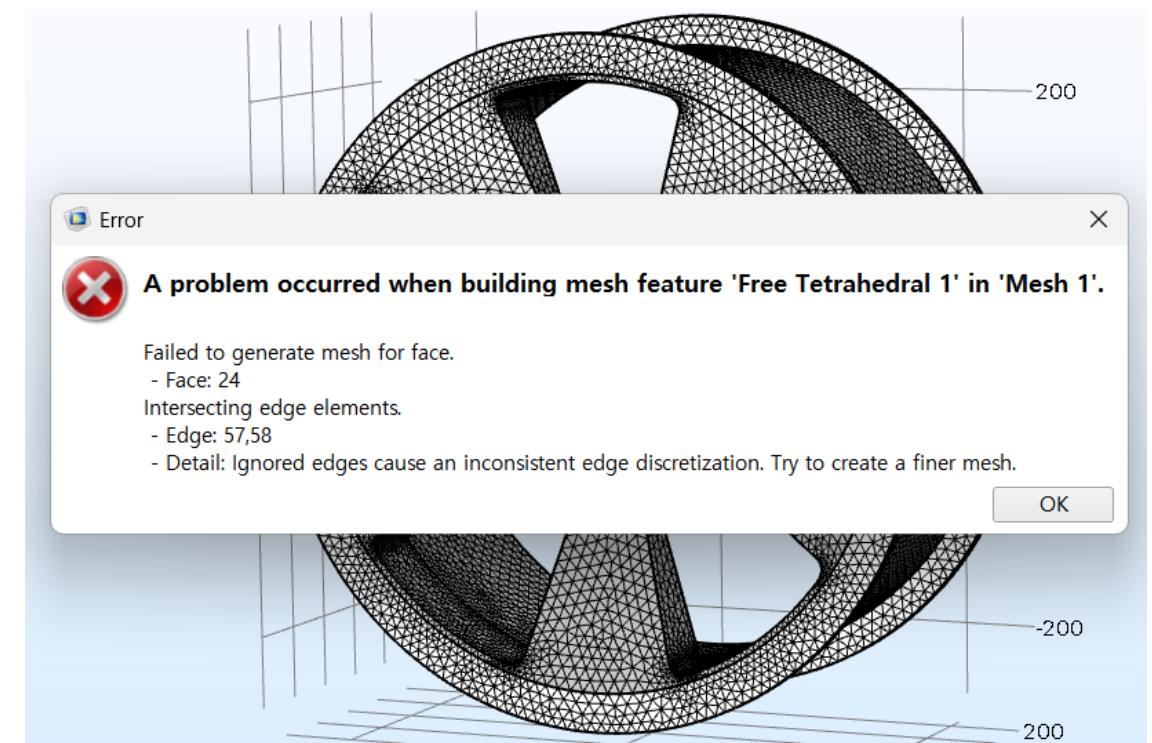
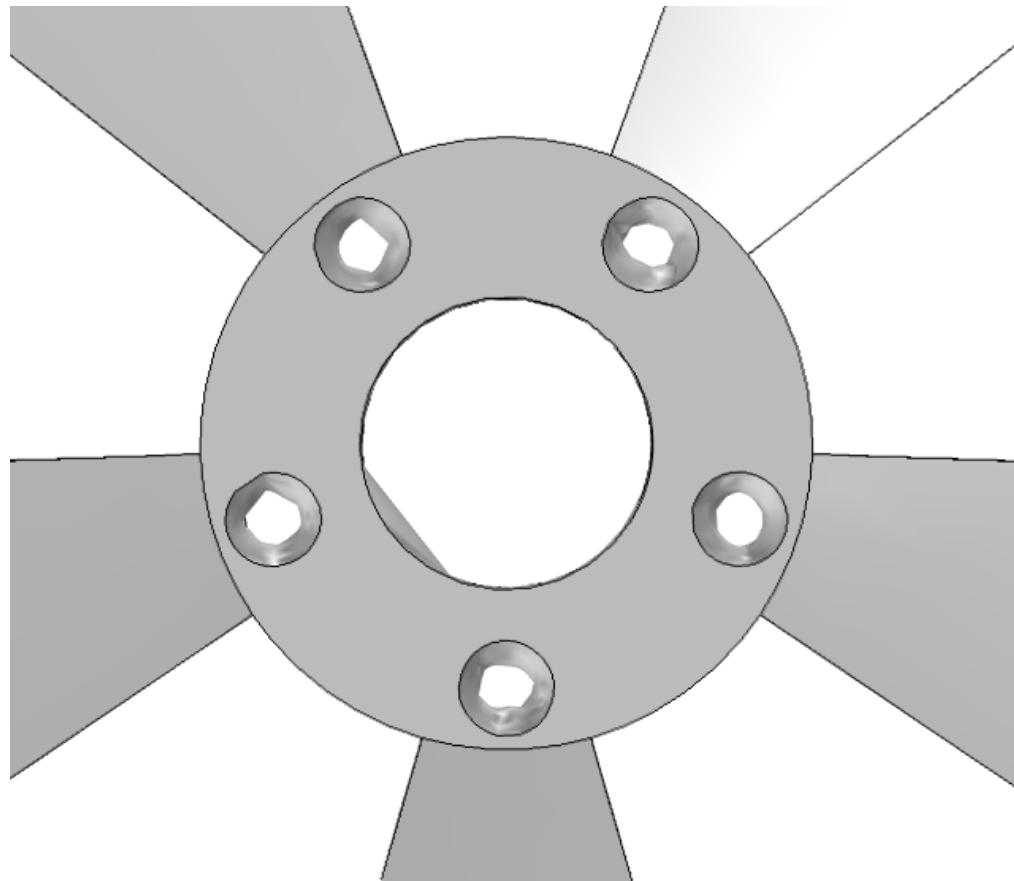
Bolt: M14×1.5

Torque: 150N·m

Material: A356-T6

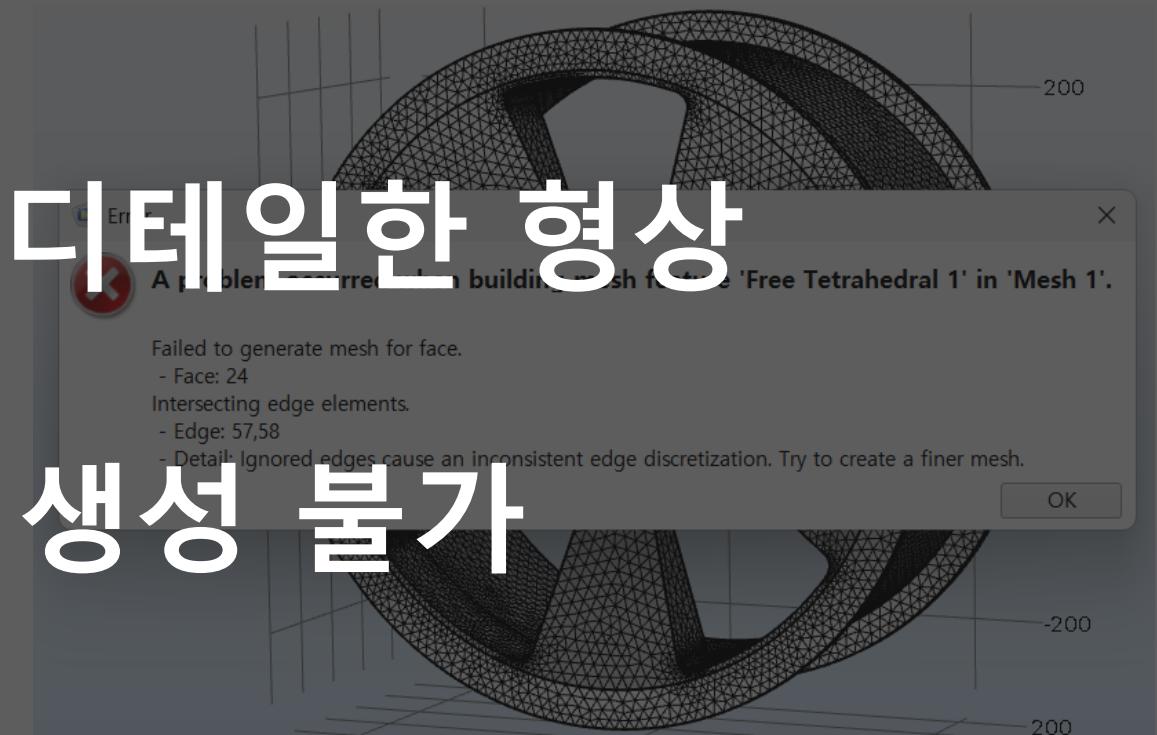


# Wheel modeling

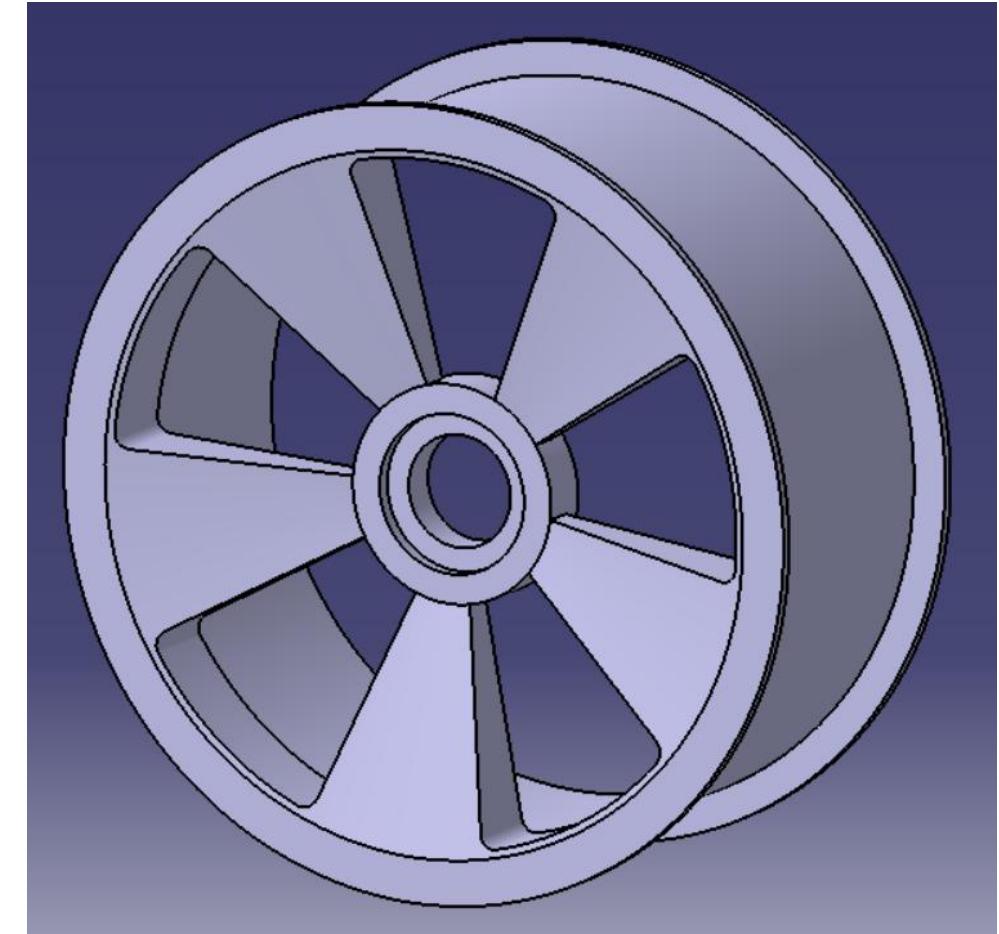




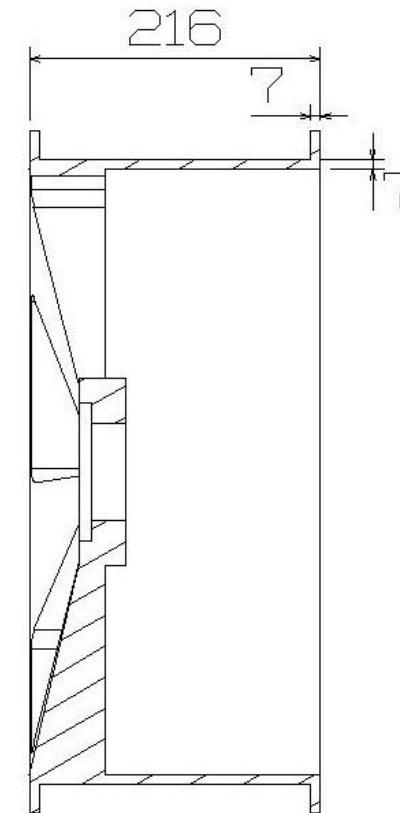
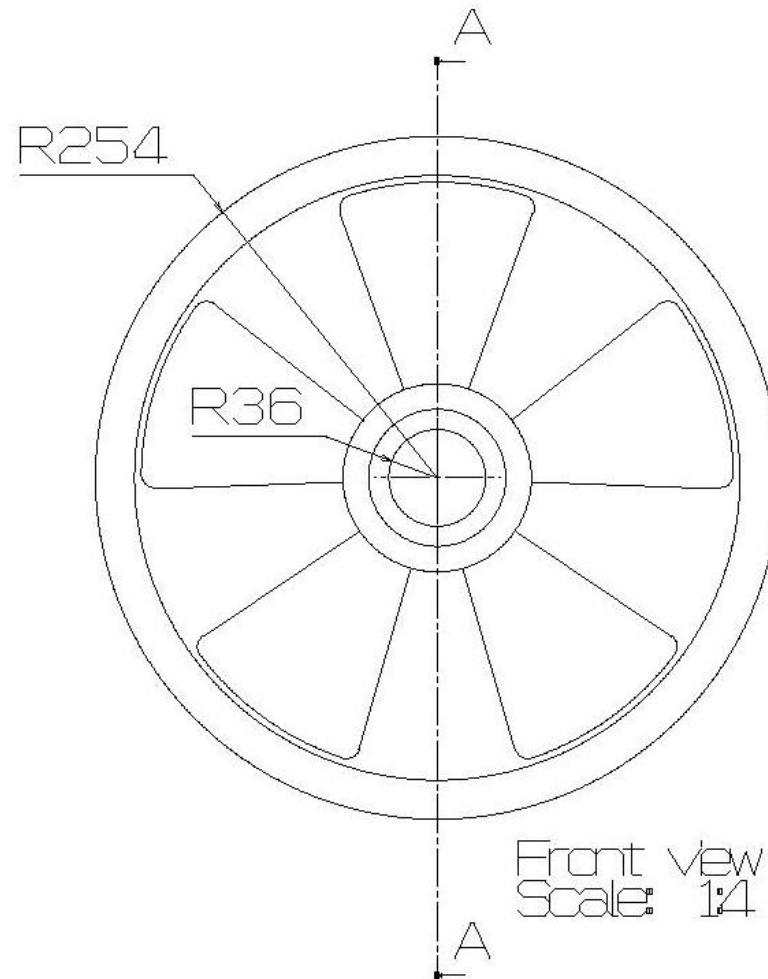
볼트 결합부의 디테일한 형상  
인식, 메쉬 생성 불가



# Wheel modeling



# Wheel modeling



Section view A-A  
Scale: 1:4



Comsol

## <해석 목적>

같은 높이의 단차에 대해 일반 코일 스프링과 가변 에어스프링을 사용한 차량의 훨에 가해지는 압력을 계산



충격 감소 효과 입증 및 각 스프링의 한계 분석

## <Properties of A356-T6>

$E=72.4\text{GPa}$

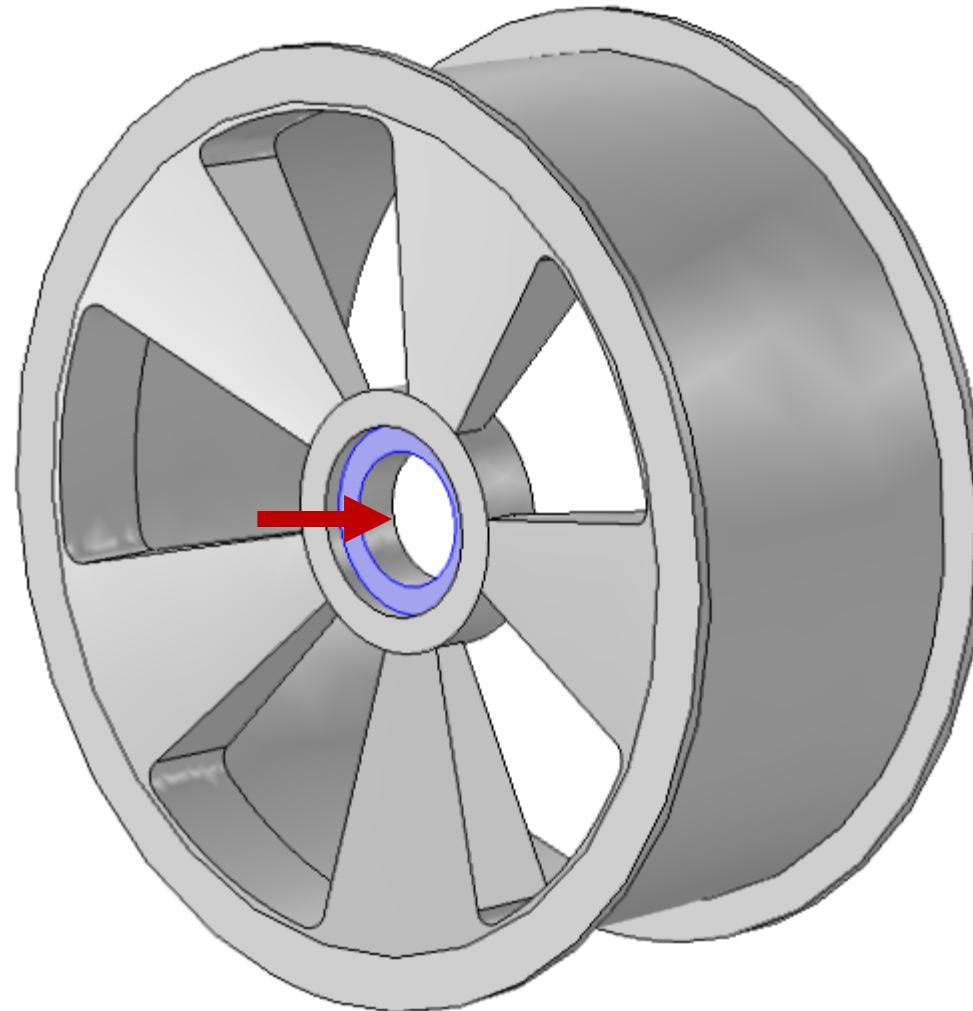
$\nu=0.33$

$\sigma_y=275\text{MPa}$  (항복강도)

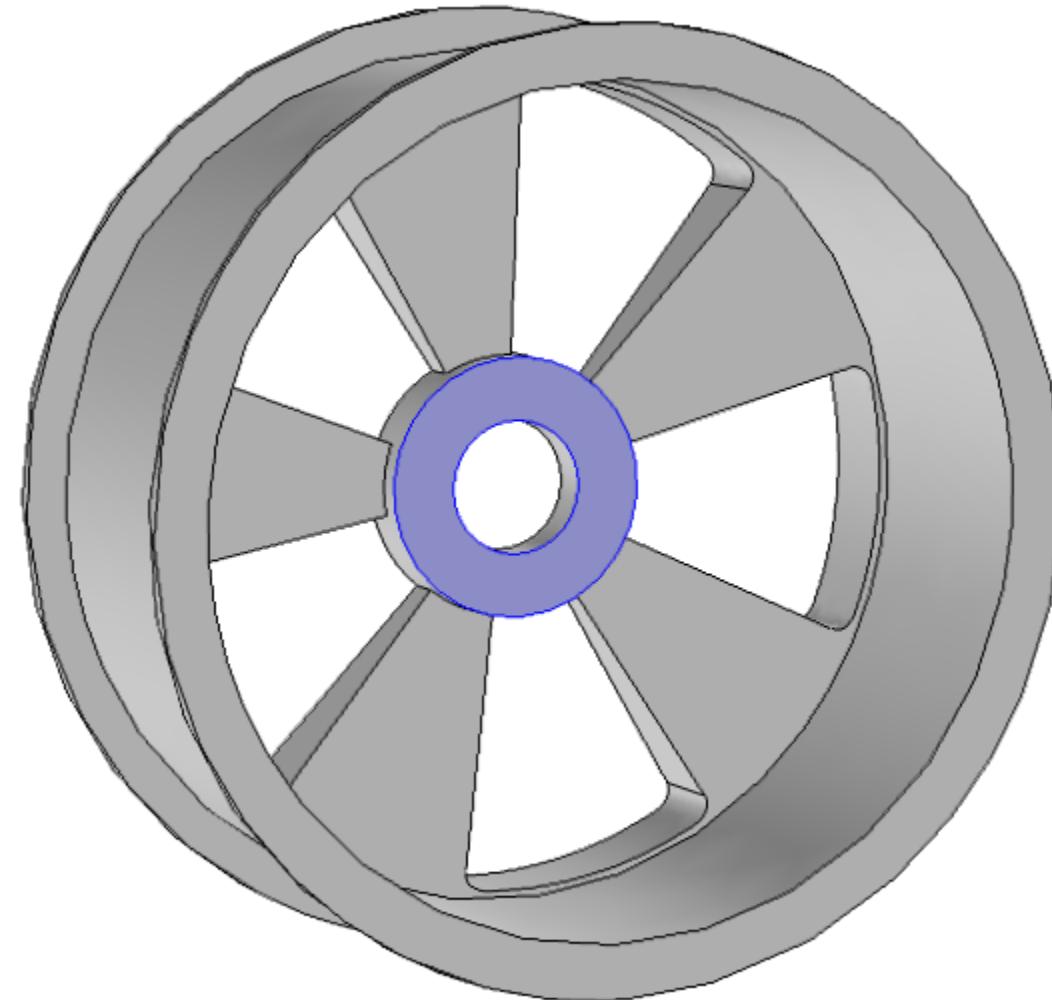
$\sigma_U=310\text{MPa}$

## <Bolt Clamping Force>

$$F = \frac{T}{k \cdot d} = \frac{650}{0.2 \cdot 0.072} \approx 45000\text{N}$$

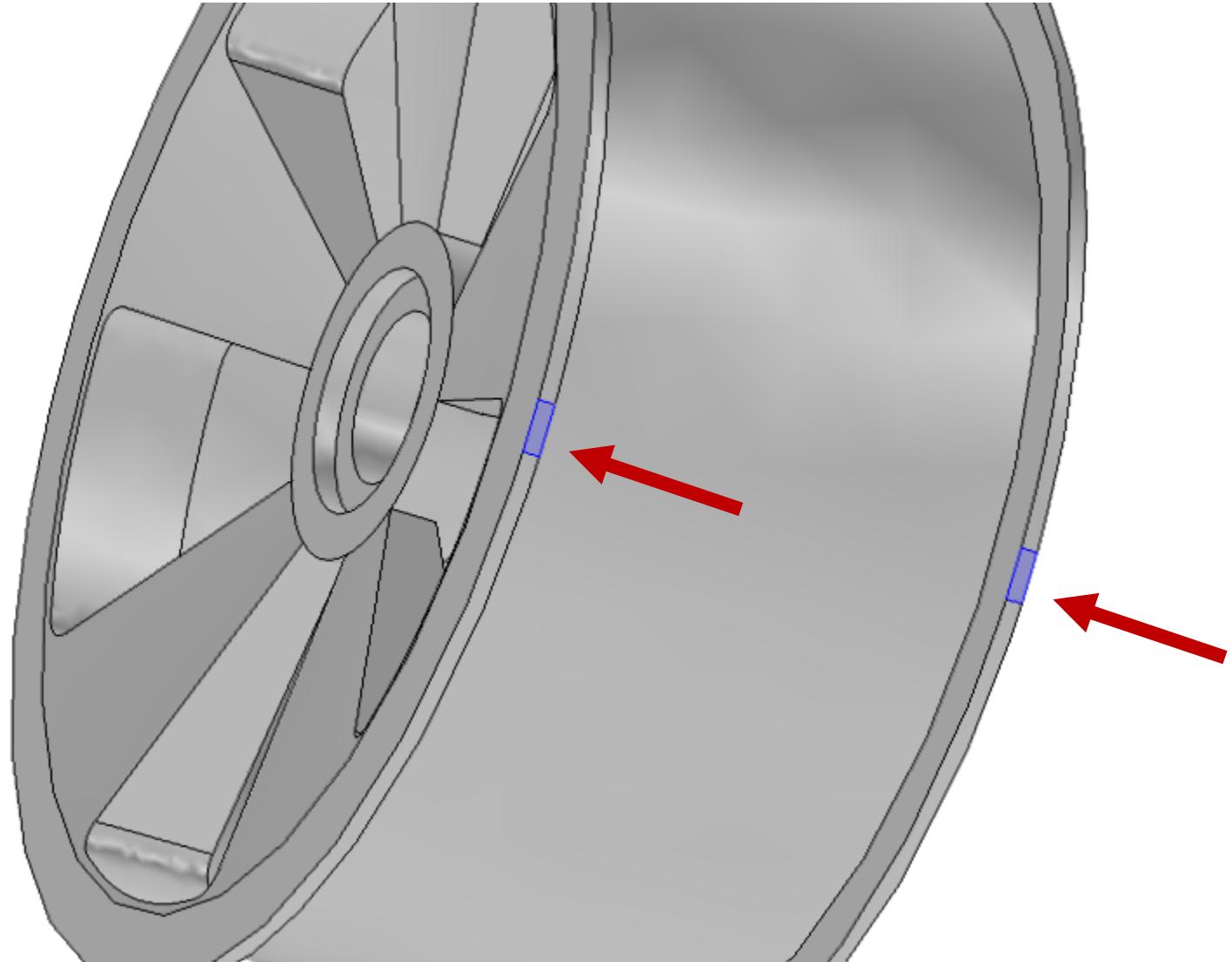


허브 장착면 Fixed



림 테두리에 대해서는 선 하중만  
가할 수 있음☞ 과도한 응력

림을 0.4mm 깎아 면을 만든 후  
Simulink로 계산된 하중을 가함

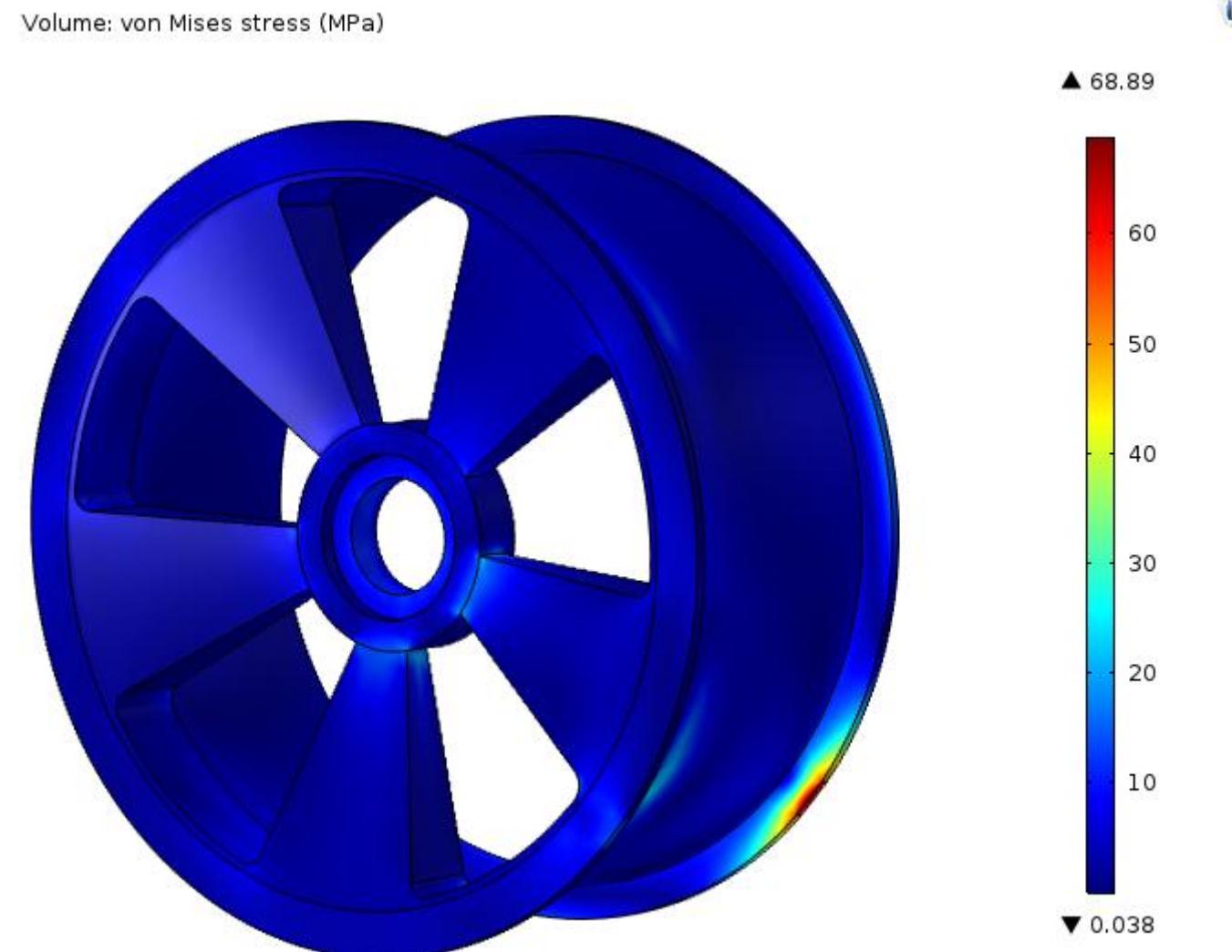


Case1)  $h=0\text{cm}$ , coil spring & air spring

$F=5395\text{N}$

$\sigma_{max}=68.9\text{MPa}$

휠과 차체의 하중만 지지

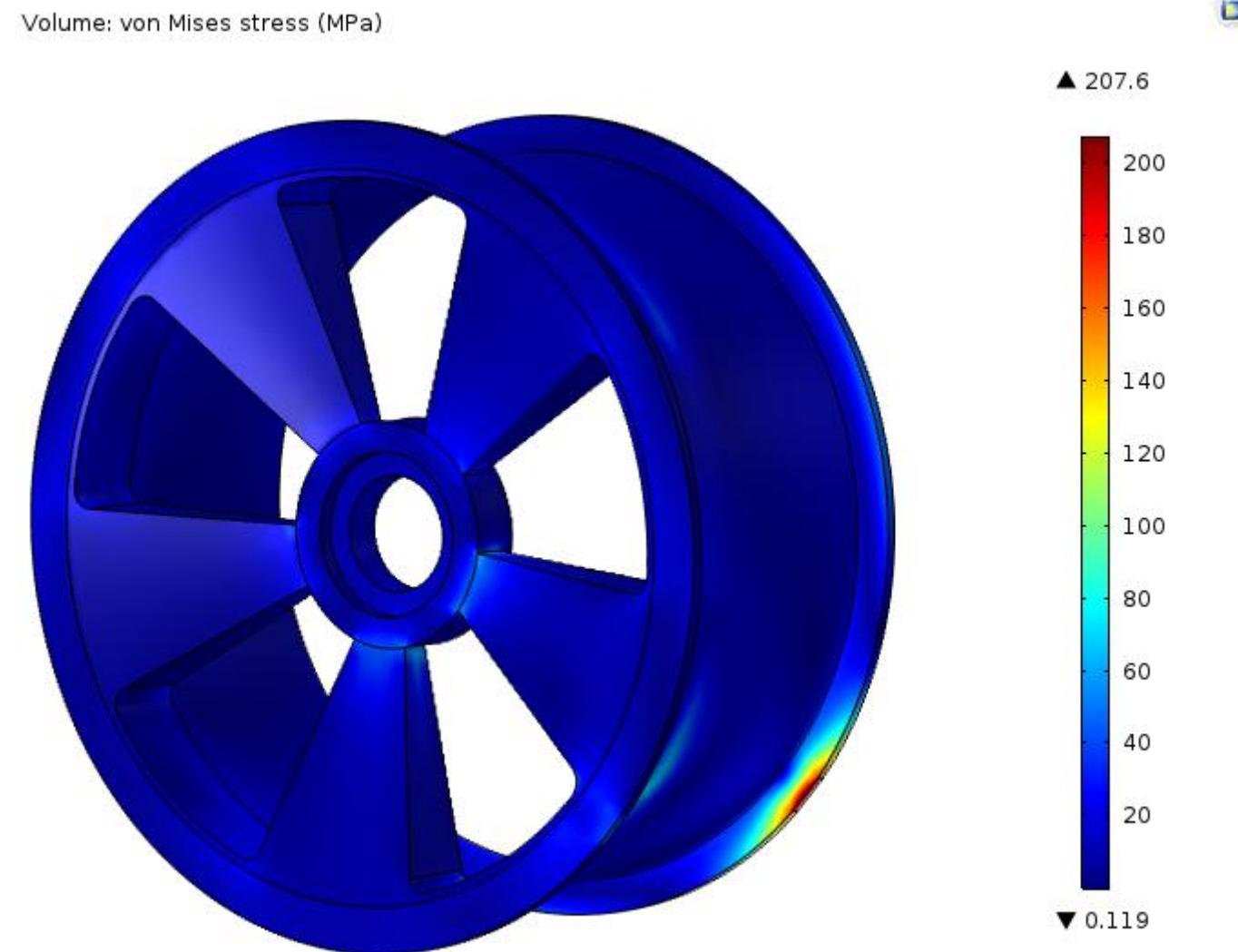


Case2)  $h=5\text{cm}$ , coil spring

$F=16258\text{N}$

$\sigma_{max}=207.6\text{MPa}$

항복강도에 미치지 못함

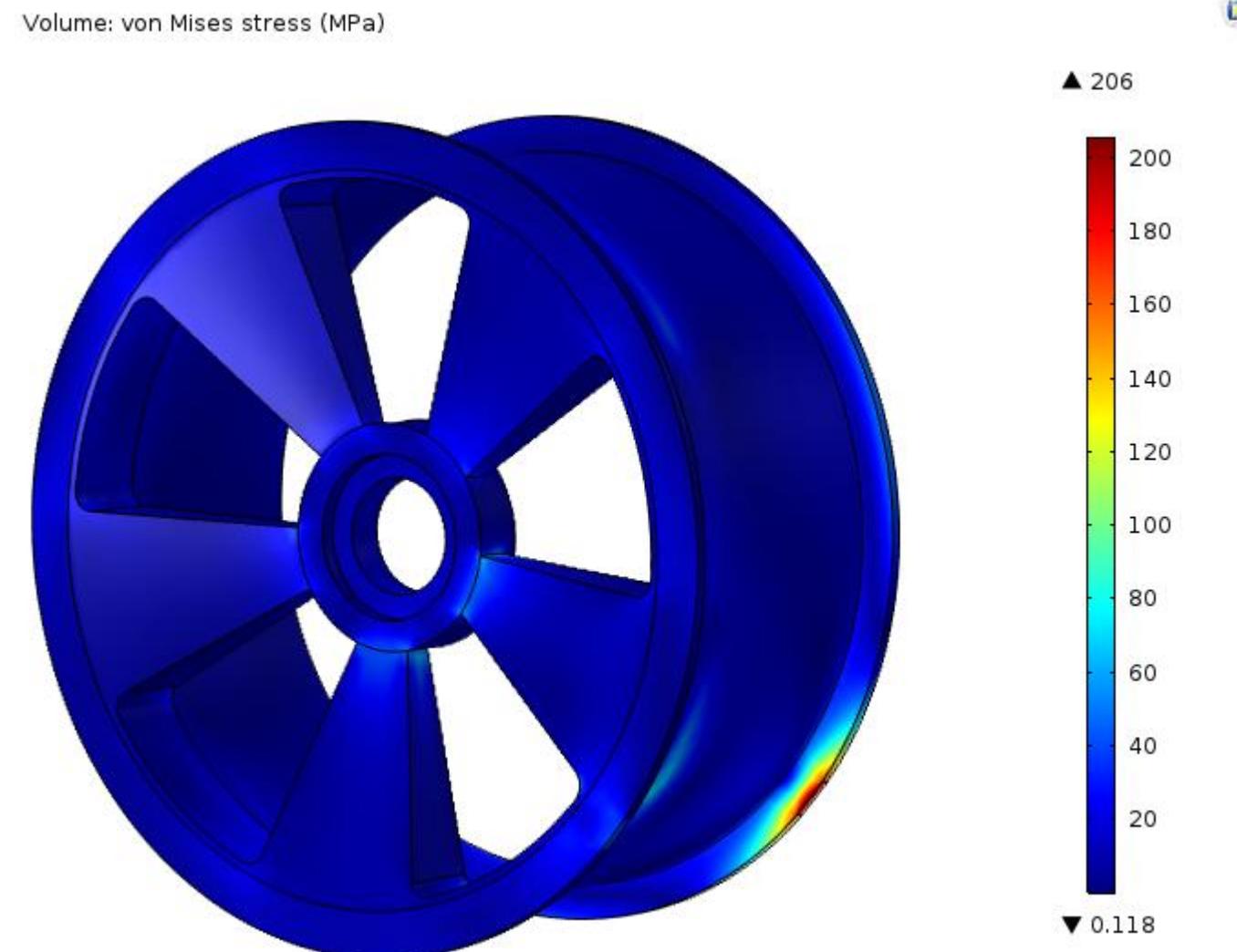


Case3)  $h=5\text{cm}$ , air spring

$F=16130\text{N}$

$\sigma_{max}=206.0\text{MPa}$

항복강도에 미치지 못함



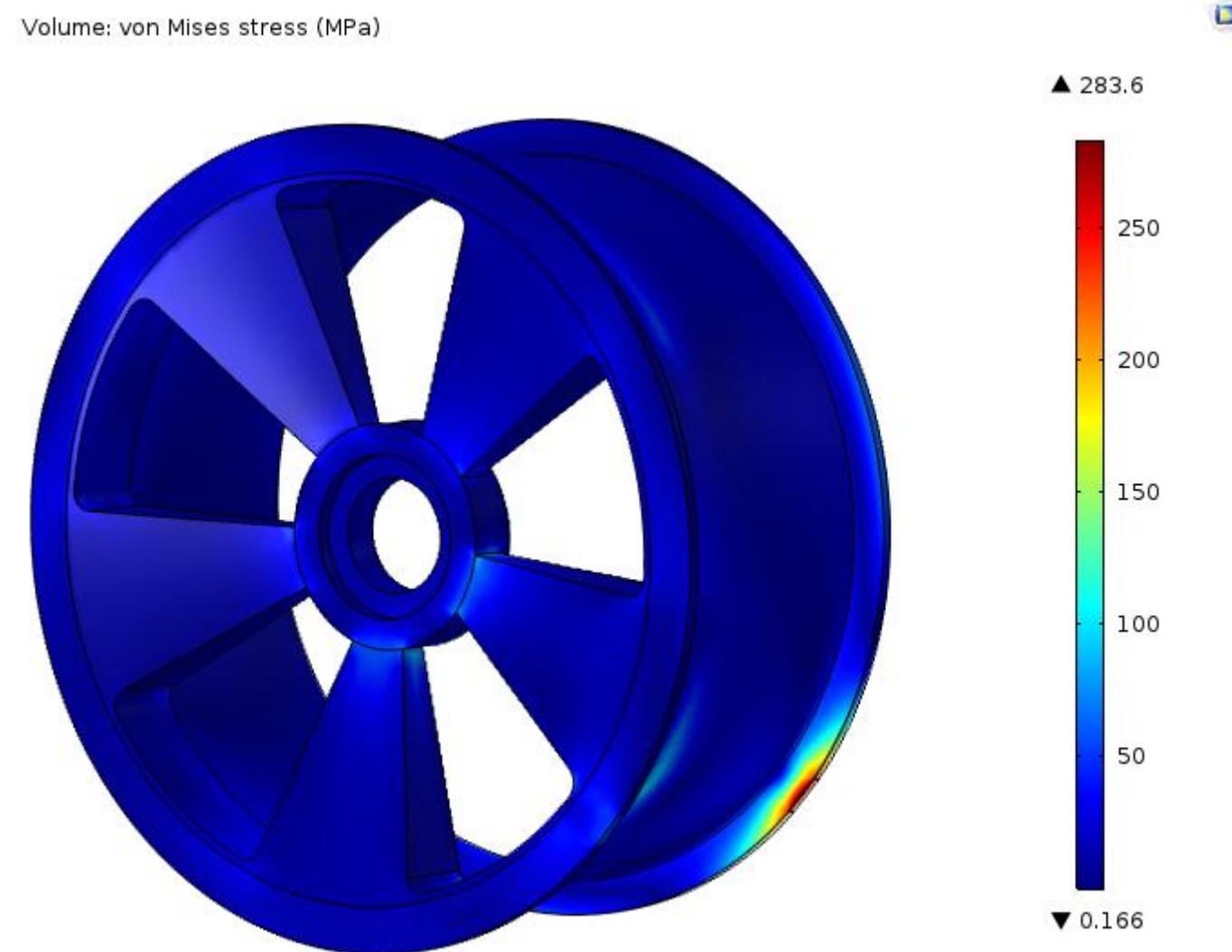
Case4)  $h=10\text{cm}$ , coil spring

$F=22210\text{N}$

$$\sigma_{max}=283.6\text{MPa}$$

항복강도(275MPa) 초과

☞ 영구적인 변형 발생



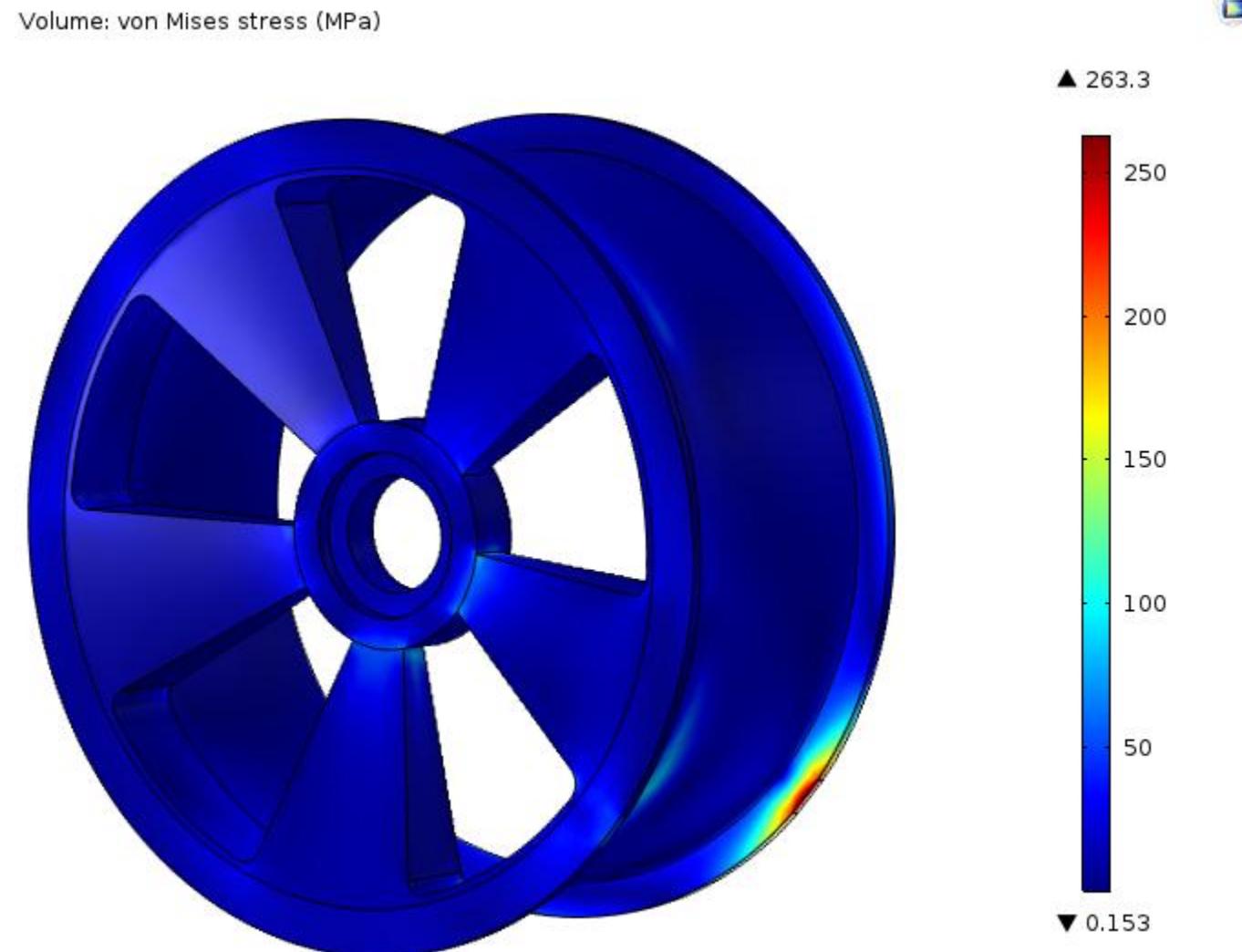
Case5)  $h=10\text{cm}$ , air spring

$F=20618\text{N}$

$\sigma_{max}=263.3\text{MPa}$

항복강도(275MPa) 미만

☞ 에어스프링 효과 입증



## 노면 단차에 따른 최대 압력

최대 압력 [Mpa]

스프링 종류	단차 [cm]	8.0	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0
Coil spring		253.2	268.4	276.0	283.6	291.2	298.8
Air spring		236.2	249.7	256.5	263.3	270.1	276.9

※ 항복강도:  $\sigma_y = 275 \text{ MPa}$

## 마무리 및 고찰

## 마무리

가변형 에어스프링을 모델링하여 훨에 가해지는 충격을 완화하는 효과를 확인

## 고찰

1. 에어 스프링의 비선형적 특성을 COMSOL을 활용하여 해석하고, 이를 Simulink에 적용하여 보다 염밀한 모델을 구현하고 싶었지만, 이에 실패하여 몇가지 가정을 추가한 공식을 통해 에어 스프링을 조절하는 방향으로 바꾸게 됨.
2. 타이어를 통해 분산된 힘이 전달된 상황을 해석하고 싶었으나, 불러온 훨 모델의 림 부분을 원이 아닌 다각형으로 인식하여 면의 간섭 없이 타이어를 추가하는 것을 실패
  - ☞ 해석 결과가 실제 압력보다 높게 계산됐을 것으로 예상됨

## 참고문헌

- <https://www.wheel-size.com/size/mercedes/s-class/w222-2013-2017/>  
(s-class wheel spec sheet)
- DEVELOPMENT OF A MULTIBODY MODEL USED TO STUDY THE IMPACT BETWEEN A VEHICLE WHEEL WITH A POTHOLE (Radu, 2023)
- Rheological behavior, microstructure and hardness of A356 aluminum alloy in semisolid state using backward extrusion process (Rahmani, 2010)
- An Experimental Investigation on the Characteristics of An Automotive Air Spring (J. C. Lee and H. Liu, 2010)
- Modeling and performance analysis of convoluted air springs as a function of the number of bellows (Yiqian Zheng et al., 2021)
- Optimum Evaluation of Reinforcement Cord of Air Spring for the Vehicle Suspension System (Byeongsoo Kim et al., 2011)
- <https://cdl.hanyang.ac.kr/education/aue3028-2024/>

Thank You

Q & A