

# 대한기계학회 주선

## 제13회 전국학생설계경진대회(2023년)

# 설계 최종 보고서

참가부	대학부 ( <input checked="" type="checkbox"/> )				
참가분야	공모주제 ( <input checked="" type="checkbox"/> ) / 자유주제 ( <input type="checkbox"/> )				
참가팀명	에이스건제				
설계제목	메타물질을 활용한 LED탑재 에너지 하베스팅 스마트 과속방지턱				
지도교수/교사	(소속) 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (성명) 박근 (연락처) (이메일)				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	김의현	서울과학기술대학교 기계시스템 디자인공학과			

## 참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	김의현	서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 / 4학년	
2	서진호	서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 / 3학년	
3	진형빈	서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 / 3학년	
4	홍재화	서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 / 4학년	
5			
6			

# 설계 요약문

<b>참가분야</b>	공모주제 ( <input checked="" type="checkbox"/> ) / 자유주제 ( <input type="checkbox"/> )
<b>참가팀명</b>	에이스견제
<b>설계제목</b>	메타물질을 활용한 LED탑재 에너지 하베스팅 스마트 과속방지턱
<b>대표자명</b>	김의현
<b>요약문</b>	<p>1) 설계배경 오늘날 도로에서의 안전을 위해 설치된 과속방지턱에 대해 여러 문제점이 제기되고 있다. 이에 기존 과속방지턱의 여러 문제점들을 보완하고, 에너지 하베스팅 기술을 접목시킨 스마트 과속방지턱의 개발을 목적으로 한다.</p> <p>2) 설계내용 차량의 주행 속도에 따라 과속방지턱의 변형 거동을 달리 하기 위해서 메타물질을 제작하였다. 차량이 지나가면서 생기는 바퀴와 과속방지턱 사이의 충돌 에너지를 메타물질의 변형에너지로 변환하도록 설계하여 감속 효과를 주고, 속도에 따른 변형의 차이를 만들어 각기 다른 충격을 주도록 하였다. 과속방지턱의 상하로 움직이는 거동을 이용하는 에너지 하베스팅 기술을 접목시켰고, 이렇게 발생한 전력을 이용하는 LED장치를 통해 야간 주행 시 과속방지턱의 식별이 용이하도록 설계하였다.</p> <p>3) 설계결과 본 과제에서는 탄성재료인 TPU(themoplastic polyurethane)를 사용하여 메타물질을 설계하였고, 재료적, 구조적 특성을 이용해 차량의 바퀴가 방지턱에 충돌할 때 발생하는 에너지를 변형에너지로 전환하며 감속효과를 주고 메타물질이 압축하며 정속으로 주행하는 차량의 흔들림을 최소화 하고 에너지하베스팅 메커니즘을 적용하였다. 메타물질의 설계안은 크게 4가지로 각각의 매개변수들을 조정하여 결과를 실험과 충돌 해석을 통해 비교하여 최적의 메타물질을 설계하였다.</p> <p>4) 기대효과 도심 속 같이 사람들의 유동이 많은 곳에서도 발전이 가능하다. 차량이 방지턱을 지나가는 동안 방지턱이 받는 에너지를 이용한다. 즉, 버려지는 에너지를 통해 전력을 생산하기에 친환경적인 발전이 가능하다. 이렇게 버려진 에너지를 야간에 LED를 켜므로써 야간 주행 사고를 예방할 수 있다. 또한 정속주행을 하더라도 발생하던 서스펜션의 파손이나 탑승자의 부상 등 여러 문제점들을 해결할 수 있다.</p>
<b>설계프로젝트의 입상 이력</b>	해당 사항 없음

# 메타물질을 활용한 LED탑재 에너지 하베스팅 스마트 과속방지턱

김의현\* · 서진호\* · 진형빈\* · 홍재화\* · 박근\*\*

\*서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

## LED mounted energy harvesting smart speed bump using metamaterial

Euihyun Kim\*, Jinho Seo\*, Hyungbin Jin\*, Jaehwa Hong\*, and Keun Park\*\*

\* Department of Mechanical System Engineering and Designing, Seoul National University of Science and Technology

---

**Key Words:** Energy Harvesting(에너지 하베스팅), Metamaterial(메타 물질), Smart Speed Bump(스마트 과속 방지턱), Strain Energy(변형에너지)

**초록:** 본 설계는 기존에 제기되는 문제점들을 보완하고자, 속도에 따라 동적 거동을 달리 하도록 구조적으로 구현한 메타물질을 설계하고, 이를 바탕으로 한 스마트 과속방지턱의 제작을 목표로 한다. 이를 통해 차량의 감속효과를 얻고, 서스펜션의 부담을 줄이며, 정속으로 과속방지턱을 지나갈 때도 탑승자가 느끼던 불편함을 완화해주고자 한다. 또한 과속방지턱의 변형을 이용한 에너지 하베스팅 기술을 통해 버려지는 에너지를 전기 에너지로 수확하는 시스템을 제작한다. 이렇게 얻은 전기 에너지는 방지턱에 설치한 LED장치에 사용하여 야간 주행 시에도 방지턱의 식별이 용이하게 한다.

**Abstract:** This design aims to produce a smart speed bump using metamaterials that structurally implement dynamic behavior that varies depending on speed in order to complement existing problems. Through this, we aim to decelerate the car, reduce the burden on the suspension, and alleviate the discomfort by passengers when passing speed bumps at constant speed. Also, manufacture system that harvests wasted energy into electrical energy through energy harvesting technology using the deformation of speed bumps. This is used for the LED device installed on the bump, making it easy to identify the bump when driving at night.

---

## 1. 서론

과속방지턱은 일정 도로 구간에서 통행 차량의 과속 주행을 방지하고, 일정 지역에 통과 차량의 진입을 억제하기 위해 설치하는 시설을 말한다. 실제로 미국에서 보행자 사망사고율이 가장 높은 오클랜드시의 경우 1600개의 과속방지턱을 설치한 이후 교통사고로 인한 어린이 사상율이 15%나 줄어든 것으로 집계되었다. 이러한 필수적인 역할을 하는 과속방지턱이 점차 증가함에 따라 부정적인 측면을 비판하는 의견들도 제기되었다. “도색이 벗겨져 잘 보이지 않았다.”, “과속방지턱을 넘다가 천장에 머리를 부딪혀 뇌진탕 치료를 받았다.” 등 여러 부정적인 의견들이 있었다. Fig. 1. (a)를 통해 통계 자료를 확인할 수

있다. 또한 과속방지턱을 지나갈 때 차의 충격을 흡수해주는 서스펜션에 큰 영향을 미쳐 Fig. 1. (b)와 같이 쇼크업소버를 망가지게 하는 상황도 빈번하게 발생했다. 과속방지턱에 문제가 있다고 생각하는 비율이 높아짐에 따라 과속방지턱을 개선해야 한다는 목소리가 높아지고 있다.<sup>(6)</sup>

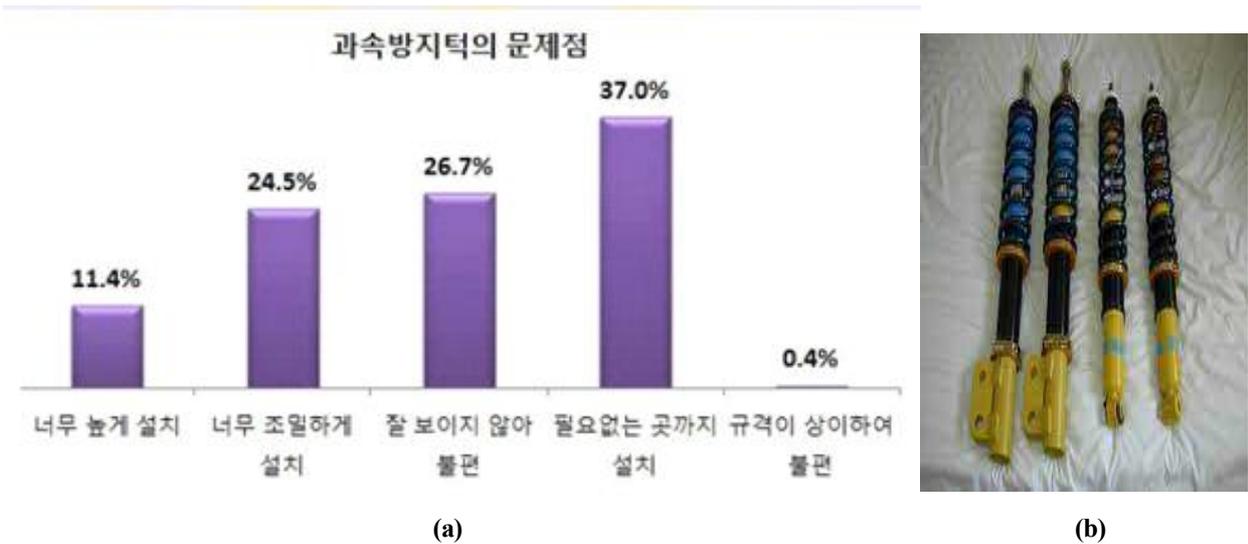


Fig. 1 (a) Result of investigation of problems with speed bumps (b) The picture of shock absorber

본 설계는 이러한 문제점들을 개선할 수 있는 스마트 과속방지턱의 제작을 목표로 한다. 정속 주행을 하는 차량들은 불편함을 느끼지 않도록 차량이 지나감에 따라 내려가는 과속방지턱을 설계하고자 한다. 또한 방지턱의 변형을 이용한 에너지 하베스팅 구조를 설계함으로써 차량이 방지턱을 넘어갈 때 발생한 버려지는 에너지를 활용한 친환경적인 에너지 발전 방식을 만들고자 한다. 이렇게 생산한 전기를 방지턱에 탑재된 LED에 사용함으로써 야간이나 도색의 벗겨짐 등의 이유로 잘 보이지 않던 단점 또한 보완이 가능하다.

## 2. 설계 핵심 내용

### 2.1 설계 문제 정의 및 해결방안

최근 과속방지턱의 부정적인 측면으로 인한 불만들이 점차 증가하고 있다. 본 설계는 기존의 과속방지턱이 속도에 관계없이 그 형태를 유지함에 따라 차량의 탑승자들이 느끼던 불편함을 줄이고자 한다. 따라서 차량의 속도에 따라 변형 거동을 달리 하는 방지턱을 설계하였다. 과속주행 중인 차량의 경우에는 방지턱이 형태를 유지하고, 정속주행 중인 차량은 불쾌감을 느끼지 않고 지나갈 수 있도록 방지턱이 아래로 거동하여 평지처럼 지나갈 수 있게 하는 장치의 설계가 필요하다. 따라서 방지턱에 가해지는 충격에너지를 기준으로 변형이 달라지는 메타물질의 개발을 해결방안으로 제안한다.

### 2.2 선행 연구 및 특허 분석

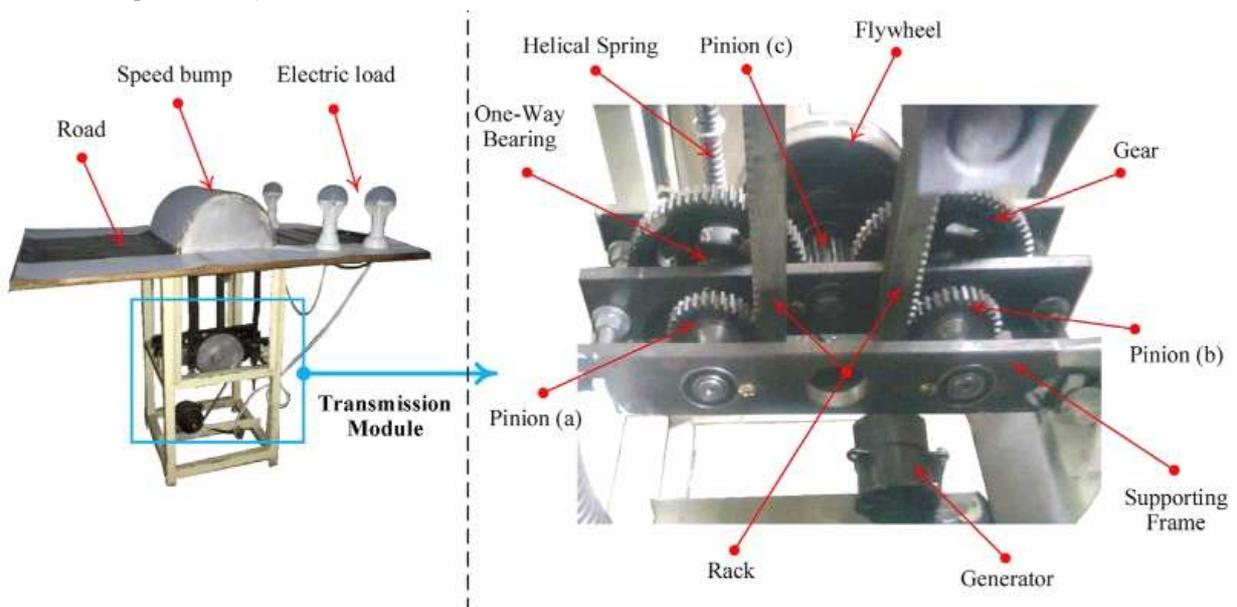
#### 2.2.1 비뉴턴 유체를 활용한 과속방지턱 연구 - Badennova speed bump



**Fig. 2** Badenova speed bump's different forms depending on speed (a) low speed, (b) high speed

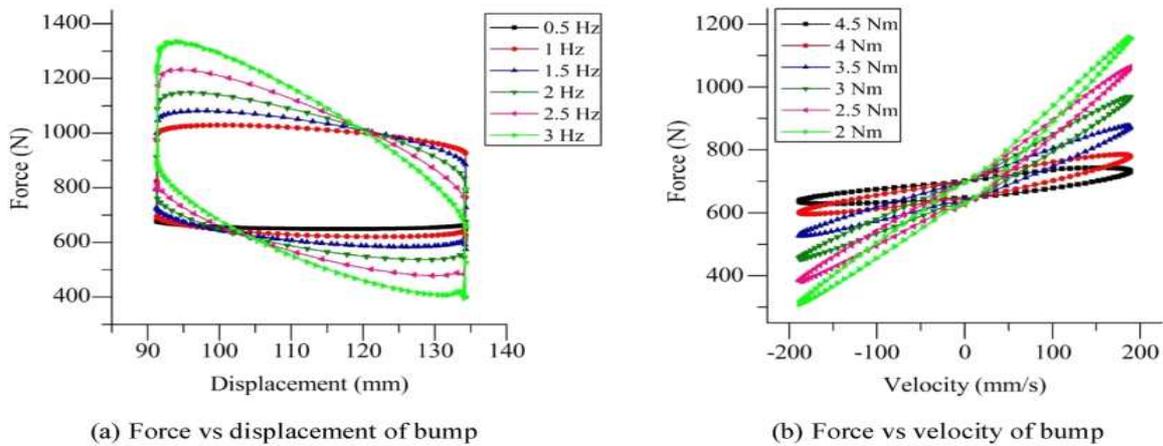
위 Fig. 2를 통해 볼 수 있듯, Badenova speed bump는 충격이 적을 때에는 액체 상태를 유지하고, 충격이 클 때에는 단단한 고체로 변하는 성질을 이용하는 과속방지턱이다. 비뉴턴 유체는 전단응력과 변형 속도가 비례 관계를 갖지 않기 때문에, 차량이 적정 속도로 달리는 경우 타이어의 좌우로 흘러버리는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 바탕으로, Badenova speed bump는 방지턱을 콘크리트로 제작하지 않고 내부를 비뉴턴 유체로 채워 제작하였다.<sup>(2)</sup>

**2.2.2 진동 에너지를 활용한 전자기형 에너지 하베스팅 과속방지턱 연구** - Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump- based mechanical energy harvester (MEH) for application on road (Ali Azam, Ammar Ahmed, Nasir Hayat, Shoukat Ali, Abdul Shakoor Khan, Ghulam Murtaza, Touqeer Aslam)



**Fig. 3** Fabrication and inner layout of the MEH prototype

위 Fig. 3은 선행연구의 prototype의 모습이다. 압전 에너지 하베스팅 구조를 가진 많은 선행 연구들과 달리, 랙과 피니언을 활용한 진동에너지 하베스팅의 구조를 가진다. 내부를 보면 과속방지턱과 연결된 Rack이 Pinion과 상호작용함을 알 수 있다. Rack이 아래로 이동하게 되면, Pinion(a)와 Pinion(b)가 각각 반시계방향, 시계방향으로 회전하게 되고, Gear(b)가 맞물리게 되고, 이 때 Gear(a)는 공회전한다.



**Fig. 4** (a) Force acting on the bump vs displacement of the rack (b) Force acting on the bump vs linear velocity of the rack.

위 Fig. 4은 각각 과속방지턱에 가해진 힘과 랙의 변위 차의 관계, 과속방지턱에 가해진 힘과 랙의 속도의 관계를 나타낸 그래프이다. 한 고리의 내부에 해당하는 면적은 한 사이클 동안 과속방지턱이 받은 기계적 일에 해당한다.<sup>(1)</sup> 이러한 선행 연구를 바탕으로 본 연구에서도 상하방향 거동을 이용하는 에너지 하베스팅 구조를 설계하고자 한다.

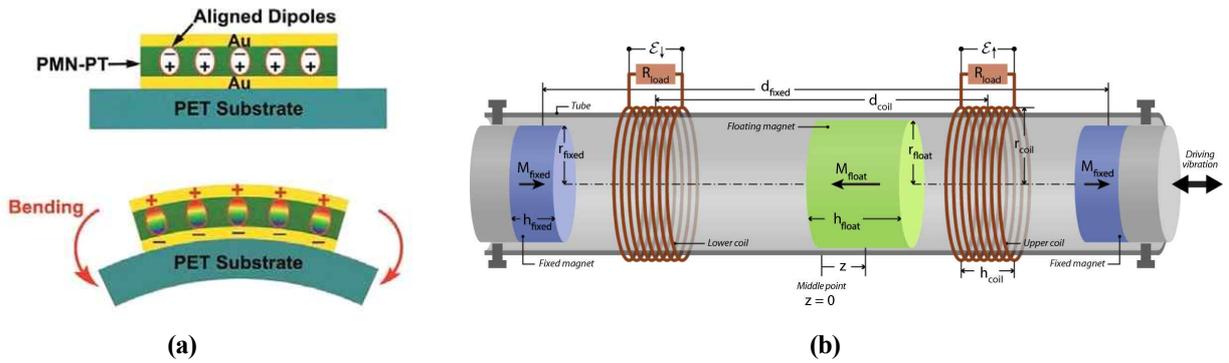
### 2.2.3 본 연구의 차별성 및 기대효과

- 기계적 메타 물질의 설계로 가지게 되는 차별성

다른 물질을 활용하여 과속방지턱의 변형을 만들어내는 선행 연구들과는 달리 구조적으로 속도에 따라 다른 동적 거동을 가지는 기계적 메타물질을 설계 및 활용한다. 메타물질은 다양한 형태의 미세 격자구조를 적용하여 차량의 통과 속도에 따라 변형 특성이 변화하면서도 방지턱의 각 부분들의 형태는 변화하지 않는 구조를 갖도록 설계하였고, 결과적으로 과속방지턱의 상하 운동을 활용한 전자기형 에너지 하베스팅이 가능하도록 설계하였다.<sup>(4)</sup>

- 전자기형 에너지 하베스팅

에너지 하베스팅을 접목시킨 사례들을 보았을 때 대부분 Fig. 5. (a)와 같이 압전 에너지 하베스팅을 활용한 구조를 가진다. 압전 에너지 하베스팅은 외부의 기계적 에너지를 압전 재료에 전달하고 전달된 기계적 에너지를 압전 재료를 이용하여 전기에너지로 변환, 축전하는 원리를 가진다. 미세한 진동만 있어도 전환이 가능하고, 구조적으로 간단하다는 장점이 있다. 하지만 과속방지턱과 같이 큰 사물에 있어서는 고유 진동수의 조정에서 어려움을 겪는다는 단점이 있다. 이러한 단점을 상쇄하기 위해 Fig. 5. (b)와 같이 큰 사물에 있어도 적용이 가능한 전자기형 에너지 하베스팅 기술을 접목시켰다.



**Fig. 5** (a) The principle of Piezoelectric Energy Harvesting (b) The principle of Electromagnetic Energy Harvesting

### 2.3 해석 데이터

과속방지턱에 바퀴가 닿는 순간 차량이 과속방지턱에 가하는 힘을 알아보고자 한다.<sup>(3)</sup> 전체적인 모습은 Fig. 6과 같다.

$v_0$  : 충돌 전 차량의 속도,  $v$  : 충돌 후 차량의 속도,  $m$  : 차량의 질량/2,  $\Delta t$  : 충돌 시간

$F$  : 바퀴가 방지턱에 작용하는 힘

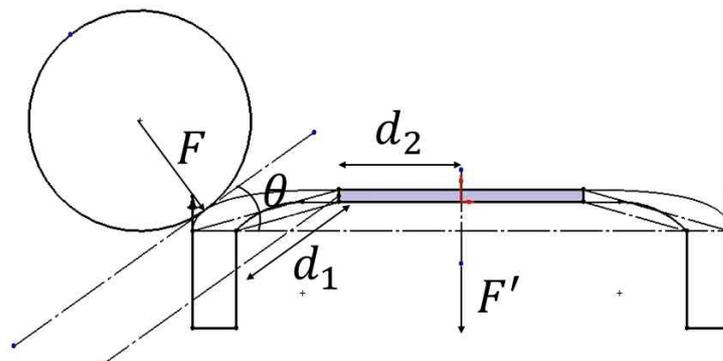
$F'$  : 방지턱의 회전운동을 억제하는 반발력

$\theta$  : 바퀴와 과속방지턱 사이의 접선과 지면이 이루는 각

운동량과 충격량에 관한 식을 통해 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$m(v_0 - v \cos \theta) = F \sin \theta \Delta t$$

$$F = \frac{m(v_0 - v \cos \theta)}{\sin \theta \Delta t} \dots (1)$$



**Fig. 6** The model diagram of the speed bump design

Torque는 0이 되어야 하므로 다음과 같은 결과를 알 수 있다.

$$|Fd_1| = |F'd_2| \dots (2)$$

실측값들을 통해 다음과 같은 값들을 얻을 수 있다.

$$\theta = 35.69^\circ, d_1 = 28.926\text{mm}, d_2 = 30\text{mm}$$

따라서, 주어진 값들을 (1)식과 (2)식에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$F = \frac{m(v_0 - 0.812v)}{0.583\Delta t}, F\sin\theta = \frac{m(v_0 - 0.812v)}{\Delta t} \quad \dots (3)$$

$$F' = F \times \frac{d_1}{d_2} = \frac{m(v_0 - 0.812v)}{0.583\Delta t} \times \frac{28.926}{30} = 1.654 \times \frac{m(v_0 - 0.812v)}{\Delta t}$$

종합하면,  $\Delta t$ 동안 유닛셀이 부착된 윗판에는 지면에 수직인 아랫방향으로  $F'$ 이 작용하고, 지면에 평행한 방향으로  $F\sin\theta$ 가 작용함을 알 수 있다.

#### 2.4 메타 물질 및 전체 구조 설계

먼저, 차량의 과속과 정속에서 각각 다른 거동을 보이는 메타물질의 설계를 위해서는 과속과 정속에서의 방지턱의 움직임 변화에 주목할 필요가 있다.

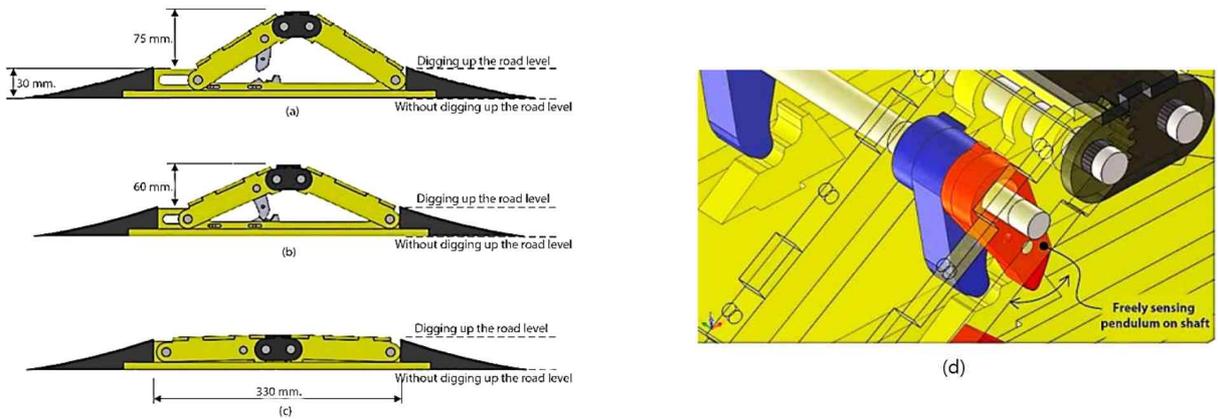


Fig. 7 (a) Initial position (b) Locking position (c) Fold-flat position (d) Sensing mechanism

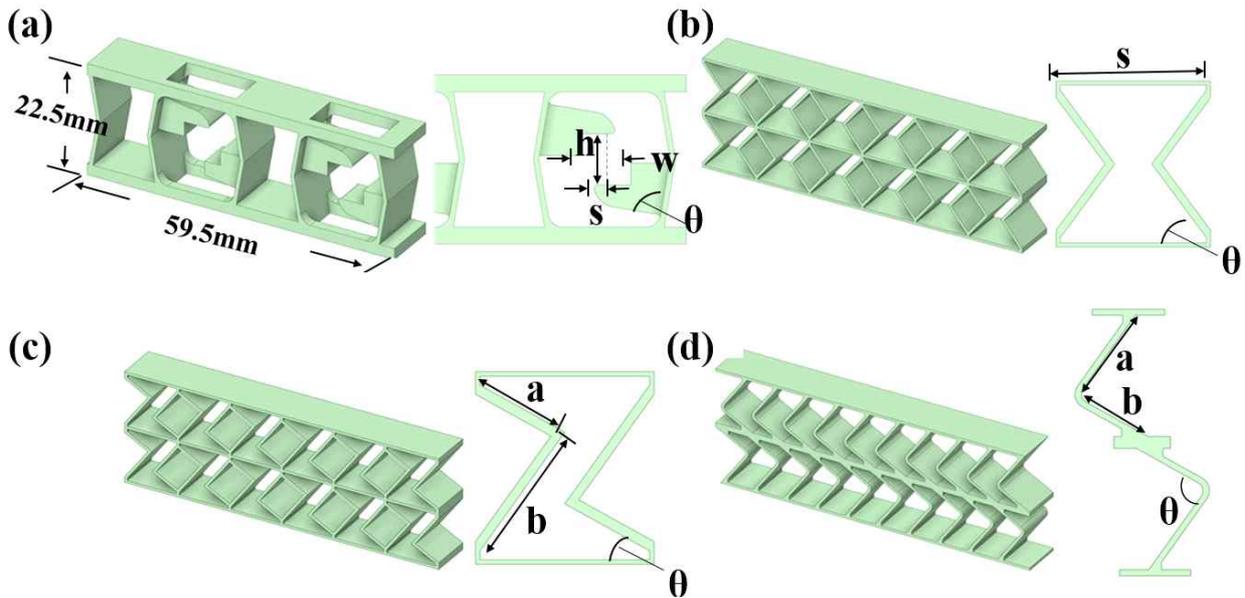


Fig. 8 Principle of Seat Belt Locking

우리는 속도를 판별할 기준으로 4가지를 제시했다. 1. 관성에 의한 LOCK 장치, 2. 원심력을 이용한 Lock장치, 3. 바퀴와 방지턱 사이의 힘 벡터 차이, 4. 충돌시간 차이가 있다. 1번은 Fig. 7의 (d) 와 같이 관성차이를 통해 속도 차이를 감지하여 정속일 때는 (c)와 같이 잠금장치에 걸리지 않고 평평해지고, 과속일 때는 (b)처럼 잠금장치에 걸려 방지턱의 형태를 유지하는 원리이다.<sup>(5)</sup> 2번은 Fig. 8과 같이 안전벨트의 잠금장치에서 영감을 얻었다. 과속일 때 스프링에 결합되어 있는 Weighted Lever가 스프링 탄성과 원심력에 의해 바깥으로 벌어지면서 Locking Teeth에 걸려 회전을 방지하는 원리이다. 하지만 이 앞선 두 가지 방법은 자동차와 과속방지턱이 모두 충격과 진동에 영향을 많이 받게 된다는 단점이 있다. 따라서 우리는 이 중 3번과 4번을 택하고, 탄성물질을 사용하여 잠금이 되어도 충격이 크지 않도록 하고, 탄성체의 운동에너지를 메타물질의 변형에너지로 치환하여 감속을 유도하기로 했다.

Fig. 6와 2.3 해석데이터의 (3)식을 통해 확인할 수 있듯, 차량의 바퀴가 방지턱에 닿았을 때 방지턱에 가해지는 힘의 벡터와 충돌시간이 속도에 따라 달라지는 점을 이용하여 설계를 하였다. 3번을 통해 과속일 경우에는 차량 무게에 의한 지면과 수직인 방향의 힘보다 차량 진행방향인 수평방향의 힘이 정속일 경우보다 더 커지는 점을 이용하여 방지턱의 움직임 차이를 만들어 수평방향으로 더 움직였을 때 잠금이 되도록 하였다. 또한, 과속일 때는 탄성물질로 만들어진 메타물질의 구조가 완전히 압축되기 이전에 차량이 방지턱을 벗어나고, 정속일 때는 메타물질이 충분히 다 눌릴 수 있도록 4번을 활용했다.

#### 2.4.1 메타 물질 설계



**Fig. 9** Various metamaterial designs with unit cell parameters (a) Design 1, (b) Design 2, (c) Design 3, (d) Design 4

Fig. 9는 메타물질 설계안 4가지를 보여준다. 각 메타물질마다 변수를 설정하여 변수값들을 조정하며 거동을 확인하고자 하였다. 메타물질은 큐비콘 사의 FDM방식 3D 프린터로 TPU필라멘트를 사용하여 출력하였다. 전체 사이즈는 높이22.5mm, 길이59.5mm로 통일하고 너비는 메타물질마다 강성이 달라 Design 1은 8.5~10.5mm, Design 2~4는 5~8mm로 통일하여 제작하였다.

#### 2.4.2 메타 물질의 이론적 해석

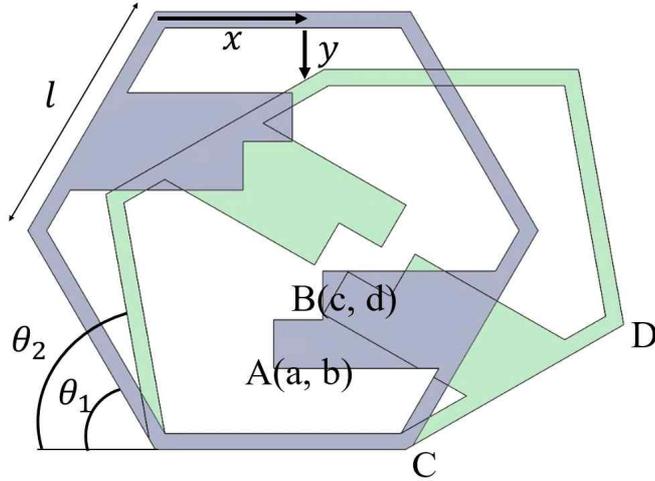


Fig. 10 The picture of unit cell before and after transformation with coordinate

Fig. 9의 Design 1을 바탕으로 수평방향, 수직방향 변위가 주었을 때, 메타물질 내부의 돌출된 부분끼리 걸리는지 확인하였다.

$x$  : 수평방향 변위,  $y$  : 수직방향 변위

$\theta_1$  : 지면과 유닛셀이 이루는 초기 각도,  $\theta_2$  : 변형 후 지면과 유닛셀이 이루는 각도

Fig. 10와 같이 유닛셀의 왼쪽 하단 모서리를 원점으로 설정하고, 변형 전과 변형 후 유닛셀의 각 모서리를 좌표로 표시하였다. 이후 유닛셀의 각 변에서는 좌굴이 발생하지 않는다는 가정 하에 A점과 유닛셀 모서리 간의 거리와 B점과 유닛셀 모서리 간의 거리가 같다는 원리를 활용하였다.

$$(a-l)^2 + b^2 = (c-l)^2 + d^2 \dots (4)$$

(1)식은 A(a, b)점과 C(l, 0)점간의 거리가 변형 이후에도 같다는 원리를 활용한 식이다.

$a, b, l$  은 실측을 통해 얻을 수 있는 값들이므로 (1)식은  $c$ 와  $d$ 의 관계식으로 정리가 가능하다.

$$(3l\cos\theta_1 - a)^2 + (l\sin\theta_1 - b)^2 = (x+l+l\cos\theta_2 - c)^2 + (2l\sin\theta_1 - l\sin\theta_2 - y - d)^2 \dots (5)$$

(5)식은 A(a, b)점과 D(x+l+lcosθ<sub>2</sub>, 2lsinθ<sub>1</sub>-lsinθ<sub>2</sub>-y)점간의 거리가 변형 이후에도 같다는 원리를 활용한 식이다.

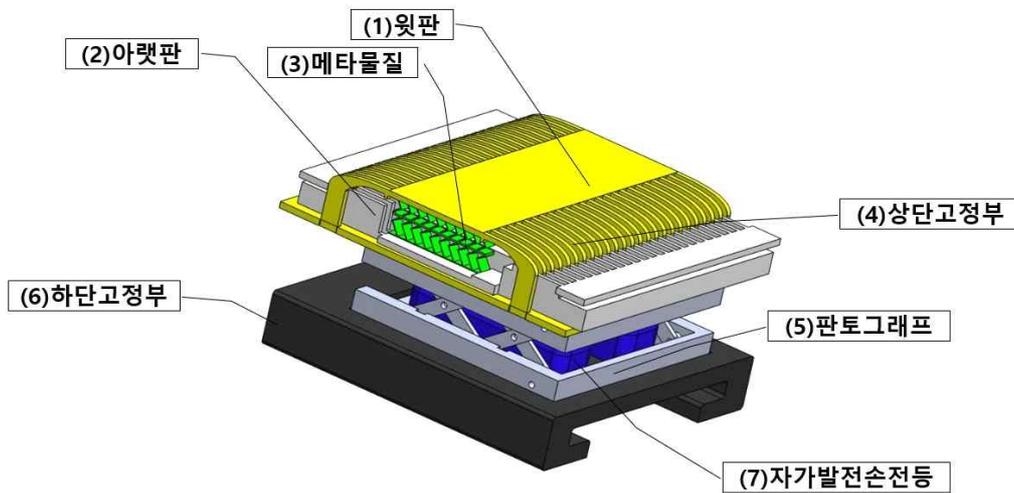
앞선 (4)식을 통해  $d$ 를  $c$ 에 관한 식으로 변환이 가능하기 때문에, 이를 활용해 (5)식을  $c$ 와 변위간의 관계식으로 정리가 가능하다. 이렇게 얻어진  $c$ 의 값과 Fig. 11에서 확인할 수 있는 변형 후 유닛셀의 중심좌표를 비교함을 통해 돌출된 부분끼리 걸리는지 확인할 수 있고, 이를 조정함으로써 원하는 변위에 걸리도록 설계가 가능하다.

하지만 앞선 식들은 재료의 좌굴을 고려하지 않은 이론적 값으로 실험과 해석을 병행하여 최적의 설계를 진행하였다.

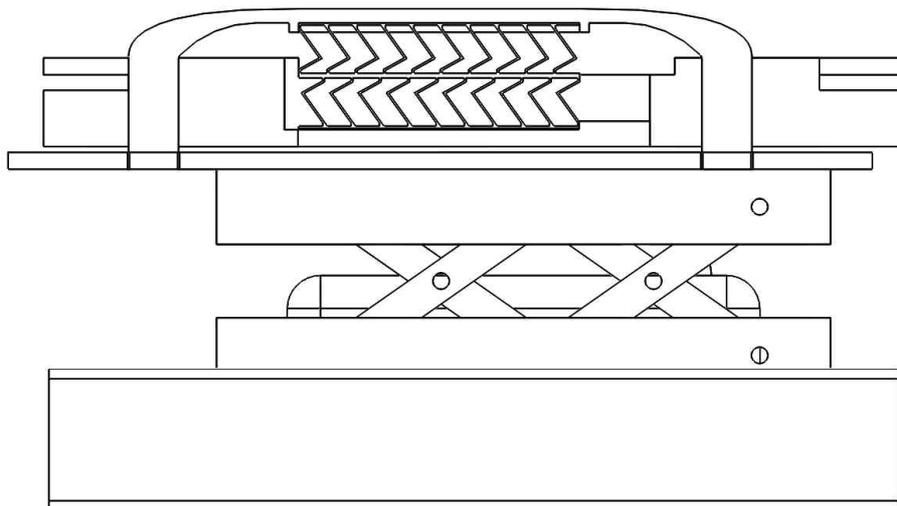
Design 2, 3, 4는 각각 해석과 실험을 기반으로 구조적으로 직접 설계하면서 만든 메타물질이다.

### 2.4.3 전체 구조 설계

본 설계안의 전체구조는 Fig. 11에서 볼 수 있듯, (1) 윗판, (2) 아랫판, (3)메타물질, (4) 상단고정부, (5) 판토품래프, (6) 하단고정부, (7) 자가발전 손전등으로 나눌 수 있다. 상단고정부는 고정되어 움직이지 않고 윗판과 아랫판이 결합되어 위아래로 움직이도록 설계하였고, 윗판과 상단고정부 사이에 메타물질을 부착할 수 있도록 했다. 해당 설계안에서는 실험에서 RC카의 무게 때문에 양쪽에 하나씩만 메타물질을 대칭적으로 배치하였지만, 필요에 따라 내부공간을 비우고 메타물질을 여러 개 배치가 가능하다. 하단에는 판토품래프와 하단고정부를 배치하여 이후 설명할 자가발전 손전등이 배치될 수 있도록 설계하였다. 전체구조의 정면 모습은 Fig. 12을 통해 표현하였다.



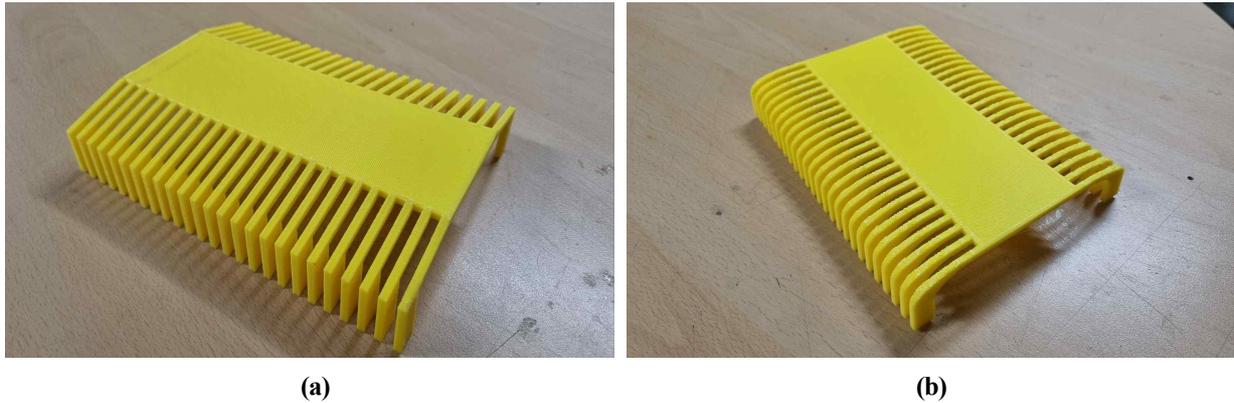
**Fig. 11** The modeling of overall structure



**Fig. 12** The front view of overall structure

- 윗판, 아랫판

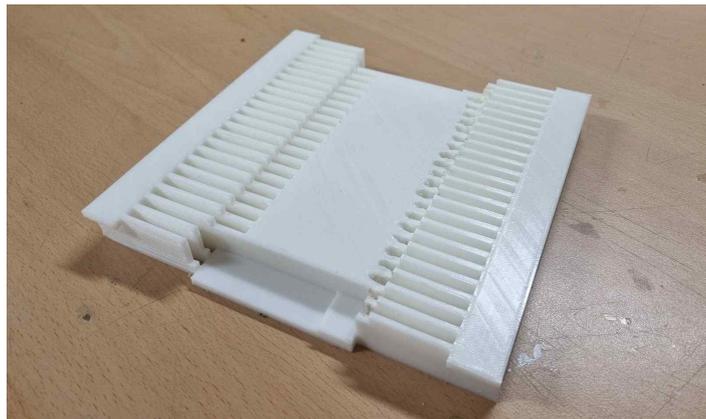
윗판과 아랫판은 결합되어 움직이는 역할을 하기 때문에 다수의 구멍을 일정 간격으로 뚫어 체결이 가능하도록 제작하였다. 또한 윗판은 상단고정부와 교차되어 위아래로 거동할 수 있도록 제작하였다. Fig. 13. (a)의 초기 설계안으로 진행한 결과 방지턱의 경사가 낮아 지면에 수평한 방향 힘을 받기 어렵다고 판단하여 Fig. 13. (b)와 같이 모서리에 필렛가공을 하게 되었다. 실제 방지턱 규격을 바탕으로 모형을 제작하기 위해 실제 규격의 0.06배 정도의 크기로 제작하여 길이 132mm, 높이 34.2mm, 너비 175.92mm의 윗판을 제작하였다.



**Fig. 13** (a) The previous version of upper part (b) The latest version of upper part

◦ 상단고정부

윗판과 아랫판이 위아래로 움직일 때, 지면과 평행하게 고정되어 있도록 설계하였으며, 윗판과 교차될 수 있도록 제작하였다. 양 측면에는 윗판과 상단고정부 사이에 유닛셀이 위치할 수 있도록 제작하였다. 상단고정부의 모습은 Fig. 14과 같다.



**Fig. 14** Top fastening part

◦ 판토프래프

방지턱의 순수 병진운동만 할 수 있도록 회전운동을 제거하기 위해 방지턱의 앞부분에만 힘이 가해져도 방지턱의 뒷부분에도 힘이 가해질 수 있도록 판토프래프 구조를 설계하여 상단고정부 아래쪽에 배치하였다. 방지턱의 거동이 수직 움직임 뿐 만 아니라 수평방향으로도 움직이기 때문에 수평방향으로 고정하지 않았다. 판토프래프의 중심에 스프링을 배치함으로써 원래의 형태로 복원될 수 있도록 제작하였다. 아래 Fig. 15은 판토프래프와 하단고정부가 체결된 모습이다.

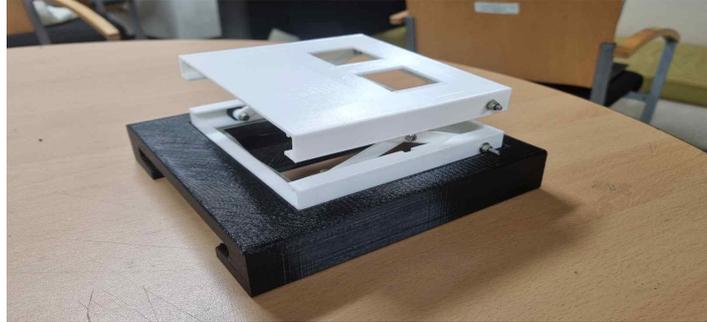


Fig. 15 Pantograph and bottom fastening part

◦ 하단고정부

판토히라프와 내부에 위치할 자가발전 손전등을 고정하기 위해 하단고정부를 제작하였다. 자가발전 손전등의 규격에 맞추어 길이 105mm, 너비 30mm의 구멍을 2개 뚫었다.

2.5 유한요소해석

본 연구에서는 설계에 따른 모델의 거동을 확인하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위해서는 범용 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 차량의 바퀴와 방지턱이 충돌하는 상황을 모델링 하였다. 차량이 방지턱에 가하는 충격량과 충돌 시간이 중요하므로 시간에 따라 변형량이 계속 변하며 누적되는 해석에 적용하는 ABAQUS/Explicit 으로 해석을 수행했다.

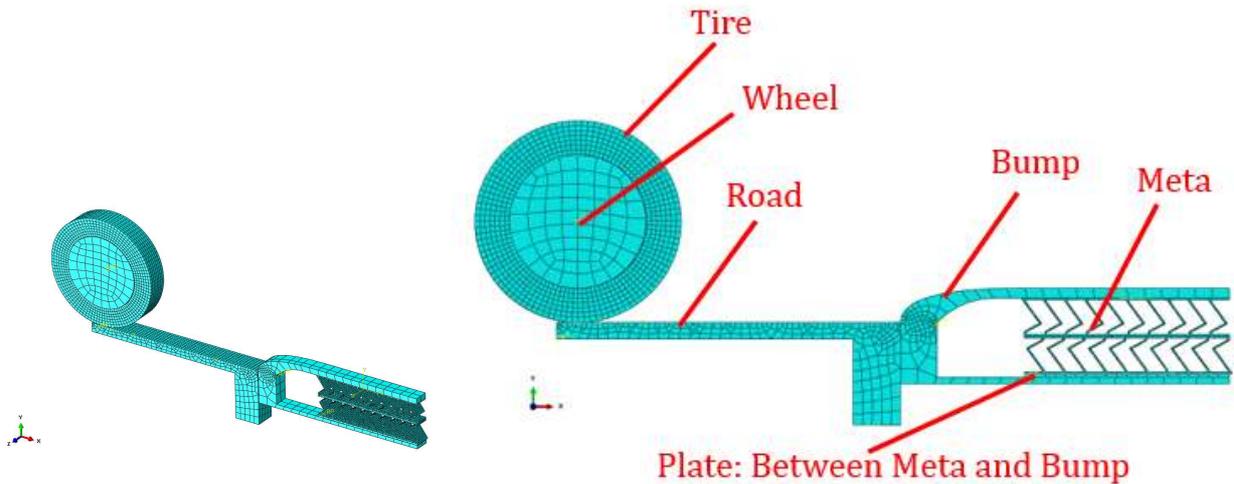


Fig. 16 Design structure within the program

2.5.1 유한요소 모델링

Fig. 16 는 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것으로 대칭성을 고려하여 메타물질이 존재하는 부분만을 모델링 하였다. 메타물질의 요소는 8절점 등계수 사각주요소(8-nodes isoparametric brick reduced integration element, C3D8R in ABAQUS element library)를 사용하였다. 해석의 수렴성 문제를 고려하여 Abaqus/Explicit 외연적 해석으로 진행하였으며 메타물질의 절점과 요소의 개수는 12590개와 7083 개 이다. Explicit해석에서 Hourglass현상을 완화하기 위해 비교적 많은 개수의 요소를 설정했다. 물성치는 탄성계수 19Mpa, 포아송비 0.38, 밀도 1100kg/m<sup>3</sup>로 TPU의 물성치를 입력했다.

이외의 Wheel, Road, Bump는 변형이 없다고 가정해도 해석에 큰 영향이 없으므로 Rigid Body를 지정하고 Reference Point를 설정했다. 요소의 종류는 R3D4를 사용하였다. Tire의 경우 어느정도의 변형이 예상되어 Solid로 지정 해준 뒤 물성치는 실험에 쓰이는 RC카의 바퀴재질인 SBR물성치를 넣어주었다(탄성

계수 2Mpa, 포아송비 0.48, 밀도 1200kg/m³). 전체 모델의 절점 개수는 22058개이며 요소 개수는 14950개이다.

접촉조건으로 모든 Rigid Body에 Kinematic Coupling을 적용하였고 bump와 메타물질이 접촉하는 부분에 Constraint 조건으로 Tie 조건을 주어 bump와 메타물질의 모든 방향 자유도를 일치시켰다. Tire가 지나가는 길인 Road와 Bump부분도 Surface to Surface 접촉조건을 주었고 Wheel과 Tire도 같은 방향 및 크기로 운동해야 하므로 Tie 조건을 적용했다. 마지막으로 메타물질 내에서의 접촉을 고려하여 메타물질의 접촉면들에도 접촉조건을 적용했다.

해석의 종류는 Dynamic, Explicit으로 전체시간은 0.9s로 설정했다. Time Scaling factor는 0.5로 설정하였고 이외의 다른 설정들은 모두 기본값으로 적용했다.

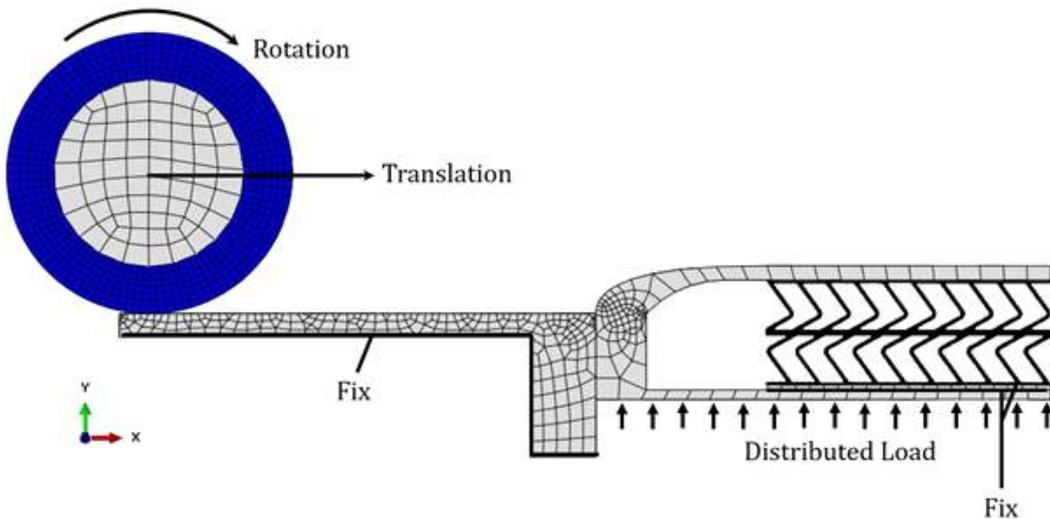


Fig. 17 Overall appearance of the structure

하중조건으로 wheel에 rad/s 단위의 각속도를 작용하여 실제 거동과 같이 바퀴와 방지턱이 충돌하도록 설계했다. 또 Wheel에 10N 무게를 주어 바퀴가 지면에 작용하는 하중을 고려했다. 바퀴의 속도는 실제 어린이 보호구역에서의 과속기준을 고려하여 정속(15km/h=4.17m/s), 임계(30km/h=8.33m/s), 과속(40km/h=11.11m/s)으로 분류했다. 유한요소해석상의 모델은 실제 방지턱을 0.06배한 크기이므로 속도 또한 0.25m/s, 0.5m/s, 0.66m/s로 변환하여 적용했다. Road, Plate는 전방향 자유도를 구속했다. Bump는 pantograph의 영향을 고려하여 x, y방향 자유도를 제외한 나머지 방향의 자유도를 구속시키고 아랫면에 pantograph가 작용하는 힘을 고려하여 분포하중을 적용시켰다. 마지막으로 메타물질의 아랫면에 전방향 구속을 적용하여 실제 모델과 유사한 형태의 해석을 고려했다. Fig. 17은 구조의 전체적인 모습이다.

### 2.5.1 유한요소해석 결과

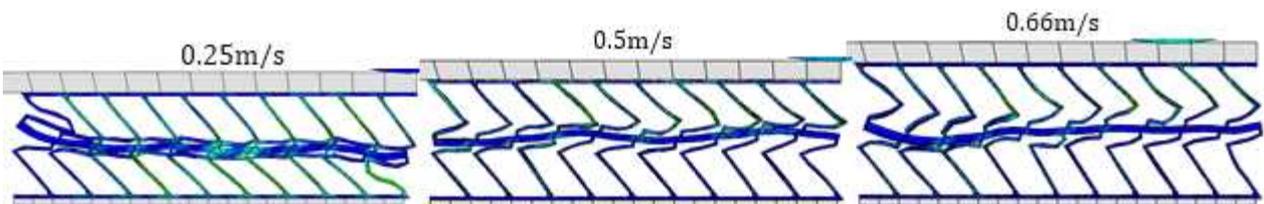


Fig. 18 Finite element analysis results depending on speed

유한요소해석은 차량이 방지턱을 정속도, 임계속도, 과속도 세가지의 경우로 통과하는 경우로 수행되

었다. Fig. 18에서 확인할 수 있듯이, 유한요소해석 결과 바퀴의 속도가 느릴수록 충돌시간이 길어져 메타물질의 변형이 더 발생하고 속도가 빠를수록 충돌시간이 짧아져 메타물질의 변형이 덜해 방지턱의 y 방향 변화량이 덜 발생하게 되며 바퀴에 가해지는 충격이 더 커지는 것으로 확인되었다.

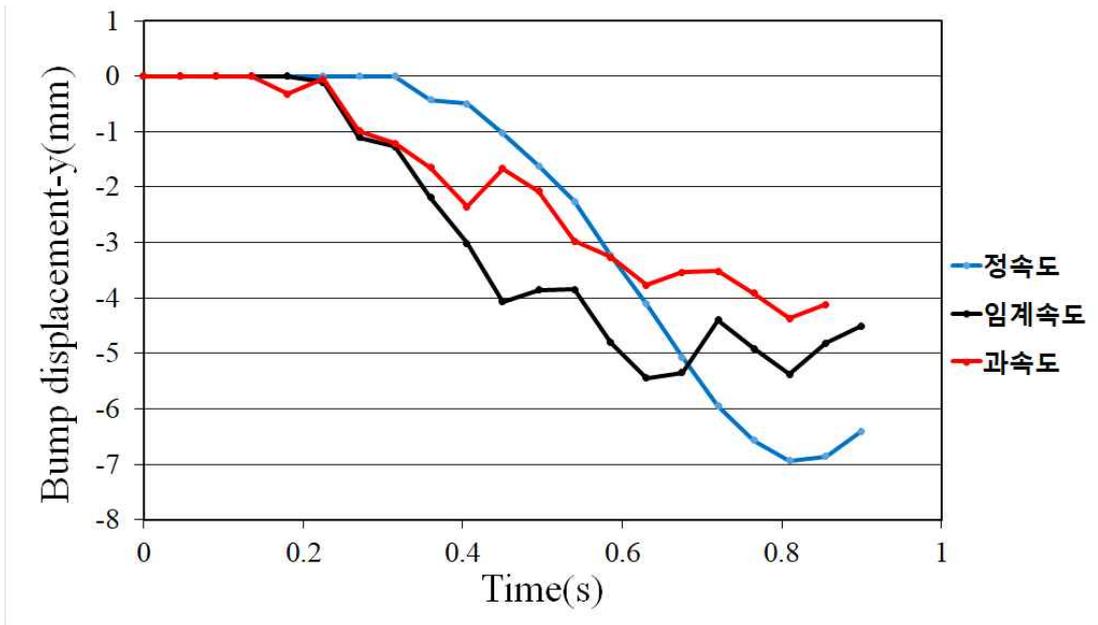


Fig. 19 Graph showing the y-axis displacement of the bump depending on speed

본 연구에서 제작한 방지턱은 실제 모델의 6/100 모델이다. 바퀴의 속도도 축적에 따라 적용시켰다. Fig. 19의 그래프는 정속도 0.25m/s(실제속도 15km/h), 임계속도 0.5m/s(실제속도 30km/h), 과속도 0.66m/s(실제속도 40km/h) 의순으로 바퀴가 방지턱에 충돌했을 때 방지턱의 y축 변위를 나타낸 그래프이다. 정속도에서는 비교적 충돌시간이 길어 충돌 후 방지턱의 변위가 점진적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 과속기준인 0.5m/s 이상부터는 충돌에 의해 방지턱의 변위 변화가 다소 불안정한 모습을 보인다.

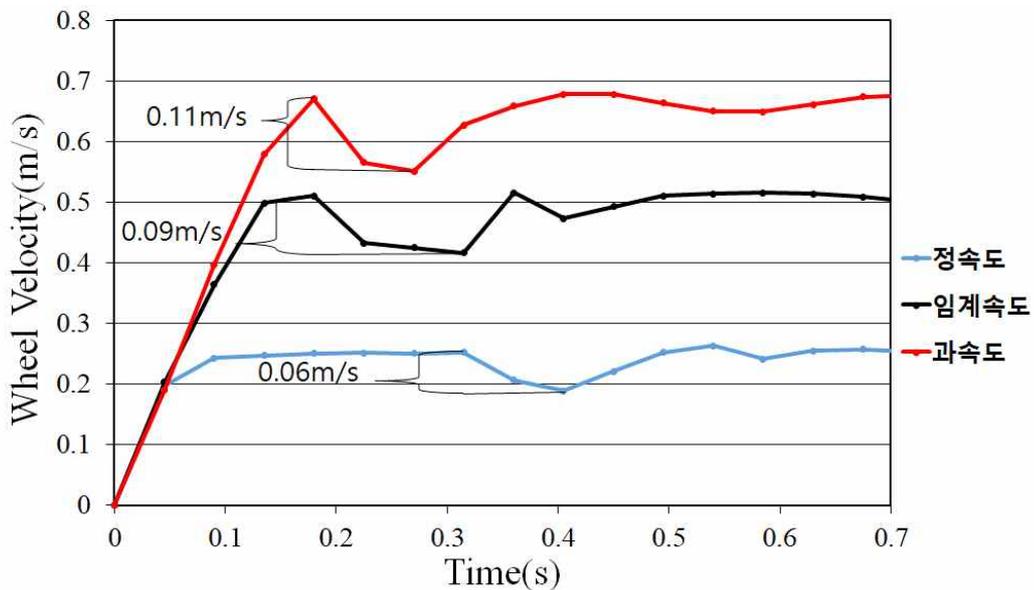


Fig. 20 Change in speed of the wheel

Fig. 20는 방지턱과 충돌하는 과정에서 바퀴의 속도 변화를 나타낸 그래프이다. 지면과의 마찰력에 의해 초기속도 0에서 설정한 속도까지 도달한 뒤 등속도 운동을 하다 방지턱에 부딪혀 속도가 감소하는 과정을 나타낸 그래프이다. 정속부터 과속까지 속도가 0.06, 0.09, 0.11m/s만큼 감소하는 것을 확인할 수 있으며 진입속도가 증가할수록 충돌 시 속도 감소량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

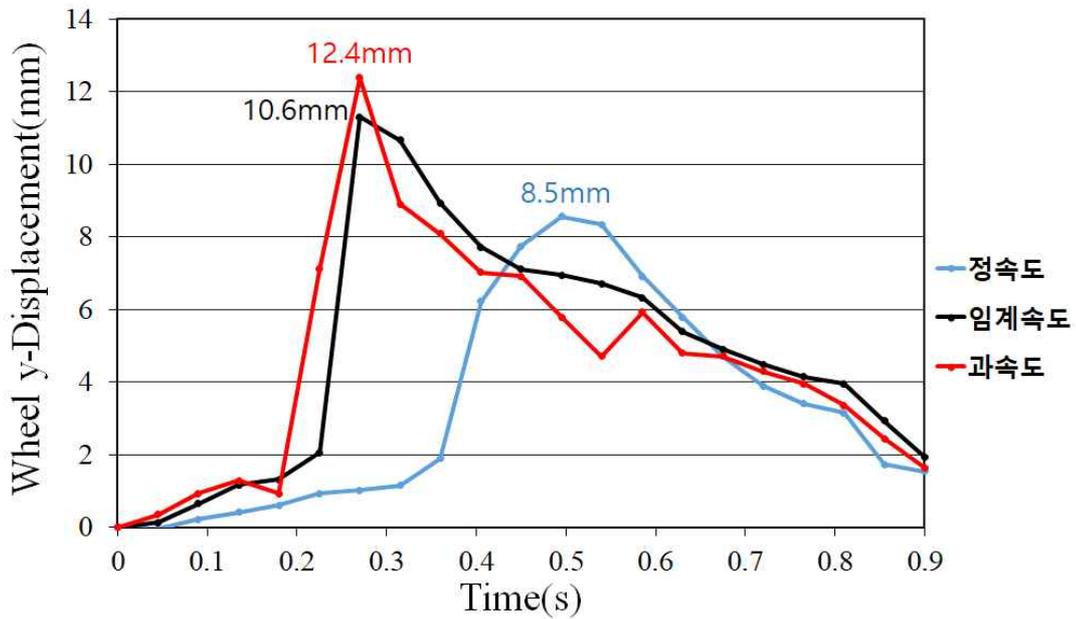


Fig. 21 Change in y-axis displacement of the wheel

Fig. 21은 바퀴의 속도에 따라 바퀴가 초기부터 방지턱과 충돌하는 과정에서 바퀴의 중심에서의 y축 변위 변화량을 나타낸 그래프이다. 정속의 경우 바퀴에 가해지는 평균힘이 작아 바퀴의 변위가 덜 발생하고 임계속도 이상에선 정속 대비 2~4mm 정도 더 큰 변위차이가 확인되었다. 이를 통해 바퀴 차량의 속도가 증가할수록 바퀴의 y축 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 바퀴의 속도가 증가할수록 바퀴가 더 큰 진폭으로 진동하게 되고, 차량의 운전자에게 전해지는 충격이 증가하게 된다.

### 2.6 하베스팅 시스템 구축

완성된 전체 구조를 바탕으로 과속방지턱의 상하 운동을 활용한 전자기형 에너지 하베스팅 구조를 설계하기 위해 Fig. 22. (a)와 같은 자가발전 손전등을 연결하였다.



Fig. 22 (a) The picture of self-powered flashlight (b) The internal structure

손전등의 손잡이를 밀어 넣게 되면 손잡이와 연결된 톱니바퀴가 돌아가며 맞물려있는 다른 톱니바퀴가 돌아간다. Fig. 22. (b)에서 확인할 수 있듯, 노란색의 톱니바퀴는 단방향으로만 돌아갈 수 있게 해주는 구조를 가지고 있다. 노란색 바퀴 속에는 원형 자석이 달려있고, 바퀴의 회전에 따라 이 원형 자석 또한 회전을 가지게 된다. 회전에 의해 자기장이 변화하고 아래에 있는 코일이 영향을 받아 전류를 생산하는 전자기형 에너지 발전의 구조이다. 이러한 구조의 손전등을 방지턱의 하부에 연결하여 위아래로 움직임에 따라 손잡이가 눌릴 수 있도록 설계하였다.

## 2.7 LED

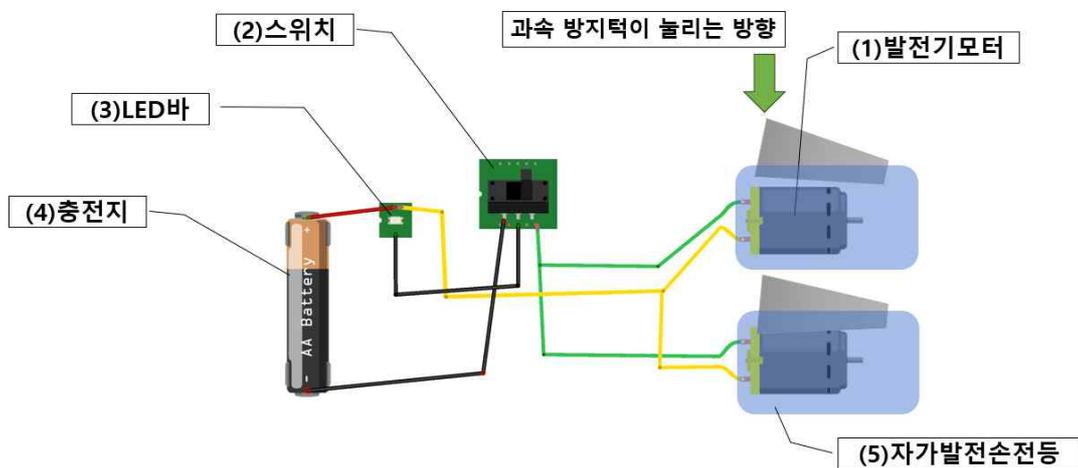


Fig. 23 The parts of LED actuator

- 발전기 모터  
자가발전손전등의 구조를 이용하여 자석이 회전하며 코일에 영향을 주어 전류를 생산 한다
- 스위치  
스위치를 이용하여 LED의 전원을 제어한다
- LED바  
5V 녹색 LED를 이용하여 야간에 LED를 켜 과속방지턱을 인식하기 쉽도록 한다
- 충전지  
1.5V 알카라인 코인 건전지 3개가 직렬로 연결된 1개의 충전지 셀을 2개 병렬로 연결해 구성하였다.

Fig. 23은 LED작동구조의 대략적인 모습이다. 2.5의 하베스팅 구조에서 설명한 자가발전 손전등을 이용하여 생산되는 전류를 1.5v 알카라인 전지 3개가 직렬 연결된 충전지에 충전하고, 이 충전지 2개를 병렬로 연결한 후, 스위치를 이용하여 Fig. 24와 같이 5v 녹색 LED바에 전원을 공급할 수 있도록 하였다.



Fig. 24 The green LED light bar attached on the speed bump

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 최종 작동 실험

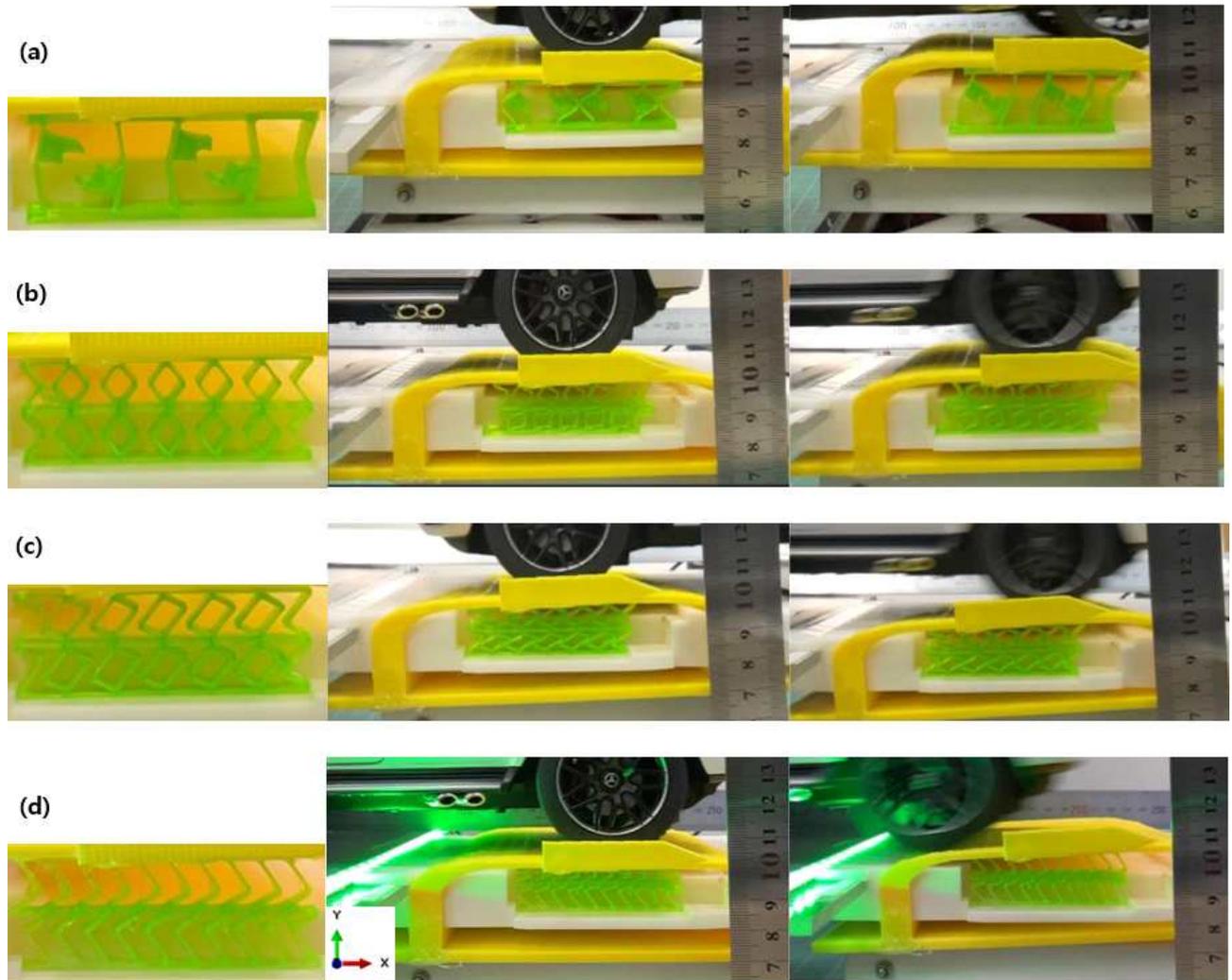
과속방지턱의 변형이 조건에 맞게 이루어지는지 확인을 하기 위한 실험을 진행하였다. 실제 차량의 0.071배 크기의 RC카를 구입하여 차량을 대신하였고, 3D프린팅을 통해 실제 제작하고자 하는 과속방지턱을 0.06배 축소시킨 모형을 제작하였다. Fig. 25을 통해 실험구조의 전반적인 모습을 확인할 수 있다.



Fig. 25 The picture of experimental structure

#### 3.1.1 실험방법

메타 물질의 변형 형태를 확인하기 위해 RC카의 속도를 조절하여 비교하는 실험을 진행하였다. RC카 자체의 하중만으로는 지면에 수직인 방향의 힘이 상대적으로 매우 작아서, 무게추를 추가하여 메타물질이 하중방향으로 충분히 변형하도록 하였다. 총 4종류의 메타물질을 준비하여 실험에 사용했다. Fig. 26 통해 모습을 표현하였다.



**Fig 26.** Left: Metamaterial / Medium: Deformation at low speed / Right: Deformation at high speed (a) Design 1, (b) Design 2, (c) Design 3, (d) Design 4

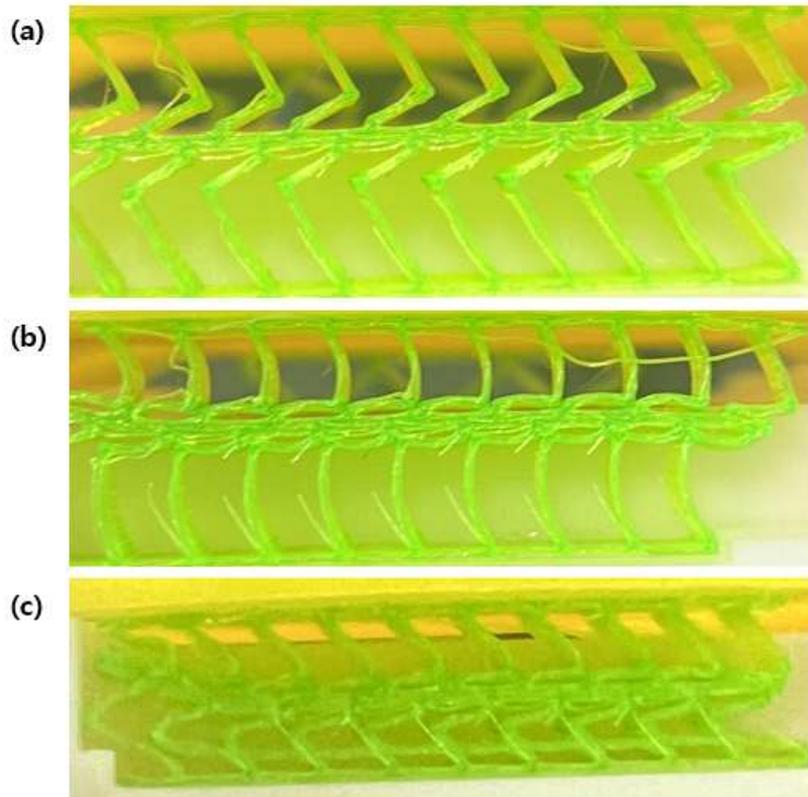
### 3.1.2 실험결과

속도를 측정하기 위해 바퀴가 과속방지턱에 닿는 순간부터 통과하는 순간까지의 시간을 확인하였고, 바퀴가 방지턱에 통과하는 동안의 거리를 측정하였다. 방지턱에 닿기 직전 차량의 이동 거리를 1초 단위로 측정하여 속도를 계산하였다.

**Table 1.** The table of y-direction displacement depending on the speed

RC카 속도		y방향 변위			
		Design1	Design2	Design3	Design4
(100~200mm/s)	정속주행	8.12 mm	5.01 mm	4.84 mm	7.13 mm
(400mm/s~)	과속주행	3.22 mm	3.94 mm	2.23 mm	4.03 mm

측정한 시간 값들과 주행거리를 바탕으로 정속주행일 때와 과속주행일 때의 속도범위를 측정할 수 있었다. 정속주행의 경우 약 100 mm/s ~ 200 mm/s의 속도를 가지고, 과속주행의 경우 약 400 mm/s ~ 600 mm/s의 속도를 가짐을 확인할 수 있었다. 각 속도 범위 내에서는 거의 비슷하게 거동하였다. 또한 Fig. 27를 통해 정속주행일 때와 과속주행일 때의 방지턱 윗부분의 변위차를 정리하였다. 변위는 mm단위로 측정하여 평균을 내었다.



**Fig. 27** Variant flow in Design 4 (a) Before the deformation, (b) First deformation, (c) Complete deformation

Design 1에서 정속과 과속에서 가장 많은 변위차를 보였다. 정속일 때 턱에 걸리지 않고 압축되는 거동이 원인으로 과속일 경우에는 턱에 걸리고 재료의 탄성으로 변형하여 감속을 유도했다. Design 2와 Design 3에서는 정속과 과속에서 유의미한 변화는 일어나지 않았다, 하지만 구조적으로 변형하며 내부에 있는 구조가 바닥면에 닿으면서 1차로 충돌반발력이 발생하였고, 이후에 차량의 무게로 인해 눌리면서 2차 변형이 일어났다. 과속일 때는 내부 마름모 구조가 바닥면에 닿는 1차 변형만 일어나고 방지턱을 벗어나는 것을 기대했고 정속일 때는 2차 변형까지 일어날 수 있는 충분한 시간이 있을 것이라 생각했지만 2차 변형에 필요한 하중이 생각보다 많이 필요해서 변형을 일으키지 못했다. 유닛셀의 구조를 바꾸거나 축척을 달리해서 메타물질의 강성을 줄이면 가능할 것으로 보인다. Design 4에서는 Fig. 28과 같이 과속일 경우 첫 번째 변형에서 차량이 방지턱을 탈출하고, 정속일 때 충분한 시간으로 다시 역방향으로 눌려지는 것을 유도했다. 하지만 설계한 방지턱의 길이가 짧아 정속일 때도 완전한 변형까진 되지 않았다.

### 3.2 활용방안 및 기대효과

- 장소에 영향을 받지 않는 에너지원으로 활용이 가능하다
- 사람들의 유동이 많은 도심은 구조상 발전시설이 설치가 어렵다는 특징이 있지만, 과속방지턱을 이용

한 에너지 하베스팅 시스템은 장소에 영향을 받지 않고 비교적 쉽게 설치가 가능하다. 도심 속에 설치되어 가로등이나 신호등에 필요한 전력의 발전이 가능하다.

◦ 주행자와 보행자 양측의 안전을 보장할 수 있다.

보행자의 입장에서는 차량이 정속주행을 함으로써 불안함 없이 통행이 가능하고, 주행자는 기존 과속방지턱을 넘을 때 제기되던 부상의 위험을 없애고, 차량의 서스펜션 및 하부의 파손을 줄일 수 있다.

## 4. 결론

기존의 과속방지턱은 그 형태를 유지하기 때문에 지나가는 차량의 속도에 상관없이 탑승자에게 불쾌감을 주는 것을 파악하였다. 따라서 정속주행을 하는 차량에 한정하여 이러한 불편함을 느끼지 않을 수 있도록 속도에 따라 과속방지턱의 변형 거동을 다르게 하고자 하였다. 또한 과속방지턱의 변형을 운전자들이 인식함으로써 차량의 감속효과를 얻고자 하였다. 이를 위해 차량이 통과하면서 과속방지턱이 얻게 되는 운동에너지를 설계한 메타물질의 변형에너지로 변환하도록 하였다. 또한, 방지턱의 변형을 이용한 에너지 하베스팅 기술을 통해 친환경적인 기술의 개발을 목표로 하였다. 본 설계와 실험을 진행하며 다음과 같이 정리할 수 있었다.

- (1) 정속 주행을 하는 차량들에 한하여 과속방지턱이 아래로 내려가는 결과를 얻음으로써, 아무리 천천히 가더라도 과속방지턱의 존재만으로 탑승자들이 불편함을 느끼던 문제점을 줄일 수 있다.
- (2) 과속방지턱이 속도에 따라 변형이 되면서 생기는 이점들로, 과속방지턱이 있는 구간에서의 감속효과를 통한 교통안전을 기대해볼 수 있다
- (3) 각 세대별로 소유하는 차량의 수가 늘어가고, 차량의 유동이 증가하는 상황에서, 본 설계에서의 에너지 하베스팅 기술을 통해 버려지는 에너지를 재활용하여 친환경적인 에너지발전에 기여할 수 있고, 야간에 켜지는 LED를 통하여 사고를 예방할 수 있다.
- (4) 차량의 속도 감지 메커니즘을 프로그래밍을 통한 제어가 아닌 기계구조적인 메커니즘을 이용하여 과속도 감지와 감속효과의 가능성을 발견한 것에 큰 의미가 있다.

위 효과들을 바탕으로 지속적인 연구를 통해 최적화가 이루어진다면 기존에 제기되던 과속방지턱의 문제점들을 해결하고 탄소 중립에 기여할 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

- 이 논문을 작성하는데 아낌없는 도움을 주신 박근 교수님께 감사드립니다.
- 본 공모전을 진행하며 그동안 배워온 전공지식들을 다시 한 번 되돌아보고 이해할 수 있게 되었습니다. 학문적 발전의 기회를 주신 기계학회 관계자분들께 감사드립니다.
- 연구의 원활한 진행을 위한 비용을 지원해주신 서울과학기술대학교 관계자분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Ali Azam, Ammar Ahmed, Nasir Hayat, Shoukat Ali, Abdul Shakoor Khan, Ghulam Murtaza, and Touqeer Aslam, 2021, "Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (MEH) for application on road", Energy, Vol. 214.
- (2) Kim, D. P., 2017, "Smart speed bumps that are soft when you go slow and hard when you go fast", Asiae, <https://www.asiae.co.kr/article/2017092313131000711>
- (3) Kim, E. Y., 2022, "Impact received by the car depending on the shape of the bump", School Science

Journal, Vol. 16, No. 3, pp. 360~378.

- (4) Lirong Wang, Prakhar Todaria, Abhishek Pandey, James O'Connor, Barbara Chernow, and Lei Zuo, 2016, "An Electromagnetic Speed Bump Energy Harvester and Its Interactions With Vehicles", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, No. 4.
- (5) Pornprom Pahubutra, and Dulyachot Cholaseuk, 2019, "A road test study on speed sensitive collapsible mechanical speed bump", International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies.
- (6) Kim, C. Y., 2016, "There is a problem with indiscriminate installation speed bumps", Ecotimes, <http://www.ecotiger.co.kr/news/articleView.html?idxno=15872>