

# 대한기계학회 주최

## 제12회 전국학생설계경진대회(2022년)

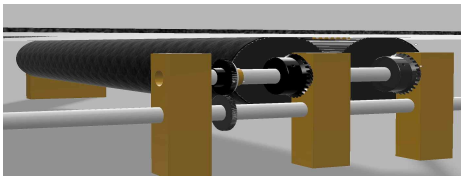
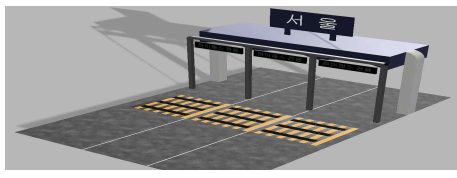
### 설계 최종 보고서

|              |                         |                |           |        |    |
|--------------|-------------------------|----------------|-----------|--------|----|
| 참가부          | 고등부 (   ) / 대학부 ( o )   |                |           |        |    |
| 참가분야         | 공모주제 ( o ) / 자유주제 (   ) |                |           |        |    |
| 참가팀명         | 트레드밀                    |                |           |        |    |
| 설계제목         | 차량 감속을 이용한 에너지 하베스팅     |                |           |        |    |
| 지도교수/교사      | (소속) 고려대학교 (성명) 문두환     |                |           |        |    |
| 대표자<br>(신청인) | 성명                      | 소속             | 연락처 (휴대폰) | E-mail | 주소 |
|              | 김동욱                     | 고려대학교<br>기계공학부 |           |        |    |

### 참가팀원 인적사항

| NO | 성명  | 소속 / 학년           | E-MAIL |
|----|-----|-------------------|--------|
| 1  | 신재홍 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 |        |
| 2  | 김선후 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 |        |
| 3  | 김현수 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 |        |
| 4  | 노도원 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 |        |
| 5  |     |                   |        |
| 6  |     |                   |        |

# 설계 요약문

|               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 참가분야          | 공모주제 ( o ) / 자유주제 ( )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |
| 참가팀명          | 트레드밀                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |
| 설계제목          | 차량 감속을 이용한 에너지 하베스팅                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| 대표자명          | 김동욱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| 요약문           | <div>   </div> <div> <p><b>Fig. 1</b> 3D design of whole system and structure of the model</p> <p><b>Fig. 2</b> Example of actual application of the product</p> </div> <p>현재 국내 에너지 정책은 '재생에너지 중심의 청정에너지 체제로의 전환'을 추진하여 2015년 기준 2.4%인 재생에너지 비중을 2030년까지 20%까지 높이하고자 한다. 우리는 이를 풍력, 태양에너지가 아닌 실생활에서 버려지는 에너지를 하베스팅하여 에너지를 생산하고자 한다.</p> <p>고속도로는 차량의 속도가 빠르며 통행이 집중되어있고, 톨게이트를 지나가기 위해서는 감속이 필수적이라는 특징이 있다. 이때 톨게이트에서 차량이 감속할 때 발생하는 에너지 손실은 하베스팅을 하기에 적합한 소재라고 볼 수 있다. 우리는 이 에너지를 하베스팅하는 시스템을 구현하여 전력을 생산하는 것이 목표이다.</p> <p>따라서 우리는 고속도로 교통 안전물 시설 설치 매뉴얼에 명시된 톨게이트 진입 구간 500m 내에 차량과 시스템 사이의 마찰력을 회전 동력으로 변환해 기계적 에너지로 회수하는 장치를 설계하였다.</p> |  |
| 설계프로젝트의 입상 이력 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |

# 차량 감속을 이용한 에너지 하베스팅

김동욱\*·신재홍\*·김현수\*·김선후\*·노도원\*·문두환\*\*  
\*고려대학교 기계공학부

## Energy harvesting using vehicle deceleration

Donguk Kim\*, Jaehong Shin\*, Hyunsu Kim\*, Sunhoo Kim\*, Dowon Noh\*, and Duhwan Mun\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Korea University

---

**Key Words:** Tollgate(톨게이트), Expressway(고속도로), Energy harvesting (에너지 하베스팅), vehicle (자동차), Kinetic energy (운동 에너지)

**초록:** 본 설계는 고속도로에서 차량이 톨게이트를 진입할 때 버려지는 운동에너지를 마찰력을 이용해 회수하고 그 에너지를 이용해 발전이 이루어지는 시스템 개발을 목적으로 한다. 효과적인 에너지 회수를 위하여 벨트 풀리 방식으로 마찰력을 극대화하고 이를 회전 운동으로 전환할 수 있도록 설계하였다. 전 세계적인 에너지난이 지속되고 있는 현 상황에서 인위적인 제한으로 버려지는 에너지를 하베스팅 한 본 논문이 국내 톨게이트에 적용되어 국가 에너지 정책인 '재생에너지 중심의 청정에너지 체제로의 전환'에 이바지하기를 기대한다.

**Abstract:** This design aims to develop a system in which kinetic energy thrown away when a vehicle enters a toll gate on a highway is harvested using friction force and power is generated using the energy. For effective energy harvesting, the belt pulley method is designed to maximize friction and convert it into rotational motion. In the face of the global energy crisis, it is hoped that this paper, which harvests energy discarded due to artificial restrictions, will be applied to domestic tollgate to contribute to the national energy policy of "transition to a renewable energy-centered clean energy system."

---

## 1. 서 론

현재 국내 에너지 정책은 '재생에너지 중심의 청정에너지 체제로의 전환'을 추진하여 2015년 기준 2.4%인 재생에너지 비중을 2030년까지 20%까지 높이하고자 한다.<sup>1)</sup> 우리는 이를 풍력, 태양에너지가 아닌 실생활에서 버려지는 에너지를 하베스팅하는 방식을 이용하여 에너지를 생산하고자 한다.

여러 에너지 중, 우리는 가장 직관적으로 하베스팅 가능한 에너지를 선정하고자 하였고, 이에 차량 감속 시에 발생하는 운동 에너지 손실을 하베스팅 하는 데 목표를 두었다.

특히 고속도로는 차량의 속도가 빠르며 통행이 집중되어있고, 톨게이트를 지나가기 위해서는 감속이

---

1) "재생에너지 3020 이행계획(안)", 2017, 산업통상자원부, pp. 2.

필수적이라는 특징이 있다. 이때 톨게이트에서 차량이 감속할 때 발생하는 에너지 손실은 하베스팅을 하기에 적합한 소재라고 볼 수 있다. 우리는 이 에너지를 하베스팅하는 시스템을 구현하여 고속도로에 필요한 전력, 나아가 고속도로 외의 장소에서의 전력난 해소에 기여하는 것이 목표이다. 따라서 우리는 톨게이트 노면에 에너지 하베스팅 발전 시스템을 설계하고, 자동차의 감속으로 인해 생기는 마찰에너지를 하베스팅 하고자 한다.

후술할 에너지 수확량에서 볼 수 있듯 우리의 에너지 하베스팅 시스템은 가로등을 비롯한 톨게이트 주위 시설에 필요한 전력을 제공하고, 나아가 더욱 복잡한 제작을 통해 더 많은 에너지를 수확하여 그 외의 지역에도 전력을 공급할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 설계핵심내용

### 2-1. 설계 분석

첫번째로 하이패스를 대상으로 한 하베스팅 장치를 설치할 구간을 선정하였다. 하이패스 통과 500m 전부터 하이패스 통과 직후 구간까지, 총 500m 구간 중에서 타겟하여 운동 에너지를 하베스팅 하고자 한다. 우리는 300m를 타겟으로 선정하였다. 선정 근거는 감속에 의한 마찰에너지가 차량의 속도와 관계 없이 동일하다는 것에 있다<sup>2)</sup>. 실제 네비게이션 역시 일반적으로 하이패스 진입 전 2차 알림이 500m 전에 발생한다는 점과 200m 구간까지 제한 속도로 진입해야한다는 것을 고려했을 때, 300m 구간에서 에너지를 회수하는 것이 차량 감속에 피해를 주지 않을 것이라고 판단하였다.

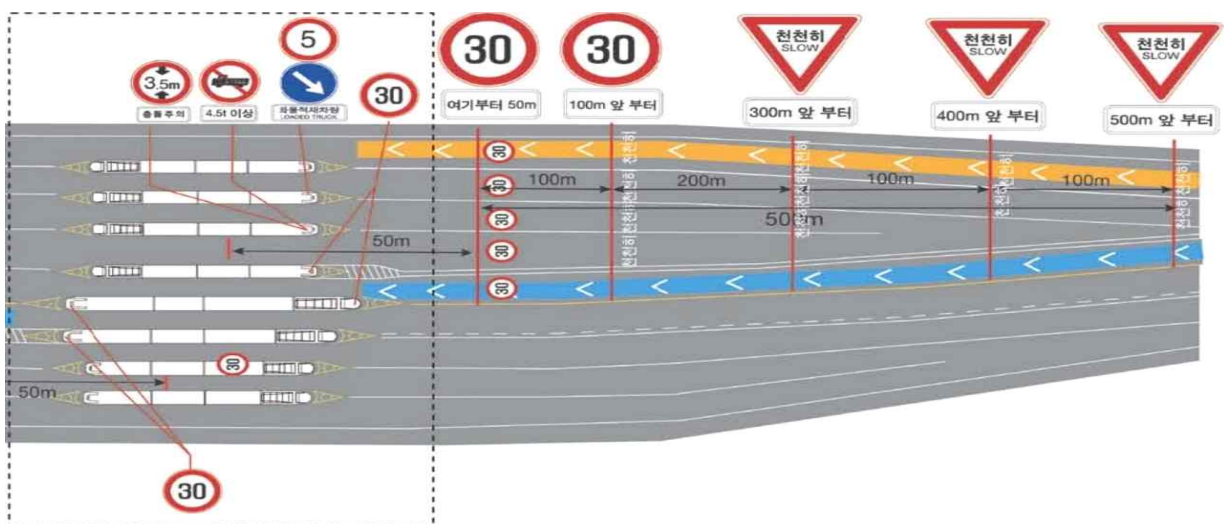


Fig. 0 Highway Traffic Safety Installation Manual

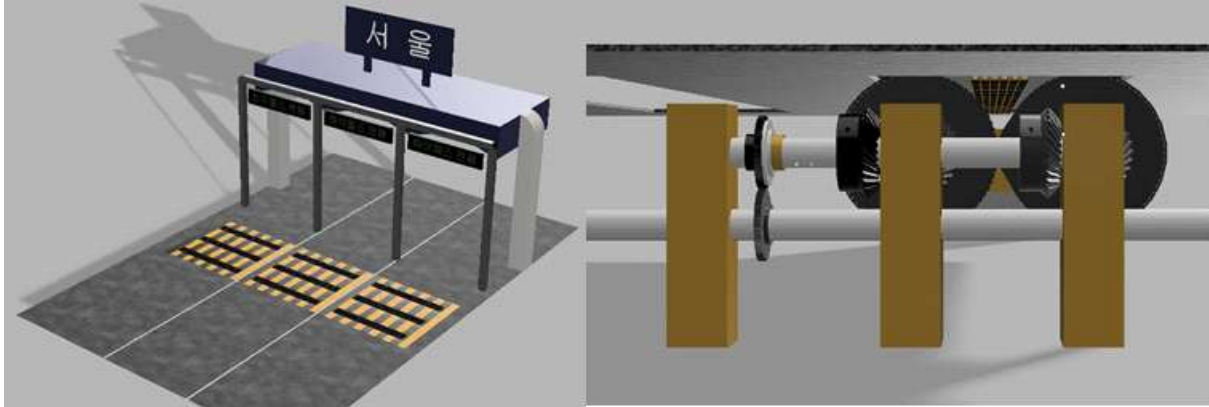
이어서 300m 구간에 하나의 제품을 설치할 것인지, 혹은 일정 간격을 두어 부분적으로 여러 개를 설치할 지에 대한 판단 근거를 마련해보았다. 하나의 완제품 위에 두 대 이상의 차량이 서로 다른 속도로 주행하고 있을 경우 효율적인 하베스팅이 일어나지 않을 것이다. 도로교통공단 홈페이지가 ‘주행 속도의 수치를 그대로 m로 나타낸 정도의 거리’를 고속도로의 안전 거리로 명시한 바에 따라 제품과 차량이 일대일 대응을 유지하기 위해서는 100m 이하의 간격을 두고 여러 개의 제품을 연속적으로 설치해야 함을 확인하였다.<sup>3)</sup>

2) 고속도로 교통안전시설물 설치 메뉴얼 19쪽 (다. 설치 예시도 그림 12)

3) 도로교통공단, 법정 속도와 안전거리, [https://www.koroad.or.kr/kp\\_web/knCarSafe1-03.do](https://www.koroad.or.kr/kp_web/knCarSafe1-03.do)

### 2-1.1 설계 문제 정의

전체적인 제품의 CAD Modeling은 아래와 같다.



**Fig. 1** 3D design of whole system and structure of the model

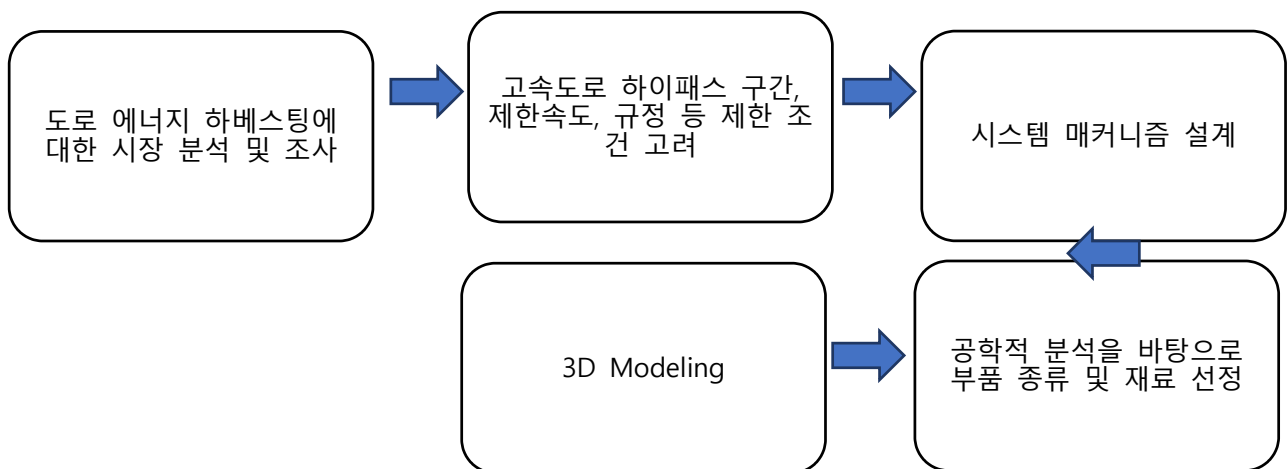
**Fig. 2** Example of actual application of the product

앞서 언급한 바와 같이 본 설계는 고속도로 톨게이트 진입 구간에서 감속을 시도하는 차량의 운동에너지를 마찰에너지로 회수하여 동력전달장치를 통해 에너지를 하베스팅하는 것을 목적으로 한다.

설계에 있어 중요한 고려 요소는 차량이 지나가는 하중을 시스템이 버틸 수 있어야하며, 설계 요소간의 결합부에서 발생할 수 있는 진동을 최소화시켜 안정적인 구동을 완성해야한다. 또한, 발전 장치에 힘을 전달하기 위해 각 설계 시스템에서 발생하는 동력을 하나로 모으는 과정이 필요하다. 시스템 별 동력차를 해결하기 위해 라쳇, 클러치를 사용하여 일정하게 회전시켜야 한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해선 다음과 같은 설계 조건이 요구된다.

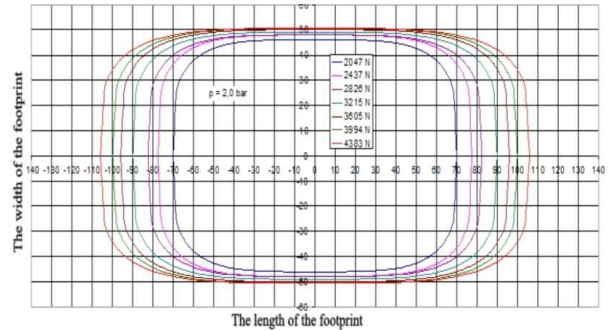
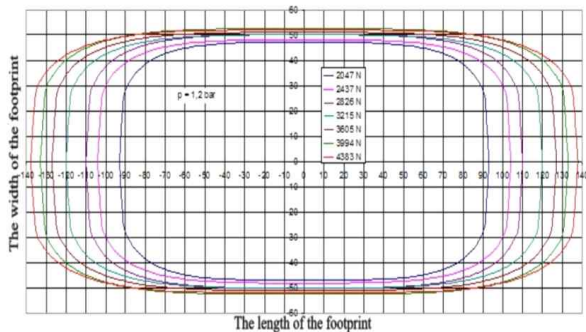
① 벨트와 벨트 풀리 분석을 통한 처짐 방지 설계

② 적절한 라쳇, 클러치 사용으로 동력 회수



### 2-1.2 제품 스케일 설정

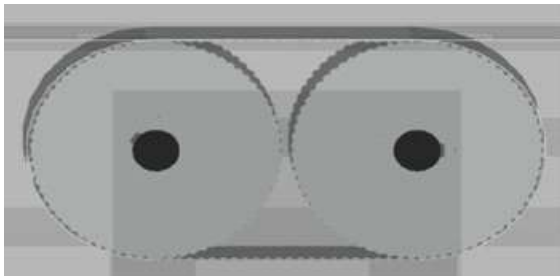
위에서 보여주었던 전체적인 적용 사례와 같이 설계품을 차선에 반복적으로 설치할 수 있도록 하고싶



었다. 그렇기에 설계품이 하나의 차선 안에서 충분히 설치 할 수 있도록 설계하였다. 도로교통공단에 의하면 도로의 폭은 2.75~3.5m이기에 우리는 3m 폭안에 모든 구성요소를 포함하도록 하였다. 그리고 타이어 정격압은 36psi이며 이를 환산하면 2.5bar이다. 이후 계산할 바퀴당 걸리는 하중에 따라 바퀴가 지면에 맞닿는 면적은 다음과 같이 대략 180mm가 된다.<sup>4)</sup> 하지만 바퀴와 벨트가 너무 짧은 거리만 접한다면 마찰력으로 충분히 에너지를 흡수하지 못한다고 생각하였기에 이 거리의 2배인 360mm 전후 정도라면 문제가 없을 것이라 가정하고 설계를 하였다.

**Fig. 3** The area of the footprint at 3bar/2bar

### 2-1.3 접촉부



**Fig. 4** Belt and Belt pulley

하나의 벨트와 한 쌍의 벨트 풀리로 구성되어 있다. 차량이 오기 전에는 시스템은 정지 상태가 되어 있어야 한다. 차량의 바퀴와 시스템의 풀리가 서로 맞닿으면 마찰력이 발생한다. 이로 인해 차량의 회전 방향과 반대되는 방향으로 시스템이 작동한다.

#### - 에너지 계산

우리 시스템은 차량이 고속도로 최고 속도인 100km/h의 속도로 진입했을 때 작동하는 것을 기준으로 계산을 할 것이다. 하지만 시스템은 차량의 마찰력을 이용하여 운동에너지를 회수하는 것이기 때문에 속도는 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단했다.

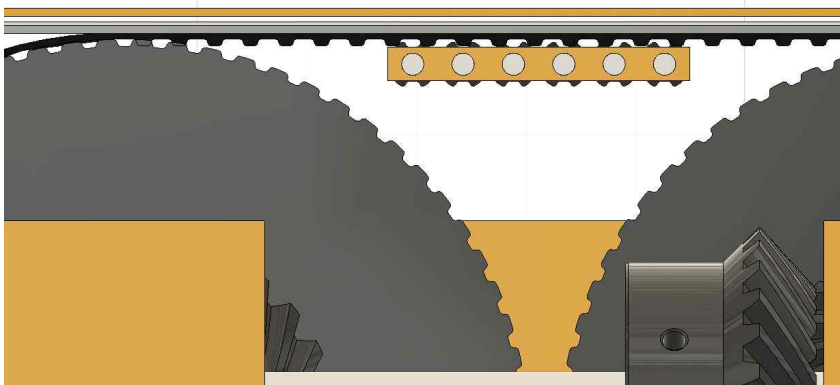
$$\Delta KE = \frac{1}{2} mv^2 = \mu Ns = \mu (mg)s$$

( $\Delta KE$ : 운동에너지, m: 차량의 질량, v: 차량의 속도,  $\mu$ : 도로의 정지 마찰력, s: 시스템 위에서 바퀴의 이동거리)

4) Cristian MINCA, 2015, "THE DETERMINATION AND ANALYSIS OF TIRE CONTACT SURFACE GEOMETRIC PARAMETERS"

후술할 노면 재질 선정에서 우리는 노면의 재질로 에코팔트를 선정하였다. 에코팔트의 경우 기존 아스팔트보다 빗물에 의한 미끄럼 저항이 크다. 평균치를 측정했을 시 기존 아스팔트와 유사한 수치를 가지기 때문에 0.8을 기준으로 계산하겠다.  $m$ 은 공차 중량이 1450kg인 k5를 기준으로 설정하였다.  $s$ 는 폴리가 차량 바퀴와 만나는 거리인 30cm이다. 계산 결과 3414J의 운동에너지가 얻어진다.

#### 2-1.4 벨트 처짐에 대한 현상 및 해결 방안



**Fig. 5** Complement roller

차량의 하중을 하나의 벨트와 한 쌍의 벨트 폴리가 이겨내는 것은 불가능하다. 초기 설계 과정에서 폴리 간의 간격을 넓지 않도록 설계해 처짐을 방지하고자 했지만 근본적인 해결책이 되지 못한다. 따라서 벨트 처짐을 방지할 구조가 필요하며, 벨트 상단부와 맞닿는 롤러 추가 구조는 처짐을 방지하는 것을 막아 줄 것이다.

#### 2-1.5 도로 노면과 시스템 연결부



**Fig. 6** Road surface connection system

차량이 시스템과 접촉할 때 도로와 시스템 사이에 빈 공간이 존재한다. 바퀴가 안전하게 평평한 벨트에 접할 수 있도록 경사로를 설계하였고, 이러한 구조는 우천, 우설시 이물질이 들어오는 것을 방지함과 동시에 완만한 경사가 차량이 조금 더 유연하게 지나갈 수 있도록 만들어 준다.



**Fig. 7** Expansion of road surface connection system

이 경사로는 바퀴와 벨트가 300mm동안 접촉하게 만들어 주며, 경사로는 165mm동안 3mm를 오르내리도록 설계하였다. 이는 도로안전시설 설치 및 관리지침에 규정되어 있는 과속방지턱 높이 10cm 보다 낮은 수치로, 지나가는 차량의 승차감에는 큰 영향을 주지 못할 것으로 판단된다.

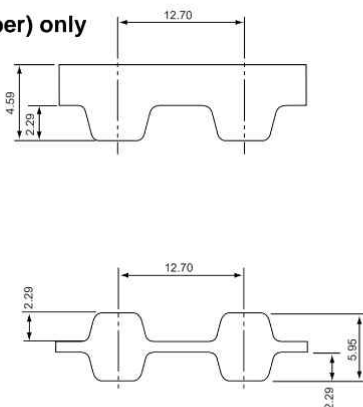
#### 2-1.6 벨트 및 벨트 폴리 재료 선정 과정

차량과의 마찰력을 원활히 구동하기 위해서는 고속, 고동력 전동이 필요하다. 타이밍 폴리는 회전 비가 커 감속기로 대체할 수 있는 장점이 있다. 따라서 ATPT72H150을 바탕으로 대형 폴리를 제작해 사용할 것이다.

이에 맞추어 벨트의 구체적인 규격은 Mitsuboshi사의 H형 벨트인 TBN1000H150을 참고하여 규격에 맞게 설계하였다. 물성치 선택이나 응력에 대한 분석은 안정성 평가에서 다룰 것이다.<sup>5)</sup>

## Classical Type (D)H

G Type (Rubber) only



● Product Code

**510**

nominal length  
(inch) × 10 = 51 inch (1295.40 mm)

**(D)H**

Tooth Profile  
(DH for Double timing belt)

**100**

nominal width  
(inch) × 100 = 1 inch (25.4 mm)

**G**

G Type (rubber)

**Belt width lineup** Table 1-12

| Nominal width | Width (mm) |
|---------------|------------|
| 075           | 19.1       |
| 100           | 25.4       |
| 150           | 38.1       |
| 200           | 50.8       |
| 300           | 76.2       |

**Belt weight per unit (kg/10mm x 1m)** Table 1-13

| Material | Tooth Profile | Belt weight |
|----------|---------------|-------------|
| rubber   | H             | 0.040       |
|          | DH            | 0.043       |

**Fig. 8** Mitsuboshi-desing manual timing belt p21

5) “Design Manual Timing Belt\_V832-E”, Mitsuboshi, p.21



### 2-1.7 마찰계수 관련 재질과 모형 선정 과정

마찰을 통한 감속을 이용, 에너지 하베스팅을 극대화하기 위해 우리는 타이어에 대한 노면의 마찰계수를 높이기 위한 노면의 재질을 선정하였다. 먼저 이미 상용화되어있는 ‘미끄럼 방지 포장재’의 사용가능성을 검토하였다.

미끄럼 방지 포장이란 노면의 미끄럼 저항이 낮아진 곳, 도로의 평면 및 종단 선형이 불량한 곳 등에서 포장면의 미끄럼 저항력을 높여 자동차의 제동거리를 짧게 하기 위한 목적으로 설치되는 시설을 가리킨다. 주로 사용되는 미끄럼 방지 포장은 수지계 표면처리로, 노면에 열경화성 및 열가소성 수지를 도포한 이후 마찰계수가 큰 경질 골재를 살포하는 방식으로 이루어진다.

미끄럼 방지 포장의 설치의 비효과적이고 무분별한 설치를 피하기 위해, 국토교통부에서는 미끄럼방지포장 관련 지침을 명시해놓았다. 이에 우리 제품이 설치될 고속도로가 적용 범위를 만족하는지에 대한 검토를 이어나갔다.

| 구 분                       | 정 의                                                                         | 최소 요구 마찰계수 |       |       | 마찰계수의 종류 |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|----------|
|                           |                                                                             | 위험도 1      | 위험도 2 | 위험도 3 |          |
| S1<br>(마찰력 확보가 매우 중요한 구간) | 1) 설계 속도 60km/시 이상인 도로의 교통신호 또는 횡단보도 접근부                                    | 57         | 67    | 77    | BPN      |
|                           | 2) 도시 지역도로의 교통신호, 횡단보도 또는 비슷한 위험개소의 접근부                                     |            |       |       |          |
|                           | 3) 5% 이상의 내리막 경사에서 곡선 반경이 “도로의 구조, 시설 기준에 관한 규칙”에서 정한 값보다 작게 설계된 곳          | 37         | 44    | 50    | SN       |
|                           | 4) 고속도로로서 S2의 1), 2)항에 해당하는 구간                                              |            |       |       |          |
| S2<br>(마찰력 확보가 중요한 구간)    | 1) 설계 속도 60km/시 이상이 되는 도로로서 곡선 반경이 “도로의 구조, 시설 기준에 관한 규칙”에서 정한 값보다 작게 설계된 곳 | 47         | 57    | 67    | BPN      |
|                           | 2) 5% 이상의 내리막 경사가 100m 이상인 곳                                                |            |       |       |          |
|                           | 3) 고속도로 일반구간                                                                | 31         | 37    | 44    | SN       |
|                           | 4) 상업용 자동차 교통량이 250대/차로/일 이상인 도로의 주요 교차로 접근부                                |            |       |       |          |
| S3<br>(평균 조건)             | 직선 또는 곡선 반경이 큰 구간으로서 다음에 해당되는 도로                                            | 32         | 47    | 57    | BPN      |
|                           | 1)주요 간선도로 또는 자동차 전용도로                                                       |            |       |       |          |
|                           | 2)상업용 자동차 교통량이 250대/차로/일 이상인 일반도로                                           | 21         | 31    | 37    | SN       |
|                           |                                                                             |            |       |       |          |
| S4<br>(마찰력이 중요하지 않은 구간)   | 교통량이 적은 도로의 일반 직선 구간                                                        | 32         | 42    | 47    | BPN      |
|                           |                                                                             | 21         | 27    | 31    | SN       |

**Table 1** Minimum required friction coefficient according to the interval

일반적인 고속도로의 경우 S2구간에 속한다고 할 수 있다. 기존의 아스팔트 재질만으로도 최소 요구 마찰계수를 충족하기 때문에 추가적인 미끄럼 방지포장에 대한 근거가 되지 않는다. 그리고 미끄럼 방지 포장의 설치 조건이 곡선 주행 및 사고 발생을 방지하는 목적으로 설치되어야 한다고 규정되어 있기 때문에, 실제 도입가능성이 낮다고 판단된다. 또한 수지계 미끄럼 방지포장의 경우 우천 시에 일반도로

보다 더 마찰계수가 낮아져 사고의 위험성이 더욱 높아진다는 단점이 존재함을 확인하였다.

따라서 기존보다 마찰계수가 높은 아스팔트 재질을 이용한 제작을 검토해보았다. 노면 포장별 차량의 제동경과시간 및 마찰계수에 관한 실험적 연구를 참고하여 아스팔트와 에코팔트의 마찰계수를 비교해보았다.<sup>6)</sup>

|                           | 50km/h  |         |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|
|                           | 실험1     | 실험2     | 실험3     |
| 제동초기속도(km/h)              | 48.3    | 44.3    | 47.8    |
| 제동시간(sec)                 | 1.93    | 1.73    | 1.81    |
| 평균 감속도(m/s <sup>2</sup> ) | -0.708g | -0.725g | -0.705g |
| 정지거리(m)                   | 11.9    | 9.8     | 11.3    |
| 활주 전 공주거리(m)              | 3.2     | 3.6     | 3.4     |
| 활주 전 공주시간(sec)            | 0.27    | 0.35    | 0.32    |

**Table 2** Experimental results in dry general asphalt concrete

|                           | 50km/h  |         |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|
|                           | 실험1     | 실험2     | 실험3     |
| 제동초기속도(km/h)              | 43.9    | 45.0    | 44.8    |
| 제동시간(sec)                 | 2.09    | 2.37    | 2.37    |
| 평균 감속도(m/s <sup>2</sup> ) | -0.593g | -0.536g | -0.534g |
| 정지거리(m)                   | 12.5    | 14.1    | 15.0    |
| 활주 전 공주거리(m)              | 3.7     | 4.0     | 3.7     |
| 활주 전 공주시간(sec)            | 0.34    | 0.36    | 0.33    |

**Table 3** Experimental results in wet general asphalt concrete

|                           | 50km/h  |         |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|
|                           | 실험1     | 실험2     | 실험3     |
| 제동초기속도(km/h)              | 45.9    | 47.2    | 47.3    |
| 제동시간(sec)                 | 1.91    | 2.05    | 2.03    |
| 평균 감속도(m/s <sup>2</sup> ) | -0.680g | -0.651g | -0.659g |
| 정지거리(m)                   | 8.6     | 9.1     | 8.7     |
| 활주 전 공주거리(m)              | 2.5     | 3.1     | 3.3     |
| 활주 전 공주시간(sec)            | 0.21    | 0.27    |         |

**Table 4** Experimental results in ecophalt

하이패스의 일반적인 통과속도인 50km/h를 기준으로 비교했을 때, 건조한 일반 아스팔트가 가장 높은 평균 감속도를 보이나, 습한 일반 아스콘과 함께 보았을 때 큰 편차를 보인다. 에코팔트의 경우 우천 시 빗물이 포장체 내에 흡수 및 배수되므로 미끄럼 저항에 대한 편차가 매우 적다. 따라서 제품의 겉 재질을 에코팔트로 선정, 그 아래에 불투수층 재질이 깔려있는 형태로 제작하도록 하였다.

6) Lim, Chang-Sik·Choi, Yang-Won, 2010, “The Experimental Study on the Transient Brake Time of Vehicles by Road Pavement and Friction Coefficient”

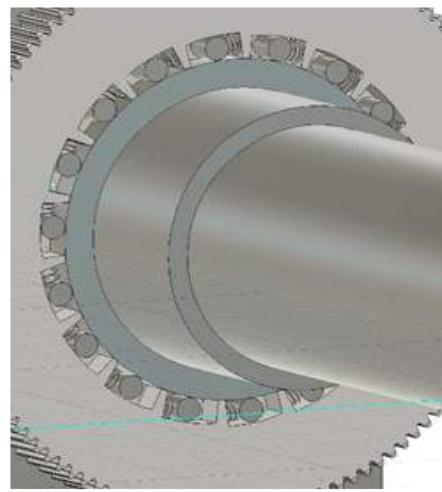
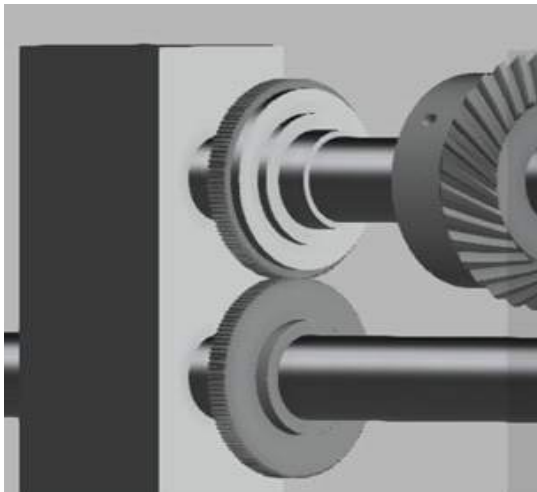
## 2-2 베벨기어



**Fig. 9** Bevel gear

접촉부에서 회수한 운동에너지는 벨트 풀리와 풀리에 연결된 축을 회전 시킨다. 베벨기어는 2쌍으로 이루어져 하나는 동일 축 회전을 하고, 다른 베벨기어는 운동 방향을 직각 방향으로 꺾어준다. 베벨 기어의 효율 계수는 0.98이상으로 에너지 손실에 대한 우려가 적은 부품이다.

## 2-3 클러치



**Fig. 10** Clutch

접촉부를 통해 전달된 베벨기어는 축을 함께 회전시키고, 클러치로 전달된다. 이때 회전축이 역방향으로 회전할 염려를 방지하기 위해 프리휠 구조를 가진 클러치 구조를 사용하였다. 회전 축이 정방향으로 회전하게 되면 클러치 내부에 존재하는 스프링이 팽창하여 클러치가 맞물려 돌아가게 된다. 하지만 역방향이나 정지해있는 경우에는 클러치 내부에 존재하는 스프링이 압축하여 틈이 생기고 이로 인해 메인 축이 회전하지 않는다.

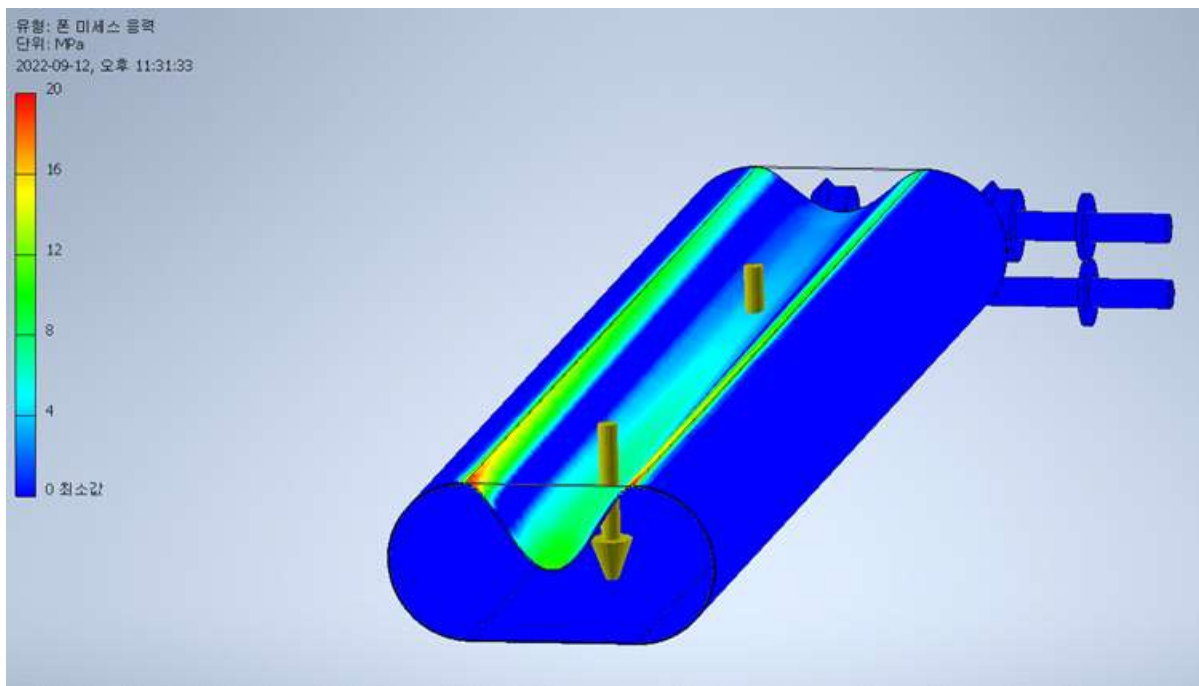
### 3. 안전성 검토

#### 3.1 안전 계수 선정

우리가 설계하고자 톨게이트 에너지 하베스팅 시스템의 경우에는 도로 밑에 발전장치를 매립하고 차량이 벨트 위를 지나가면서 마찰력을 작용해 발전한다. 매립을 하기 때문에 파손 시 수리 기간이 비교적 길며 차량이 움직이면서 하중을 가하는 동하중이다. 또한 벨트에 고무 재질을 사용하여 마찰력을 회수하는 만큼 재료 강도가 낮으므로 일반적인 안전계수보다 높은 수준인 안전계수를 4로 설정하였다.

#### 3.2 정적 해석을 통한 안전성 검토

앞서 가정한 차량의 무게 1450kg와 바퀴 사이의 간격 1.5m를 두고 차량 하중에 따른 벨트 처짐의 안전성을 검토해보았다. 각 바퀴에 균일한 하중이 가해진다고 가정하면, 각 바퀴당 약 3553N 하중이 가해진다. 이를 벨트 중앙을 기준으로 차량이 작용하는 하중에 대한 정적해석을 진행했다.



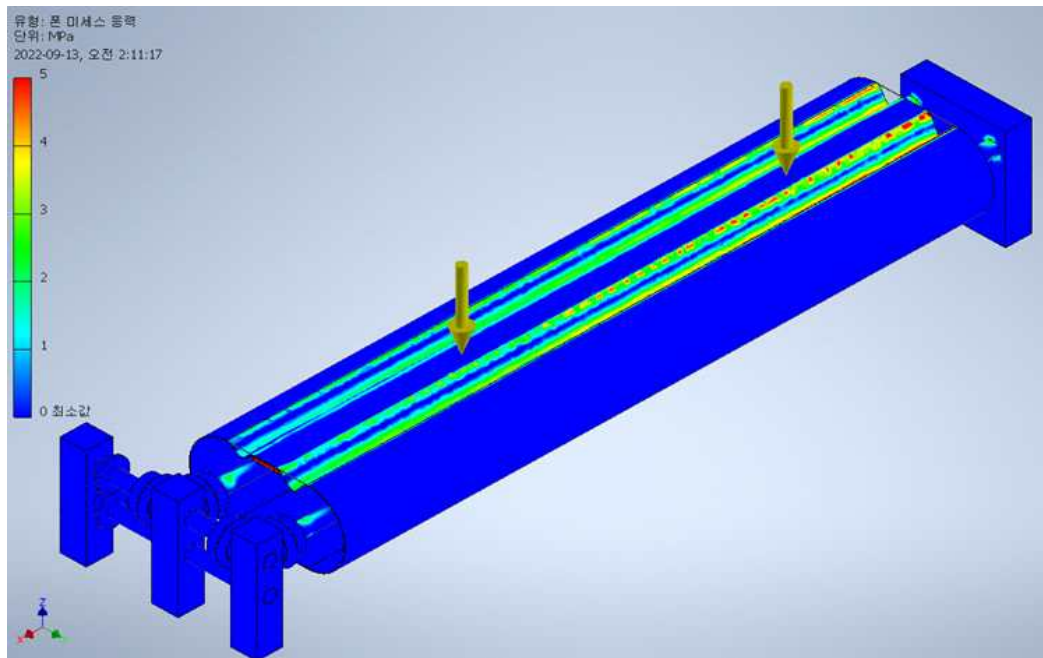
**Fig. 11** Stress analysis of supplemented belts-1

정적해석을 진행한 결과 벨트에 작용하는 하중은 20MPa에 육박하는 수준으로 나타났다. 이는 초기 설계과정에서 예상한 것처럼 안전성에 문제가 있음을 판단하였고 벨트 처짐을 방지하기 위한 대책인 롤러를 설계했다.

### 3.3 해결방안

Fig. 5와 같이 차량의 하중에 따른 벨트 처짐을 보완하기 위하여 풀리 사이에 위치할 수 있는 추가적인 롤러를 설치하였다.

사진에 보이는 것과 같이 풀리 사이의 공간에 6개의 작은 롤러들을 삽입하였다. 롤러 설치 후 정적해석을 통해 안전성을 다시 검토해보았다.



**Fig. 12** Stress analysis of supplemented belts-2

롤러를 설치한 결과 벨트에 작용하는 폰 미세스 응력이 5MPa 정도로 감소하였다. 이에 설정한 안전계수 4를 적용하더라도 평균적인 고무의 항복 강도인 27MPa를 넘지 않는 것을 알 수 있다.

추가적으로 일반 고무 재질을 사용하는 것이 아니라, 카탈로그 상 아라미드 섬유로 강화 된 고무를 사용하는 것이기 때문에 연성이 낮더라도 항복강도가 높아지므로 벨트에 대한 안전성을 확보하였다.

## 4. 기대효과

지금까지 톨게이트에서 차량 감속에 의한 에너지 하베스팅 시스템을 설계하고 안정성 분석을 확인하였다. 3.에서는 설계를 바탕으로 적용을 했을 때 얻을 수 있는 수치를 알아보며 실현 가능성을 검토해볼 것이다. 또한, 유사한 특허를 찾아 특허 회피 전략을 마련해 볼 것이다.

### 4.1 최종 설계 결과물의 장단점

‘톨게이트 에너지 하베스팅 시스템’은 진입 구간에서 감속을 시도하는 차량과의 마찰에너지를 안전하게 회수하여 전력을 생산하는 장치이다. 이는 톨게이트 안내 전광판, 기상, 교통 상황 안내 등 주변 장치에 전력을 공급함으로써 에너지 절약에 기여할 수 있다. 또한, 전력을 한곳에 모아 휴게소 충전소에 활용 될 수 있으며, 넓은 차원에서 실생활에서 버려지는 에너지 하베스팅 기술을 점진적으로 늘려감으로써 국가 차원에서 그린 에너지 절약을 선도하는 데 긍정적인 영향을 가져다 줄 것으로 생각한다.

우리 시스템의 장점은 총 3가지이다.

- 1) 본 설계 시스템은 시간과 상황에 제약 받지 않고 지속적인 에너지 발전이 가능하다. 예로 소수력 발전의 경우 지속적으로 물 사용자가 뒷받침되어야 한다. 하지만 사용 시간이 제한적이기에 가동 시간이 극히 제한적이다.
- 2) 시스템에서 클러치를 사용하여 접촉부로부터 얻은 에너지를 동력 장치로 운반하도록 설계하였다. 이는 동력 장치의 각속도를 일정하게 유지시켜 에너지 손실을 최소화할 수 있다.
- 3) 도로의 차면과 시스템은 높이 차가 존재한다. 우리는 사이의 덮개를 사용해 빗물과 오염물에 대한 위험성을 줄이고, 차량 운전자에게 안정적인 승차감을 제공할 수 있다.

본 설계 메커니즘에는 2가지 단점이 존재한다.

- 1) 매립형 시스템이기 때문에 마모와 수명 주기로 교체 시 교통 통제가 필요하다. 따라서 수명이 긴 부품과 비용을 고려하여 재질 선정에 보강 빈도를 줄여야 할 것이다.
- 2) 정적 해석 시에는 구조적인 결함이 발견되지 않았지만, 날씨와 같은 외부 변수 및 운전자의 부주의나 운전 습관에 따른 안정성을 보장하지 못했다.

#### 4.2 발전 방식 및 발전량, 효율

시스템은 차량의 마찰에너지를 통해 동력 에너지로 변환된다. 벨트와 바퀴간의 마찰로 열이나 소리로 빠져나가는 에너지는 없다고 가정한다. 차량 1대의 질량은 k5 공차 중량 1450kg, 차량의 전륜과 후륜의 하중은 각각 725kg을 갖는다. 전륜과 후륜이 접촉부를 지나 차량 한대가 모두 지나갔을 때 얻는 에너지는<sup>7)</sup>

$$\Delta KE = \frac{1}{2}mv^2 = \mu Ns = \mu (mg)s$$

$$E = 0.8 * 1450kg * 9.81m/s^2 * 0.3m = 3,414J$$

하이패스 한 차로 당 처리 용량이 시간당 1천100대를 지난다는 통계를 바탕으로 1쌍의 시스템에서 발생하는 총 에너지를 계산하면<sup>8)</sup>

$$E_{hour} = 3,755,400J$$

접촉부에서 발생한 에너지를 동력전달 장치로 이동할 때 발생하는 손실을 계산해보겠다. 우선, 베벨 기어에 의해 동력 방향을 전환시켜 준다. 기어의 효율은 0.98을 가지며, 1쌍의 베벨 기어와 평기어를 가

---

7) Bong-Goo Rhee and Seong-Mo Oh, 2008, "Study on the Friction Characteristics for Automotive Tires", pp 1535~1539.

8) 주문정,ZDNET Korea, 2020, "주요 고속도로 톨게이트 시속 80km 통과 가능해진다"

지므로 2번의 손실이 발생한다.

$$eg= 0.98*0.99=0.9702$$

또한 클러치에서의 에너지 손실을 정확히 알 수 없기에 여기서의 에너지 효율을 0.9라고 가정한다. 이를 바탕으로 차로 당 시간별, 일별 총 에너지 수확량을 계산해보면

$$E_{hour}=3,279,140J$$

$$E_{day}=78,699,364J$$

차량 통행이 많은 서울 TG기준 일일 통행량은 2017년 107,160대이며 왕복 25차로이다. 따라서 전체 수확량은 7,667MJ이다. 이는 2.13MWh로 2021년 9월 우리나라 전체 수력발전량인 80,731,547kWh의 대략 0.003%에 해당하는 수확량이다.9)

#### 4.3 추가 발전 방안

1) 우리 시스템의 궁극적인 목적은 차량에서 발생하는 에너지를 회수해 저장하여 활용할 수 있는 것에 있다. 시스템에서 한대당 얻을 수 있는 에너지만으로는 유의미한 발전 가동을 지속하는데 한계가 있다. 따라서 클러치를 이용한 여러 시스템을 한 곳으로 모아 지속 가능한 발전을 이루도록 해야할 필요가 있다.

2) 시스템 접촉부의 마찰계수를 높이기 위해서 그루빙(Grooving)을 활용할 수 있다. 그루빙은 도로 및 활주로 포장 표면에 일정한 규격의 홈을 형성하는 공법으로 미끄럼 방지를 목적으로 도로에서 자주 사용된다.

#### 4.5 특허



Fig. 13 Patents

9) “한국수력원자력(주)\_수력양수 발전량 및 이용률”,2021,한국수력원자력(주)

## 특허침해 여부 판단

이 특허는 도로에서 압전 소자의 발전 효율을 높일 수 있는 방식으로 에너지 하베스팅 장치를 제작하였다. 진동의 움직임에 따라 상하로 움직이는 막대부가 특징이다. 우리는 동력을 기반으로 한 에너지 하베스팅 장치이며, 벨트와 벨트 풀리로 구성되어 바퀴와 접촉부와의 마찰에너지를 회수하는 것을 목표로 한다. 바퀴와 접촉부의 회전은 반대 방향이고, 회수된 동력은 클러치를 통해 에너지 손실을 최소화하여 동력 전달 장치에 전달 된다. 따라서 특허침해와 무관하다.

도로 및 압전 소자의 내구성을 유지하면서 발전 효율을 높일 수 있는 도로용 에너지 하베스팅 장치가 개시된다. 개시된 도로용 에너지 하베스팅 장치는 상부가 개방된 하우징; 상기 상부와 탄성체로 연결되며, 도로의 진동에 따라 상하로 움직이는 진동 전달부; 일면에 압전소자를 구비하며, 상기 하우징 내부에 마련된 플레이트; 및 상기 압전소자 또는 상기 플레이트와 접촉 상태를 유지하며, 상기 진동 전달부의 움직임에 따라 상하로 움직이는 막대부를 포함한다.

## 특허침해 여부 판단

이 특허는 발전 장치의 회전체의 마찰면 일부를 고속도로의 도로면 위로 돌출되도록 설치하여 바퀴와의 마찰력을 발생시키는 것이 특징이다. 청구 1항의 일부 내용이 우리 시스템에 적용된다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 본 설계는 롤러가 아닌 트레드밀 방식의 구조로 바퀴와 접촉하는 면적을 극대화하여 더 많은 동력 에너지 회수를 추구하고자 한다. 따라서 넓은 범위의 균등침해이나 간접침해 요건 성립의 가능성이 있을 것으로 생각된다. 직접 침해로는 판단되지 않는다.

## 후 기

이번 제 12회 전국 학생설계경진대회는 학사 과정동안 배웠던 일련의 공학적 지식을 실제 설계에 적용해 볼 수 있는 소중한 기회였습니다. 특히 '에너지 하베스팅'이라는 현재 사회에서 가장 화두가 되고 있는 주제에 대해 깊게 생각해봄으로써 기계공학이 나아가야 할 방향성 정립은 물론 사회에 선한 영향력을 끼치는 엔지니어란 무엇인지에 대해서도 고민해 볼 수 있는 계기가 되었습니다.

이렇듯 우리 팀에게 소중한 기회를 제공해주신 대한기계학회 관계자분들과 지도교수님인 문두환교수님께 이 자리를 빌어 감사하다는 말씀을 드립니다. 저희의 아이디어가 실제로 반영되어 에너지 하베스팅을 통한 지속가능한 발전에 기여하길 소망합니다.

## 참고문헌

- 1) "재생에너지 3020 이행계획(안)" , 2017, 산업통상자원부, pp. 2.
- 2) 고속도로 교통안전시설물 설치 메뉴얼 19쪽 (다. 설치 예시도 그림 12)
- 3) 도로교통공단, 법정 속도와 안전거리, [https://www.koroad.or.kr/kp\\_web/knCarSafe1-03.do](https://www.koroad.or.kr/kp_web/knCarSafe1-03.do)
- 4) Cristian MINCA, 2015, "THE DETERMINATION AND ANALYSIS OF TIRE CONTACT SURFACE GEOMETRIC PARAMETERS"
- 5) "Design Manual Timing Belt\_V832-E", Mitsubishi, p.21
- 6) Lim, Chang-Sik·Choi, Yang-Won, 2010, "The Experimental Study on the Transient Brake Time of Vehicles"



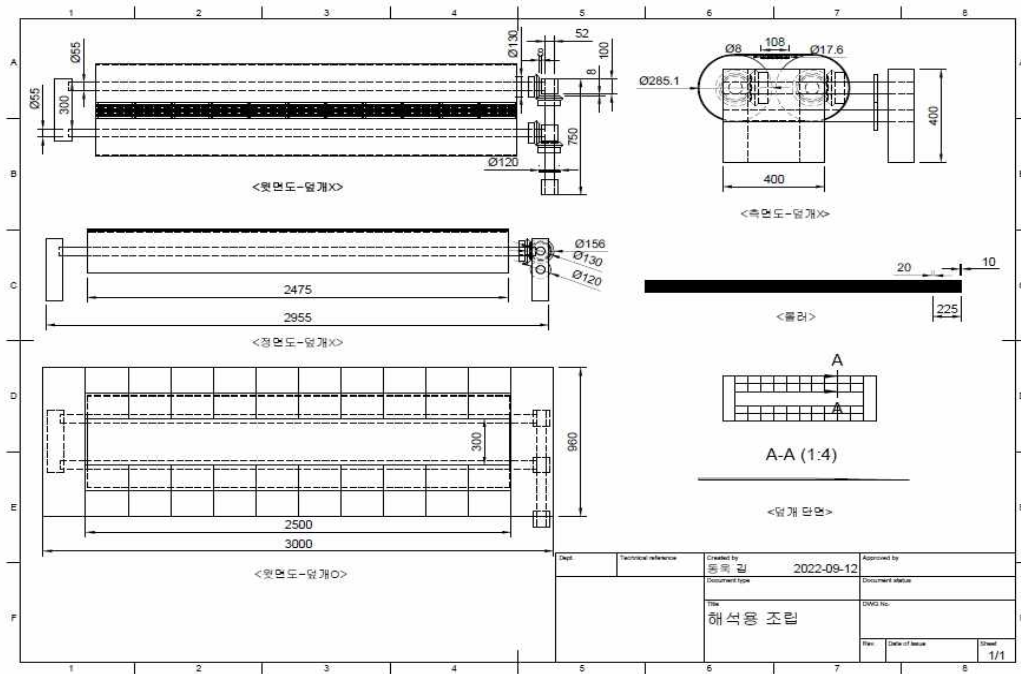
by Road Pavement and Friction Coefficient”

7) Bong-Goo Rhee and Seong-Mo Oh, 2008, “Study on the Friction Characteristics for Automotive Tires”, pp 1535~1539.

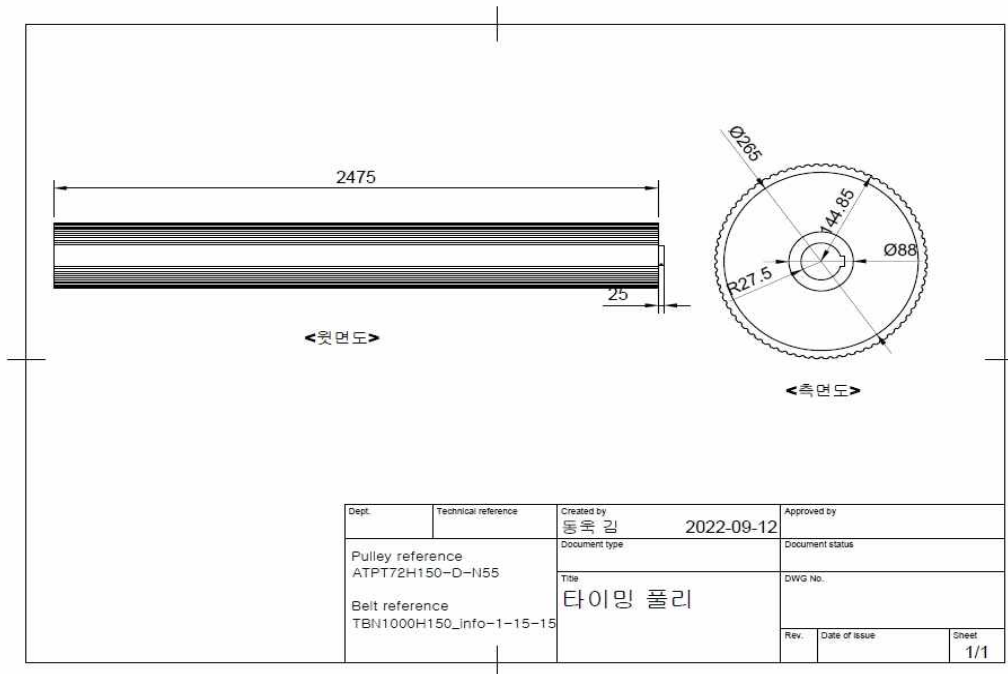
8) 주문정,ZDNET Korea, 2020, "주요 고속도로 톨게이트 시속 80km 통과 가능해진다"

9) “한국수력원자력(주)\_수력양수 발전량 및 이용률”,2021,한국수력원자력(주)

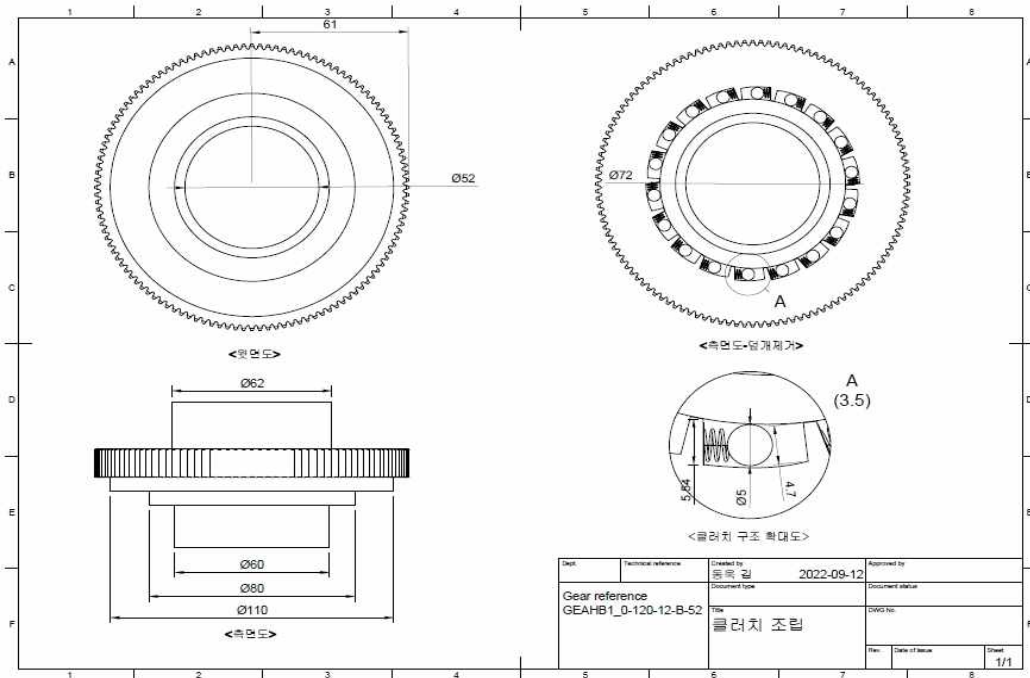
## 부록



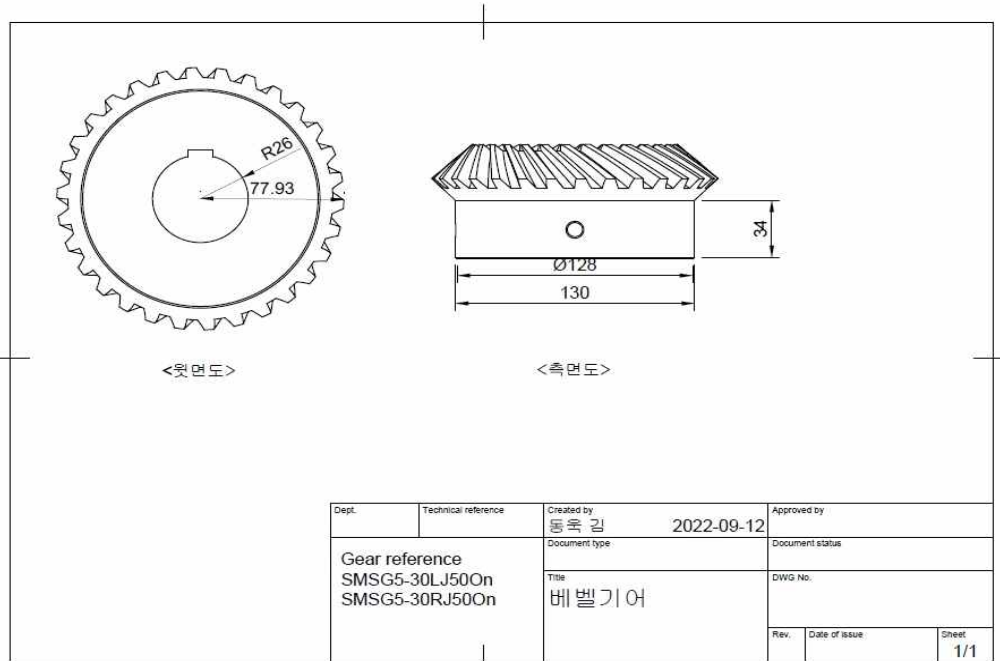
### 부록1. 조립도



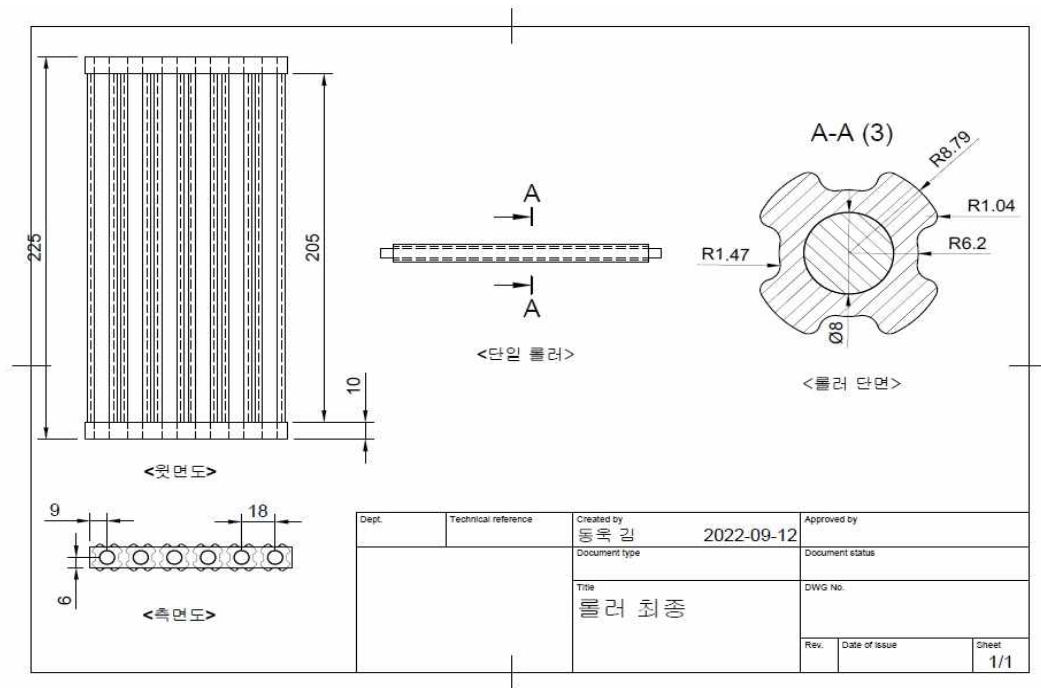
### 부록2. 타이밍 벨트



부록3. 클러치



부록4. 베벨기어



부록5, 롤러