

대한기계학회 주최

제12회 전국학생설계경진대회(2022년)

설계 최종 보고서

참가부	고등부 (<input checked="" type="radio"/>)				
참가분야	공모주제 (<input checked="" type="radio"/>) / 자유주제 (<input type="radio"/>)				
참가팀명	Singularity				
설계제목	세 가지 발전방식을 이용한 차량 현가장치용 에너지 하베스터				
지도교수/교사	(소속) 하나고등학교 (성명) 유상미				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	박시환	하나고등학교			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	박시환	하나고등학교 / 2학년	
2	신우현	하나고등학교 / 2학년	
3	이소민	하나고등학교 / 1학년	
4	이승준	하나고등학교 / 1학년	
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 (<input checked="" type="radio"/>) / 자유주제 (<input type="radio"/>)
참가팀명	Singularity
설계제목	세 가지 발전 방식을 이용한 차량 현가장치용 에너지 하베스터
대표자명	박시환
요약문	<p>최근 환경 문제에 대한 인식의 중요성이 강조되고 있으며, 지속 가능한 신재생 에너지 활용 방안이 환경 문제 해결 방안의 대표적인 예시이다. 이와 함께 효율적인 에너지 생산과 소비 방법에 관심이 대두되면서 에너지 하베스팅에 대한 연구도 활발해지는 추세이다. 이와 관련하여 본 팀은 현대 사회에서 자동차 사용량이 증가하고 있고 산술적으로 자동차 사용량이 많은 만큼 그로 인한 에너지 소비 역시 상당하다는 것을 인식했다. 때문에 자동차를 사용하는 와중 버려지는 에너지를 활용하여 에너지 발전을 유도한다면 에너지 효율에 있어 비약적인 이득을 얻을 수 있을 것이라 판단했다. 본 팀은 버려지는 에너지를 효율적으로 활용할 방법을 모색하던 중 자동차를 이용하여 하베스팅을 시도하기로 하였다. 차량 현가장치의 버려지는 에너지를 활용해 에너지 하베스팅 장치를 만든다면 보다 효율적인 에너지 활용을 할 수 있으리라 판단해 차량 현가장치용 에너지 하베스팅 장치를 설계했다. 자동차 현가장치에서 버려지는 에너지를 최대한 활용하기 위해 압전소자, 마찰대전, 전자기 유도 3가지 발전 방식으로 자동차 서스펜션에 부착 후, 모두 활용하여 에너지 밀도를 높이는 방식을 선택했다.</p>
설계프로젝트의 입상 이력	<p>※ 교외 출품실적이 있는 경우 작성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 출품작명 : - - 대회명 : - - 수상내역 : -

1. 설계의 필요성 및 목적

인류 역사에서 산업 혁명이 일어나며 산업화가 본격적으로 진행된 이후, 인류는 급속한 발전에 대한 반대 급부로서 발생하는 환경 오염 문제를 인식하기 시작하였다. 이에 인류는 환경을 보존하기 위한 노력을 기울여왔고 이 중요성은 해가 지날수록 강조되고 있다. 대표적으로 지속 가능한 신재생 에너지를 활용하는 방안이 채택되고 있는데 이 중 많은 것이 에너지 하베스팅 방식에 의존한다. 에너지 하베스팅이란 일상적으로 버려지거나 사용하지 않은 작은 에너지를 수확하여 사용 가능한 전기 에너지로 변환해주는 기술이며 대개 에너지 발생, 에너지 변환, 에너지 저장, 에너지 소비의 순서로 진행된다. 이러한 에너지 하베스팅은 자연의 에너지를 활용하기 때문에 공급이 안정적인 면이 있으며 지속 가능성이 뛰어나고 친환경적이라는 장점이 있기 때문에 각광받고있다. 이와 같은 이유로 본 팀은 환경 문제들을 해결하기 위해 에너지 하베스터를 설계하고자 한다.

상술한 문제를 해결하고자 본 팀은 일상적으로 많이 사용하고, 버려지는 에너지량이 큰 자동차를 에너지 하베스팅의 대상으로 하였다. 국토교통부에 따르면 2021년 기준 대한민국 자동차 등록대수는 2491만 대로 전체 인구의 절반 가까운 사람들이 자동차를 한 대씩 소유하고 있는 셈이다. 이렇듯 다수의 사람들이 일상적으로 이용하는 자동차에서 에너지 하베스팅을 통한 발전을 하고, 생성된 전기를 하이브리드 자동차의 배터리를 충전하는 등의 방법으로 사용하는 것이 에너지 하베스팅에 대한 적절한 대상 설정이라고 생각된다.



김지영 인턴 / 20190715 트위터 @yonhap_graphics 페이스북 tuneey.kr/LeYN1

구체적으로는 자동차의 서스펜션에 전달되는 진동을 이용한 에너지 하베스터를 설계하려 한다. 압전소자, 전자기 유도, 마찰전기의 세 가지 발전소자를 자동차 서스펜션부에 부착 후, 모두 활용하여 에너지 밀도를 높이는 것을 목적으로 하였다.

2. 설계 핵심 내용

(1) 설계 문제의 정의

1절에서 언급한 바와 같이 본 기계장치는 자동차가 운행할 때 발생하여 서스펜션에 전달되는 진동을 이용해 에너지 하베스팅을 하는 장치이다. 설계 문제는 안정적이고 효율적인 방법으로 에너지 하베스팅 구조를 만드는 것이다.

설계가 필요한 구조는 다음과 같다.

- 비정상 스트림 유동이 적용된 유체-고체 마찰 대전 소자
- 선형 전자기식 진동 에너지 하베스터
- 압전소자의 설치구조

(2) 설계의 독창성 및 접근 방법

1) 설계 방법 및 배경

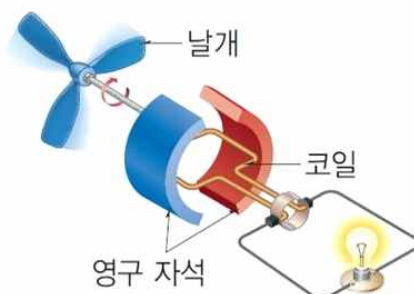
1. 마찰대전

전자친화도가 서로 다른 두 물질을 접촉시켰을 때 두 물체는 각각의 전자친화도에 따라 서로 다른 전하로 대전된다. 이때 전자의 이동은 마찰열로 인한 열전효과로 인해 발생하기에 두 물체를 강하게 마찰시킬 때 전자의 이동이 더 원활해지며, 그

정도는 $\xi = \frac{S}{\sqrt{\rho ck}}$ 로 정의되는 triboelectric factor로 알 수 있다. 이때 마찰대전 효과는 고체와 고체뿐만 아니라 고체와 액체, 액체와 액체, 기체와 기체 사이에서도 발생할 수 있다. 서로 다른 물체가 접촉 혹은 마찰 되어 접촉면에서 전하들이 편극되었을 때 물체를 분리하면 표면에는 서로 다른 전하들이 대전되며, 전하량의 변화에서 기인하는 기전력으로 외부 회로에 전류를 흐르게 할 수 있으며, 이런 현상을 통해 전기에너지를 저장하거나 사용할 수 있다.

2. 전자기 유도

전자기 유도는 자기장이 변하는 공간에서 기전력이 발생하는 현상을 의미한다. 이 기전력을 사용하여 외부 회로에 전류를 흘려 전기에너지를 사용하는 것이 전자기 유도 발전이다. 풍력발전소, 화력발전소와 같이 일반적으로 전자기 유도를 사용하는 발전기는 아래 그림과 같이 대부분 영구자석 내부에서 코일을 회전시켜 전기에너지를 만들어내지만, 좁은 서스펜션 구조 내부에서 스트럿의 선형적인 진동을 사용하여 에너지 하베스팅을 하는 본 설계에서는 회전운동으로의 변환이 까다롭기에 선형운동을 그대로 사용하여 전자기 유도를 할 수 있는 구조를 고안해야 한다. 내부에 원기둥형 코일을 감고 주변에 영구자석을 설치하여 기전력을 발생시키려 한다.



[발전기의 원리]

3. 압전소자

압전효과는 물질에 외부 응력이 가해졌을 때 물질의 구조가 변형되고 자체적으로 전기 분극이 생기는 현상을 의미한다. 즉 외부에서 응력이 얼마나 가해졌는가와 더불어 물질의 미시상태가 결정하는 물질의 구조가 압전효과의 성능을 좌우한다. 현재, 압전소자와 관련된 연구 및 활용이 활발히 진행되고 있다. 가장 대표적인 활용분야는 가스레인지와 마이크이다. 또한 발전분야에서 압전소자는 크게 주목받고 있는데 운동화에 압전소자를 달아 전기를 만드는 방식 등이 제안된 바 있다. 압전소자를 사용하기 위해서는 일부러 힘을 가해야 해 에너지 전환 효율이 좋지 않다는 점이 단점으로 지적되어 왔으나, 압전소자를 쇼크 업소버에 적용하는 것으로 에너지를 발전하는 것과 더불어서 충분히 감쇠되지 않는 충격을 흡수하는데 사용될 수 있기에 두 가지 긍정적인 효과를 낼 수 있다는 점이 이 설계의 주요한 부분 중 하나이다.

2) 설계의 독창성

자동차와 그로부터 파생되는, 메탄가스를 위시한 여러 유해 물질들은 지구 환경 파괴의 주범으로 오래 전부터 지목되어 왔다. 이에 따라서 인류는 이를 해결하기 위하여 많은 노력들을 기울여왔다. 대표적으로 현재 빠른 속도로 상용화 되고 있는 하이브리드 차와 전기차가 있다. 하이브리드 자동차는 두 가지 이상의 구동계를 사용하도록 만들어진 자동차로, 보통은 내연 기관 엔진과 전기모터를 같이 사용한다. 내연 기관이 비효율적일 때 전기 모터가 이를 보완하는 방향으로 주로 작동한다. 따라서 내연 기관을 사용하는 시간이 줄어들고 이에 따라 매연 배출량이 적어 친환경적인 성격을 가진다. 전기차의 경우는 내연기관을 아예 사용하지 않고 순수하게 전기만 사용하여 구동하기 때문에 더욱 이산화탄소 배출량 감소에 큰 도움을 준다. 시간이 지날수록 친환경에 대한 사람들의 인식 및 관심이 긍정적이고 급진적인 방향으로 변하고 있기 때문에 이러한 친환경 차들에 대한 수요도 꾸준히 증가하고 있다. 본 팀은 이러한 세태 속에서 개선점이 있음을 알아냈다.

현재 위치럼 자동차를 친환경적인 제품으로 만들기 위한 시도는 대부분 자동차의 구동 방식이나 재료 등을 바꾸는 형태를 취하고 있다. 그러나 이에 대한 연구를 진행하고 그 결과를 실제 자동차에 적용하여 신제품을 출시하며 상용화 시킬 때까지는 매우 긴 시간이 요구된다. 단순히 구동부만 새로운 것으로 바꾸면 되는 것이 아니라 그 변화에 따라 야기될 수 있는 여러 문제점들을 자동차의 모든 부분에서 찾아내어 전반적인 수정을 거쳐야하기 때문이다. 따라서 이러한 방식에만 의존하여 자동차를 친환경적으로 만들기에는 시간적인 제약이 따를 수 있다. 본 팀은 이를 해결하기 위한 방법으로써, 다른 친환경 분야에서 활발히 연구 및 사용되고 있는 에너지 하베스팅 방식을 자동차에도 적용해보기로 하였다.

상술했듯 에너지 하베스팅은 버려지는 에너지를 수집하여 전기 에너지로 바꿔 쓰는 기술이다. 해당 방식을 채택함으로써, 우리는 자동차의 구동 방식을 바꾸는 기존의 것과 독립적으로 추가적인 에너지 생산을 이뤄낼 수 있다는 장점이 있다는 결론을 도출하였다. 서스펜션 부분을 활용하기 때문에 차의 구동부나 그 외의 형태 등이 바뀌어도 쉽게 적용 가능하다는 것이다. 서스펜션은 자동차의 작동을 위해 필수적으로 요구되는 부분이기 때문에 해당 기술은 자동차가 존재하는 한 영구적으로 사용될 수 있다는 장점 또한 있다. 물론, 이전에도 서스펜션을 이용한 발전 방식에 대한 연구가 없었던 것은 아니다. 그러나 본 팀의 기술은 3가지 발전 방식이 융합되어 작동하는 방식이기 때문에 구동시에 큰 효율성과 대처 유연성을 지니는 등 기존의 기술과 차별되는 독창성을 가진다.

[참고] 참고문헌 (6), (7)

해당 논문들은 각각의 방식을 사용하여 서스펜션형 발전기에 대하여 다루고 있다. 대개 차량의 진동을 압전소자를 활용하여 에너지로 전환하는 방식이 많다. 그러나 대부분의 연구 결과, 예상치보다 적은 양의 에너지가 수확됐다는 것을 알 수 있다. 이를 기존의 방식 한 가지만을 이용하여 해결하기 위해서는 더욱 많은 전기로 전환이 가능한 대형 크기의 압전 소자를 활용하거나 효율이 더 좋은 모델을 사용해야 한다. 그러나 이 과정에서는 기술, 비용, 안전상의 한계점이 발생할 수 밖에 없다. 본 팀의 발전 장치는 압전 소자 뿐 아니라 마찰 전기와 전자기 발전까지 총 3가지의 발전 방식을 이용하기 때문에 최소한의 위험 부담으로 최대한의 효율을 제공할 수 있다.

또한, 마찰 전기를 활용한 발전의 경우, 대개 고체와 고체 사이에서의 마찰 전기를 다루는 경우가 많다. 그러나 본 팀은 유체와 고체 사이의 마찰 전기를 활용하는 방식을 채택하였다. 이를 통해, 마찰을 위한 기계를 추가할 필요 없이 기존에 서스펜션 구성 요소들만으로 발전을 해낼 수 있다는 독창성을 지닌다.

3) 설계의 제약조건 및 문제 해결 방법

<제약조건>

1. 마찰로 인한 마모와 효율 감소 문제

초기 설계 단계에서는 일반적인 고체-고체 마찰대전의 방식을 고려하였다. 그러나 고체-고체 마찰대전 방식의 경우 표면의 거칠기, 즉 표면적의 넓이에 성능이 의존된다. 그러나 쇼크 업소버와 서스펜션과 같이 진동이 많고, 마찰의 세기가 센 부분에 경우에는 마찰에 의해 많은 열이 발생하고 표면이 큰 폭으로 마모된다. 이때 표면의 거칠기에 변화가 생기게 되고, 이로 인한 성능 저하가 크게 나타난다.

<해결방안>

1. 고체-고체의 마찰보다 마모가 훨씬 적게 되는 액체-고체의 마찰대전을 활용하여 발전을 한다. 이때, 표면의 거칠기 등 표면의 변화가 적고 훨씬 유동적이며 안정적인 발전을 할 수 있게 된다.

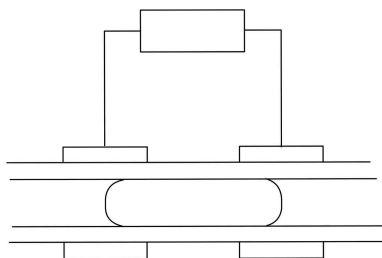
<경제성>

스트럼 유동에 기반한 유체 마찰 발전소자의 특성상, 정상유동보다 시간에 따라 변하는 비정상 유동에서 출력이 최대 70배 증가하는 특성을 보인다. 도로 노면의 상태와 자동차의 속도, 무게등에 따라 진동수와 쇼크 업소버 내부의 유동이 계속해서 변하는 본 설계에서 유체 마찰 발전소자를 사용하는 것은 내부 부품의 마모를 줄이는 것 뿐만이 아니라 에너지 효율의 측면에서도 긍정적으로 볼 수 있다.

(3) 설계 내용

1. 마찰대전

상술했듯이 설계 초기에는 스트럿 주위에 마찰대전 막을 돌려 자동차가 운행 중 진동할 때 스트럿의 상하운동을 통해 마찰대전 발전을 시도하려 했으나, 이는 지속적인 마찰에 의한 열 발생과 마모에 관한 문제가 있어 이를 해결하기 위한 방법으로 유체-고체 마찰대전 발전을 구상하였다. 그래서 마찰대전 발전의 위치를 스트럿에서 쇼크 업소버 내부로 바꾸게 되었다. 쇼크 업소버 내부의 완충액과 쇼크 업소버 실린더 벽면의 마찰을 통해 마찰대전을 하고, 교차하여 이격되게 배치된 2쌍의 전극에서 전기에너지를 모으게 된다. 설계 초기에는 전기음성도 차이가 클 수 있게 PVC 필름을 부착하려 했으나, 계속된 충격에 의한 고장의 위험이 있고, 쇼크 업소버의 안정적인 운행에 방해가 될 수 있다는 판단 하에 쇼크 업소버의 실린더 벽면과 완충액이 직접 마찰하여 대전하는 방식으로 설계를 변경하였다.



위 그림은 유체-고체 마찰대전의 원리를 설명한 그림으로, 판 사이에 흘러가는 물방울의 단면을 그린 것이다. 물방울이 실린

더를 통해 지나가면서 물방울과 실린더가 서로 다른 전하로 대전되고 외부에 쌓여 있는 전극을 통해 전하가 모여서 외부 회로를 통해 전류가 흘러 전기에너지를 저장하는 구조이다

2. 전자기 유도

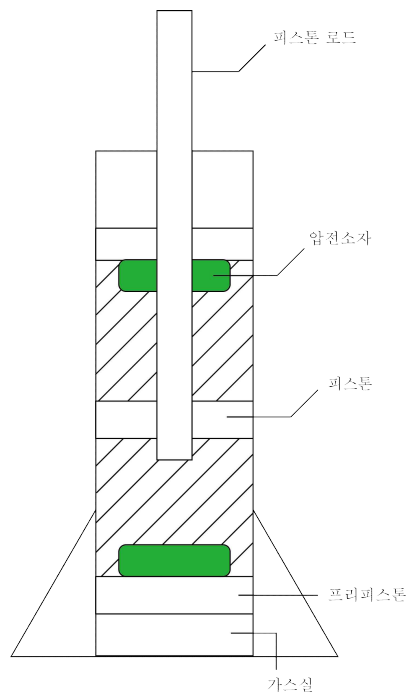
두 번째 방식은 전자기 유도를 활용하는 것이다. 전자기 유도는 자기장이 변할 때 기전력이 발생하는 현상을 이용한 것으로 자석을 코일에 가깝게 하거나 멀게 하여 전류를 발생시킨다. 이때 유도기전력의 세기는 코일의 감은 수가 많을수록, 자기장의 세기가 센 자석일수록, 자석과 코일의 상대적 속력이 클수록 크다. 전자기 유도 법칙을 통해 인류가 전기를 산업적으로 사용할 수 있게 되었을 만큼 그 대표적인 활용 방안이 발전기이다. 따라서 본 팀은 전자기 유도 방식을 두 번째 발전 방식을 채택하였다.

기본 구조는 이러하다. 외력에 의해서, 즉 차량 운행 중에서는 노면의 요철이나 자동차 내부 진동에 의해 발생하는 힘을 통해 왕복 운동하는 샤프트에 양쪽 각각 10개씩의 자석을 배치한다. 이때, 자석은 모두 같은 방향으로 배치되는 것이 아니라 샤프트의 회전축과 평행한 방향의 축방향자석과 수직 방향의 수직축방향자석을 교대로 배치하여서 발전 시의 에너지 손실을 최소화하도록 한다. 이렇게 자석을 장착한 샤프트를 사용한 유압식 서스펜션을 제작하여 자동차에 적용한다. 해당 서스펜션을 장착한 자동차는 진행되는 동안 발생한 진동을 서스펜션이 흡수하게 되고 이 과정에서 샤프트와 바깥 프레임 사이에서 전자기 발전이 일어나 발전을 할 수 있게 된다.

자석을 배열하는 과정에서 최고의 성능을 활용하기 위해 본 팀은 할바흐 배열을 채택하였다. 할바흐 배열이란 1979년에 Klaus Halbach가 제안한 것으로써 강한 자기장을 얻기 위하여 고안되었다. 할바흐 배열은 자석의 자화벡터 방향을 연속적으로 축을 따라 회전시켜 자화하는 것으로 이 경우 원하는 한쪽 방향으로만 보다 강한 자기장을 가질 수 있게 된다.

3. 압전

압전소자를 통한 발전은 자동차 서스펜션에 진동이 전달되었을 때 피스톤 로드와 상하로 움직이며 완충액을 압축하게 된다. 이때의 압축응력이 압전 세라믹에 작용하게 되어서 압전효과가 발생하고 전기가 발생하게 된다. 피스톤이 압축될 때와 이완될 때 각각 완충액에 의해 압축될 수 있도록 오일실 상부와 프리피스톤 바로 윗 부분에 압전소자를 설치한다.



단통형 피스톤에 압전소자를 부착한 모습

3. 설계 수행 일정

설계 진행 내용	4월	5월	6월	7월	8월	9월
주제 확립 및 실험 설계	██████████					
중간보고서		██████████				
기계장치 설계			██████████			
설계 보완 및 모델링					██████████	
최종보고서 작성						██████████

4. 설계 결과물

(1) 최종 결과물 형상 및 작동원리

1. 마찰대전



단통형 실린더의 정면도

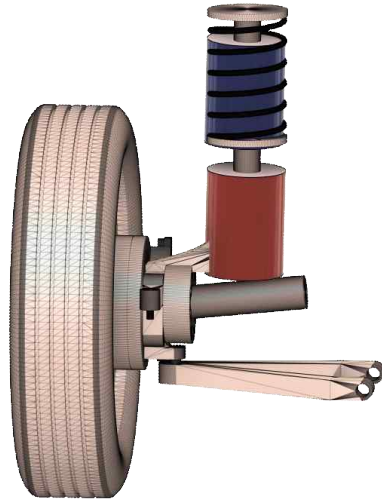


단통형 실린더의 측면도

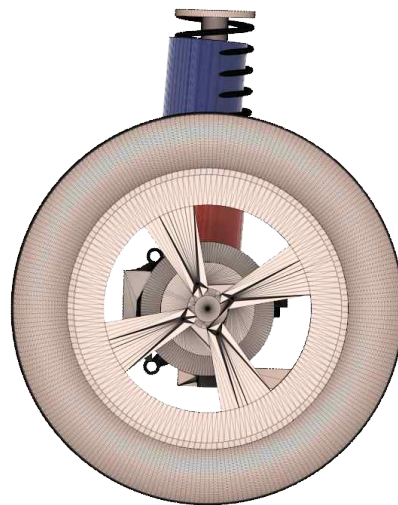
빨간색과 파란색은 각각 다른 극의 전극의 의미이며, 내부에서 완충액이 실린더의 벽면과 접촉하여 서로 다른 극으로 대전되고 전하들은 전극으로 모이게 되어 전기에너지가 저장된다. 이때 같은 색끼리의 전극은 직렬연결한다.

마찰 소자와 압전 소자가 내장되어 있는 쇼크 업소버 실린더는 일반적으로 쇼크 업소버가 부착되는 서스펜션의 스프링 안쪽에 부착되며, 전자기식 발전기는 자동차의 운행에 방해가 되지 않고, 샤프트와 마찰하지 않도록 로워암과 스프링 사이 스트

럿에 부착된다. 부착한 모습은 다음과 같다.



에너지 하베스터가 부착된 바퀴부의 모습 (정면)



에너지 하베스터가 부착된 바퀴부의 모습 (측면)

여기에서 빨간색 원통은 전자기식 에너지 하베스터를 의미하고 파란색 실린더는 쇼크 업소버 실린더를 의미한다.

(2) 최종설계 결과물의 장단점 및 의의

본 팀의 에너지 하베스팅 장치는 총 3가지의 발전 방식을 활용하여 에너지 하베스팅을 실시하기 때문에 큰 효율로 에너지를 생산할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 외력으로 무언가를 움직이게 해서 강제로 발전시키는 것이 아니라 자동차 구동 과정에서 자연스럽게 발생하는 운동을 활용하기 때문에 부작용이 적다. 또한, 자동차의 형태나 구동 방식이 바뀌더라도 쉽게 적용시킬 수 있다는 유연성도 지니고 있다.

설계상에서의 단점은 마찰전기를 활용한 발전 과정에서 사용할 수 있는 완충액에 제한이 있다는 점이다. 유체와 고체간의 전자전하도에 차이가 있어야 기전력이 만들어지기 때문이다. 따라서 실린더의 재질과 전자전하도 차이가 존재하는 물질을 완충재로 사용하여야 한다. 또한, 3가지 발전 방식을 사용하기 때문에 무게가 다소 무거워져 연비가 떨어질 수 있다.

그러나, 기존의 한가지 발전 방식을 사용하는 발전기보다 발전 효율 면에서는 탁월할 것이 확실하며, 자동차 전체 크기 스케일의 장치가 아니기 때문에 비교적 상용화도 쉽게 가능할 것이다. 또한, 서스펜션 주변부에서 기존의 차량 주행을 하는 데 있어서 큰 영향을 끼치지 않도록 설계하였고, 압전소자의 경우 충분히 감쇠되지 않은 진동을 에너지로 전환하기 때문에 이 과정에서 진동을 감쇠하는 역할까지 하여 더욱 안전한 차량 주행이 보장된다.

5. 활용방안 및 기대효과

활용방안은 기본적으로 제목에 있듯이 차량에 사용할 수 있다. 또한 기본적으로 차량뿐만이 아니라 전동 킥보드부터 스쿠터, 대형 화물차량까지 유압식 쇼크 업소버와 스프링식 현가장치를 사용하는 차량, 또는 장치라면 어디든지 이 설계를 적용 또는 응용하여 에너지 하베스팅을 이루어 낼 수 있을 것으로 기대한다. 본 설계에서는 기존에 있던 차량용 압전소자 발전 장치와는 다르게 두 가지 구조를 추가한 새로운 구조의 형태이기 때문에 기존 장치에 비하여 에너지 효율의 측면에서 상당한 이점을 가지고 있다. 현재 우리나라 정부를 비롯한 세계 각국에서 그린 뉴딜 등 친환경 에너지 및 전기차 장려 정책을 펼치고 있기 때문에 현재보다 전기를 이용한 교통수단이 많아지고, 더욱 발전할 것으로 보인다. 이러한 측면에서 전기자동차의 전기공급책이 다양화 될 필요가 있고, 우리의 설계가 전기차의 주요한 에너지 공급책으로 작용할 수 있을 것이라 기대한다. 또한, 친환경적으로 에너지를 만들어낸다는 측면에서도 우리의 설계는 미래의 교통인프라에 공헌할 수 있으리라 생각한다.

<참고문헌>

- (1) Ahn, Jee Hwan, et al. "Unsteady Streaming Flow Based Teng Using Hydrophobic Film Tube with Different Charge Affinity." *Nano Energy*, vol. 67, 2020, p. 104269., <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104269>.
- (2) Lin, Shiquan, et al. "Quantifying Electron-Transfer in Liquid-Solid Contact Electrification and the Formation of Electric Double-Layer." *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14278-9>.
- (3) Shin, Eui-Cheol, et al. "Derivation of a Governing Rule in Triboelectric Charging and Series from Thermoelectricity." *Physical Review Research*, vol. 4, no. 2, 2022, <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.4.023131>.
- (4) 장석명, 차상도, 이성호, 김봉섭, 성호경, 조홍제. (2001). 영구자석 선형 Halbach 배열의 특성 해석. 충남대학교. 한국기계연구원
- (5) 이정수, 김호영. (2016). 마찰전기를 이용한 에너지 하베스팅 기술. 소음·진동.
- (6) 전연도, 쫑민중. (2019). 전자기식 에너지 하베스터. 한국전기연구원
- (7) Doaa Al-Yafeai, Tariq Darabseh, and Abdel-Hamid I.Mourad. (2020). A State-Of-The-Art Review of Car Suspension-Based Piezoelectric Energy Harvesting Systems.