

마찰 대전 나노발전기를 이용한 무게 측정 시스템 Weight Measurement System using Triboelectric Nanogenerator

라 윤 상
(Yoonsang Ra)

최 동 휘
(Dongwhi Choi)

Kyung Hee University
fkdbstkd8745@khu.ac.kr
dongwhi.choi@khu.ac.kr

요 약

본 연구는 스프링과 TENG의 성질을 결합하여 무게를 측정할 수 있는 센서시스템을 제안한다. 질량이 중력에 의해 시스템에 가해질 때 스프링은 압축되며, 이에 따라 시스템에 내장된 TENG에서 마찰 전기가 생성된다. 이 출력되는 마찰 전기의 양을 분석하여 가해진 무게를 측정한다. 다양한 환경에서의 실험을 진행하여 다양한 무게 범위에서의 센서의 역할을 검증한다. 이를 통해 기존의 무게측정저울의 시스템과는 다른 측정 메커니즘을 제안하며, 제작의 간편성, 영구성 등 다양한 활용성을 보여준다.

키워드: 무게 측정, 마찰 대전, 나노발전기

Abstract

This study proposes a sensor that can measure weight by combining the properties of a spring and TENG. When a weight is applied and a spring compresses, friction will occur in a system and because of this friction, an electricity will be generated in the surrounding TENG. The applied weight can be calculated by analyzing the amount of triboelectric output. Experiments in various environments are conducted to verify the role of the sensor in different weight ranges. By these experiments, it will represent a different mechanism from existing weight measuring system and various applications.

Key words: Weight Measurement, Triboelectric Nanogenerator

1. 서론

최근 웨어러블 기기의 사용이 늘어나고 사물인터넷이 발전하면서 지속적이고 동시다발적으로 전력을 공급해주는 전력원에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다. 이러한 전력 공급을 위해 일상에서 발생하는 에너지를 수확하여 전기에너지로 변환하여 사용하는 기술이 각광받고 있다. 그 중 한가지 방법으로 마찰 전기를 활용하는 방법이 존재한다. 2012 년 Zhong Lin Whang 연구팀이 TENG 를 최초로 제안했다[1]. TENG (Triboelectric nanogenerator)란 두 물질이 접촉 및 분리되면서 생기는 마찰 전기를 이용하여 에너지를 생산하는 기술이다. 물질의 표면에 마찰대전현상으로 인해 전하가 생성되고 이 전하들에 전기적 유도가 발생하여 전류가 흐르게 된다[2]. TENG 는 주변환경에서 다양한 형태로 에너지를 수확해낼 수 있고, 높은 에너지 밀도, 친환경 적인 특징들로 각광을 받고 있다. 또한 TENG 는 아주 약한 접촉에도 마찰 전기를 출력해내기 때문에 출력되는 전력을 분석하여 센서로도 활용이 가능하다. 이는 기존의 기계적 압력 센서보다 훨씬 민감한 반응을 보이기 때문에, TEN 는 자가동력 뿐 아니라 센서로도 높은 활용가치를 가진다[3].

이러한 성질을 활용하여 스프링과 TENG 를 결합하면 스프링에 가해지는 힘에 따라 TENG 의 전기 출력 변화량이 정밀하게 변화하게 된다. 따라서 이 전기 출력량을 분석하면 스프링에 얼마만큼의 힘이 가해졌는지 알 수 있게 된다. 이러한 성질을 이용하면 스프링과 TENG 를 활용한 무게감지센서를 제작할 수 있다. 현재 사용되고 있는 저울의 종류는 천칭·기계식·전자식의 세 가지가 있다. 천칭은 지레의 원리를 이용해 무게를 측정하고 싶은 물체와 분동의 균형을 맞추으로써 무게를 측정한다. 기계식 저울에는 대표적으로 용수철저울을 들 수 있다. 스프링이 늘어난 정도에 따라 눈금이 올라가며, 관리에 소홀하면 오차가 생기기 쉽지만 정확하다. 전자 저울은 측정된 무게가 전기신호로 변환되어 지시되는 저울이며 현재 주로 가장 대중적으로 사용하고 있다. 전자 저울의 원리는 주로 로드셀 방식을 따른다. 로드셀이란 무게를 숫자로 표시하는 전자 저울에 필수적인 무게 측정 소자다. 그 원리는 압력이 가해지면 물체에 변형이 일어나는 현상을 이용하여 이 변형량을 변형측정장치가 측정한 다음 전기신호로 전환시킨 뒤 컴퓨터를 이용하여 디지털 신호로 바뀌어서 가해진 압력을 숫자로 표시한다. 압력이란 단위 면적당 가해진 힘이고 힘은 질량과 가속도의 곱이기 때문에 측정된 압력을 힘으로 전환하여 질량가속도로 나누면 가해진 압력에 해당하는 무게를 구할 수 있다.

이번연구에서는 기존 방식의 저울 이외에 새로운 무게 측정 메커니즘을 제안한다. 스프링을 이용한 구조를 뼈대로 삼고 마찰 전기를 이용한 무게 측정 방식에 대해 연구해보았다. 기본적으로 스프링이 압축되었다가 늘어나는 성질을 바탕으로 하고 스프링 주변에 마찰 대전이 가능한 전극이 겹치도록 해 놓는다. 스프링에 힘이 가해지면 주변 전극이 서로 교차하면서 마찰이 일어나고 이에 따라 전기가 생산되게 된다. 이번

XXXX

연구에서는 스프링 상수, 마찰되는 전극의 면적 변화 등의 조건을 제어해가며, 얼마만큼의 힘이 가해졌을 때 얼마만큼의 스프링 수축과 전기 출력이 발생하는지를 분석해보고 이들의 상관관계를 정리한다. 이들의 선형적인 관계를 분석하여 S-TENG 가 무게측정센서로서 정밀하게 활용될 수 있는지 확인한다.

스프링의 작동은 Hooke's law 가 기본적인 메커니즘으로 작용한다. 무게감지센서에 물체를 올려놓으면 그만큼의 힘(F)이 작용하고 사용되고 있는 용수철 상수에 비례하여 변위(x)가 조정된다. 주변의 마찰, 저항 등의 영향으로 k 가 용수철상수이외에 추가적인 변수를 고려해야 할 수 있지만 결과적으로 비례관계는 변하지 않는다.

원하는 용도에 따라 용수철을 바꾸면 측정할 수 있는 힘의 범위가 다양해짐으로 많은 범위의 무게를 측정할 수 있다. 또한 마찰되는 전극 면적의 양과 형태에 따라서도 측정할 수 있는 무게의 범위가 달라진다. 이와 같이 출력되는 전압의 양을 직접 비교 분석해가면서 증명하였다.

2. 관련 이론

2.1. 마찰 대전 측정계 구동 원리

질량을 측정하는 시스템이 구동하기 위해서는 시스템 위에 무게가 올려졌을 때 그 무게를 감지하고 측정 값을 출력해야 한다. 일상 생활에서 볼 수 있는 수동식 가정용 체중계를 예로 들었을 때 체중계 내부에 지레와 스프링이 있어 사람이 올라가서 압력을 가하게 되면 체중에 비례하게 스프링이 늘어나고 눈금 판을 움직이게 해 체중을 수치적으로 알려준다. 이와 비슷한 원리를 Fig. 2 에서 볼 수 있다. 측정계 안에 스프링을 부착하여 조립을 할 수 있게 설계하였고 질량을 올려 놓을 시 질량에 비례하게 스프링이 변형하여 아래로 눌리고 다시 질량을 측정계로부터 내려 놓으면 스프링의 복원력으로 원상태로 올 수 있게 하였다.

여기서 연구하고자 하는 것은 질량의 무게를 앞서 언급한 기존의 방식과는 다르게 측정계의 윗부분과 아래부분과의 마찰로 인해 나오는 전기 신호로 질량의 무게를 측정하는 것이다. Fig. 2 를 보게 되면 한 면에는 안쪽에 aluminum electrode 를 부착하였고 다른 면에는 똑같은 aluminum electrode 위에 FEP film 을 부착하여 마찰이 되었을 때 양극이 대전되어 전력을 출력할 수 있도록 설계하였다. 측정계가 눌렸을 때 질량이 어느 정도인지 감지하기 위해서는 서로 다른 면에 있는 aluminum electrode 간의 접촉 면적에 의한 전위차를 구해야 한다. 이는 평상적으로 실험할 때 current 를 측정하여 전압 크기를 확인하는 방법과는 다르다. 여기서 측정하고자 하는 것은 open circuit voltage 이므로 계단 형태의 그래프로 출력될 것임을 예상할 수 있다.

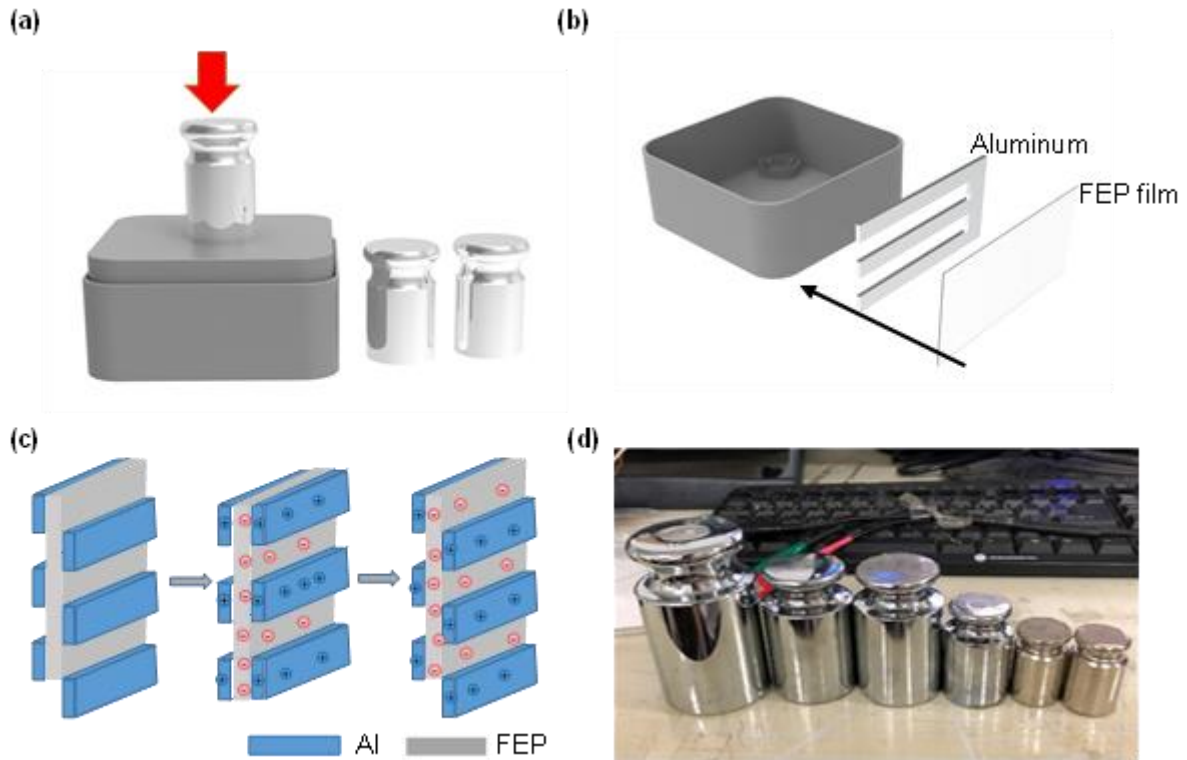


Fig. 1 (a) Schematic of mass measuring system. (b) Materials that are attached on the system. (c) Mechanism for sliding TENG. (d) Weights

2.2. 관련 지배 방정식

질량을 측정하는 시스템이 구동하기 위해서는 시스템 위에 무게가 올려졌을 때 그 이 실험에서 대표적으로 적용할 이론 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = -kx$$

여기서 F 는 힘, k 는 스프링의 강성, x 는 변위를 나타낸다. 위 식을 보게 되면 스프링의 강성은 재료에 따른 값으로 일정하므로 힘과 변위는 선형 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 이론적으로 보았을 때 측정계에 질량을 추가해 힘을 더 가할수록 스프링도 힘에 비례하며 압축하고 마찰 대전 또한 그에 대응하게 일어나므로 전압 출력도 선형적일 것이라는 것을 예측할 수 있다.

스프링에 관하여 한가지 더 주목해야 할 점은 스프링의 배열 형태이다. 이 점은 회로에서 저항의 배열 이론과도 유사하면서 반대라고 생각할 수 있다. 예를 들어 스프링이 직렬로 연결되어 있을 때는 등가 강성에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{eq} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

XXXX

위 식을 참조하면 직렬 연결일 때 강성이 오히려 더 감소될 수 있다는 것을 알 수 있다. 예를 들어 각 스프링 강성이 1 인 스프링을 직렬로 연결했을 때 등가 강성은 0.5 로 감소한다. 반대로 스프링이 병렬로 연결되어 있을 경우, 등가 강성에 대한 식은 다음과 같다.

$$k_{eq} = k_1 + k_2$$

식에서 나타나 있듯이 스프링을 병렬로 연결할 경우 등가 강성은 증가한다. 마찬가지로 예를 들어 각 스프링 강성이 1 이라고 했을 때 병렬로 연결하게 되면 등가 강성은 2 가 된다. 그러므로 실험을 할 때 특별한 강성을 갖는 스프링을 새로 구입하기 보다는 이렇게 병렬, 직렬 연결을 통해 필요한 강성값을 만들어 낼 수 있다.

따라서 Fig. 2 를 보면 시스템이 4 개의 스프링을 병렬로 연결할 수 있게 설계되어 있으므로 스프링의 각 스프링 강성을 더해 등가 강성을 이론적으로 구한다. 여기서 구한 등가 강성으로 질량 무게에 따라 측정계가 얼마나 흔들릴지 즉 얼마나 변위가 생겨 각 aluminum electrode 간의 만나는 면적이 어느 정도인지 예측할 수 있다. ...

3. 재료 및 방법

관련 기호

- k: 스프링 강성
- x: 변위
- V: 전압
- F: 힘
- Voc: 개회로 전압(Open Circuit Voltage)

3.1. S-TENG measuring system

S-TENG measuring system 의 외부 형상은 Fig. 1(a), 내부 형상은 Fig. 1(b)와 같다. 이 시스템은 상부시스템은 134mm(가로)×134mm(세로)×60mm(높이), 두께 4 mm 로 제작되었고 하부시스템은 140mm(가로)*140mm(세로)* 60mm(높이), 두께 4 mm 의 형태로 제작되어 두 시스템이 2 mm 의 간격을 가질 수 있도록 설계되었다. 시스템의 단면은 정사각형에서 가동성을 위해 코너 부분만 약간의 곡률을 주었다. 이 시스템은 3D 프린터를 통해 PLA 소재로 제작이 되었다. Fig. 1(b)에서 시스템 밑판과 위판에 네 개의 원형 홈 지지대를 만들어 스프링이 잘 고정될 수 있도록 제작하였다. 이 곳에 네 개의 스프링을 고정시키고 상부 시스템과 하부시스템을 결합시키면 S-TENG measuring system 완성체가 된다.

3.2. TENG Electrode 제작

Fig. 2(b)와 같이 상부 시스템 바깥쪽 면과 하부시스템 안쪽 면에 알루미늄 테이프를 붙여 electrode 로 사용하고. 상부 시스템 바깥쪽 면엔 알루미늄 테이프 위에 FEP film 을 붙인다. 알루미늄 테이프와 FEP film 은 Fig. 1(c)와 같은 배열로 만들어지게 된다. Electrode 한 줄은 폭 10mm 길이 mm 로 제작하였고 실험 조건의 변화를 위해 이 Electrode 는 한 줄, 두줄, 세 줄의 경우로 나누어 제작한다. 초기 조건은 하부와 상부시스템이 결합했을 때 양쪽의 전극이 완전히 엇갈려서 접촉하기 직전의 상태가 되도록 알루미늄 테이프의 위치를 조절한다. 최대 무게 2 kg 이 가해졌을 때 상부가 전극의 폭(10mm)만큼 내려가서 하부시스템이 완전히 밀착되어 양쪽의 전극이 완전히 일치된 상태가 된다. 상부시스템과 하부시스템에서 각각 이 electrode 를 이어주는 전선을 하나씩 연결하여 전압을 측정한다.

3.3. 실험 방법

초기에 Fig. 1(c)의 첫번째 그림과 같이 가운데 FEP film 이 있고 양쪽에 전극이 완전히 엇갈린 배열 상태로 존재한다. 이 상태에서 Fig. 2(a)와 같이 상부시스템에 무게가 가해지면 스프링이 압축되면서 점점 Fig. 1(c)의 두번째 그림과 같이 변화하게 된다. 그 과정에서 마찰에 의해 정전기가 유도되고 FEP film 엔 전자가 모이고 양쪽 전극은 양전하를 띠게 된다. 그러면서 전위차가 발생하고 이를 통해 Voc 를 구해낸다.

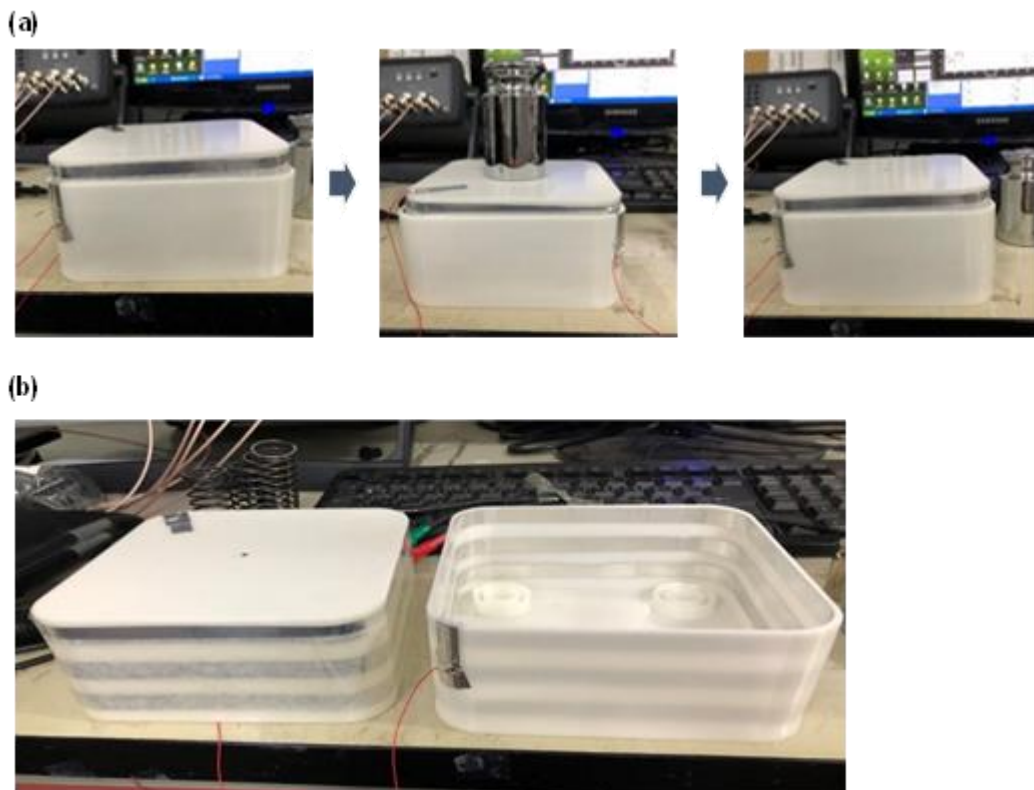


Fig. 2 (a) Working mechanism of the mass measuring system. (b) Inside of the mass measuring system.

스프링 상수, electrode 줄의 개수를 조정해가며 가해지는 무게를 Fig. 1(d)와 같은 무게 추를 사용하여 100g 부터 1.5 kg 까지 100g 간격으로 변해가며 Voc 를 측정한다. 스프링은 $k=0.3, 0.5, 1.0$ 짜리 스프링을 사용하고, electrode 는 1 줄, 2 줄, 3 줄일때로 나누어 스프링 상수에 따른 변화와 electrode 의 면적에 따른 변화를 각각 측정한다. 이렇게 측정한 Voc 값들과 시스템에 가한 무게를 비교 분석하여 상관관계를 구하고 무게 측정 센서로서의 이 시스템을 검증한다.

3.4. Parameter 선정 기준

이 연구에서 parameter 로 잡을 수 있는 부분은 질량의 무게, 스프링 강성, 그리고 aluminum electrode 의 개수이다. 직접 설계한 측정계 크기가 한정적이다 보니 측정 범위에도 제한이 있었다. 따라서 해당 스프링 강성이 높아서 aluminum electrode 가 겹치는 면적이 최대가 될 때를 임계점으로 잡아 parameter 범위를 선정하였다. 예를 들어 스프링 강성을 1 N/mm 로 결정했을 경우, 측정계의 등가 강성은 4 N/mm 이 되고 여기서 약 2 kg 의 질량 추를 설계한 측정계에 두었을 때 aluminum electrode 간의 겹치는 면적이 최대가 되었다. 따라서 각 스프링 강성을 1 N/mm 로 정할 경우, 무게 측정을 0.1 kg 로부터 1.5kg 까지 0.1kg 간격으로 실험해볼 수 있었다. 스프링 강성이 더 적은 경우에는 실험할 수 있는 무게 범위가 더 작아질 것이다. 만약 이 무게 범위를 초과할 경우, 겹치는 면적을 지나가므로 전위차는 반대 방향을 향하게 되고 전압 그래프는 선형적으로 증가하는 것이 아닌 감소하는 형태의 그래프를 나타낼 것이다.

또한, aluminum electrode 의 개수를 3 개로 기준을 정하고 실험을 진행하였다. aluminum electrode 의 개수 변화에 따라 측정 값도 달라지는지 실험하고자 마지막에는 스프링 강성은 고정 값으로 두고 aluminum electrode 개수를 줄여가면서 실험을 진행하였다.

4. 실험 결과

4.1. 스프링 강성에 따른 결과

이 실험에서는 스프링 강성을 0.3 N/mm, 0.5 N/mm, 그리고 1 N/mm 로 3 개의 스프링 강성 기준을 잡았다. 측정계 안에는 4 개의 스프링이 병렬로 연결되어 부착되므로 앞에서 언급한 수식을 활용해 등가 강성을 구하게 되면 1.2 N/mm, 2 N/mm, 4 N/mm 로 기준이 등가 강성으로 다시 잡히게 된다.

스프링 강성을 0.3 N/mm, aluminum electrode 개수를 3 개로 잡고 0.1kg 씩 증가해 측정계에 올려서 실험을 한 결과, 최대 질량 무게 임계점은 0.5kg 근방이었다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 무게 0.5kg 전에는 선형적으로 무게에 따라 증가한다는 것을 볼 수 있다. 무게 임계점이 0.5kg 를 넘어가지 않는 이유는 스프링 강성이 적은 0.3 N/mm 의 경우, 상대적으로 적은 질량 무게에도 변위가 더 크게 일어나기 때문이다. 따라서 0.1 kg 의 질량 무게를 더 추가할 때 다른 스프링 강성보다 전위차의 차이가 더 컸다.

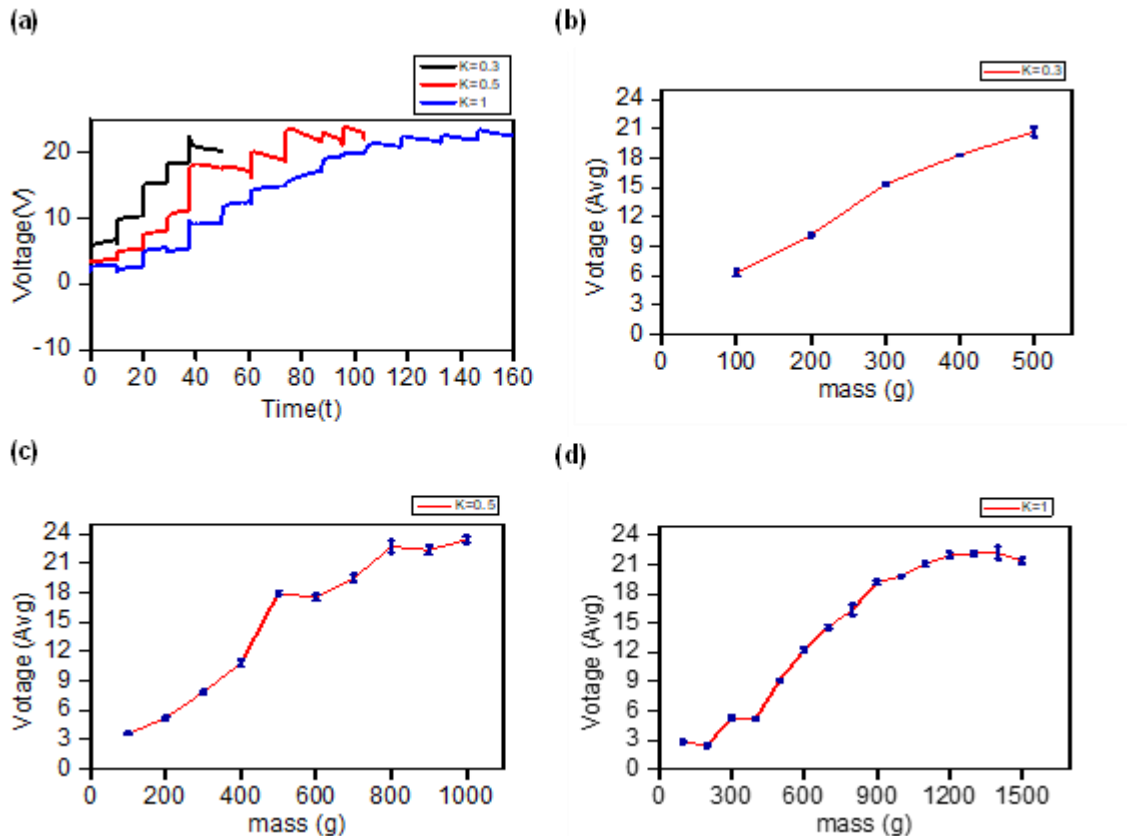


Fig. 3. (a) Output voltage for different types of spring stiffness vs. time (b) Output voltage for $k = 0.3$ vs. mass (c) Output voltage for $k = 0.5$ vs. mass, (d) Output voltage for $k = 1$ vs. mass.

Fig. 3(c)는 스프링 강성 0.5 N/mm, aluminum electrode 개수 3 개에 대한 그래프를 나타내고 있으며 Fig. 3(b)의 경우와 마찬가지로 선형적이라는 것을 알 수 있다. 다른 점은 질량 무게의 임계점이다. 스프링 강성 0.5 N/mm 의 경우는 스프링 강성 0.3 N/mm 보다 변위를 더 억제하므로 질량을 1kg 보다 더 추가할 수 있게 된다. Fig. 3(c)을 보게 되면 그 지점은 약 1kg 이라는 것을 알 수 있다. 0.1kg 을 추가할 때의 전위차는 스프링 강성 0.5 N/mm 이 스프링 강성 0.3 N/mm 보다 더 적다는 것을 볼 수 있다. 이 부분은 스프링 강성이 클수록 같은 힘을 가했을 때 변위가 줄어들어 aluminum electrode 간의 겹치는 면적이 더 작으므로 이론적으로도 성립한다.

Fig. 3(d)의 경우, 스프링 강성 1 N/mm, aluminum electrode 3 개에 대한 그래프를 나타내고 있다. 예상대로 스프링 강성이 커졌기에 질량 측정 범위도 넓어졌다는 것을 알 수 있다. 약 1.5kg 까지 측정할 수 있었으며 마찬가지로 무게에 따라 선형적으로 그래프가 증가한다는 것을 볼 수 있다. 0.1kg 씩 질량 추가했을 때 예상대로 전위차는 다른 두 스프링 강성보다 더 작았다. 여기서 또 주목할 점은 3 개의 스프링 강성 모두 최대 질량 임계점에서 비슷한 전압 출력을 나타냈다. 이는 최대 질량 임계점에서 aluminum electrode 간의 겹치는 면적이 최대가 되고 그 면적은 같기 때문이다.

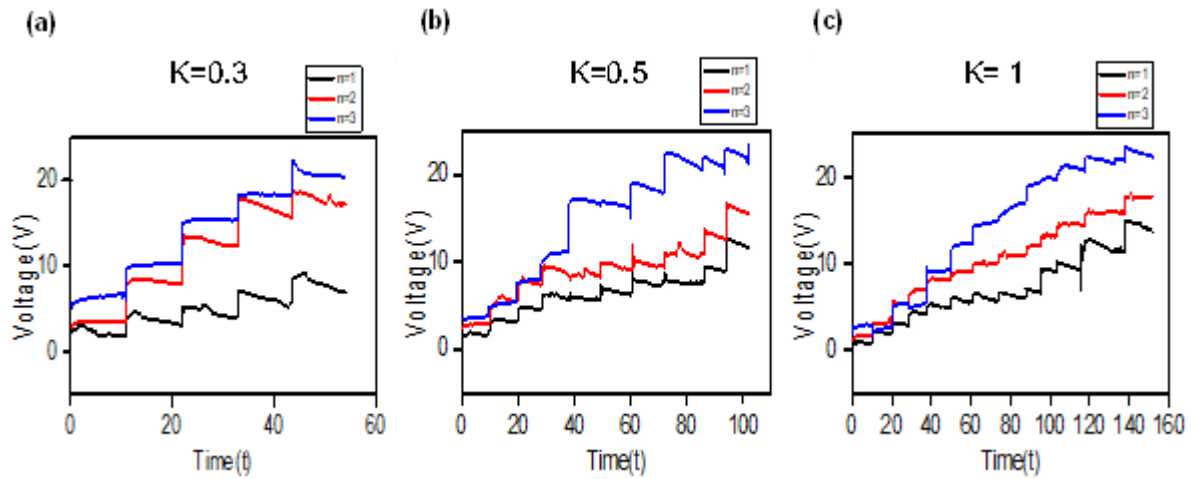


Fig. 4. Output voltage graphs that are depending on the numbers of aluminum electrode. (a) Output voltages for $k = 0.3$ vs. time. (b) Output voltages for $k = 0.5$ vs. time. (c) Output voltages for $k = 1$ vs. time.

스프링 강성에 parameter 로 잡은 실험을 진행한 결과, 스프링 강성이 $1 N/mm$ 으로 잡을 때 제일 안정적인 실험 결과가 나왔다. 그 이유를 분석한 결과, 스프링 강성이 $0.3 N/mm$ 일 경우에는 스프링이 더 원활하게 양 옆으로도 움직일 수 있기에 일정하고 정확한 전압 출력이 나오기가 어렵다. 하지만 $1 N/mm$ 의 경우, 등가 강성이 훨씬 더 크므로 옆으로의 움직임은 더 적어지고 오직 수직적으로 스프링이 압축되고 늘어난다. 따라서 양면이 일정하게 접촉 마찰을 할 수 있게 되고 전압 출력도 안정적으로 나올 수 있게 된다. 스프링의 강성과 질량의 무게에 따라 측정계의 전압이 어떻게 달라지는지 Table. 1 을 통해 평균 전압 값과 표준편차 값을 확인할 수 있다.

Table. 1. 스프링 강성 및 무게에 따른 전기 신호의 전압 크기

Mass (g)		k=0.3	k=0.5	k=1
100	Avg (V)	6.29	3.61	2.80
	stdev	0.34	0.10	0.15
200	Avg (V)	10.12	5.18	2.46
	stdev	0.15	0.17	0.17
300	Avg (V)	15.34	7.83	5.29
	stdev	0.09	0.15	0.16
400	Avg (V)	18.32	10.79	5.17
	stdev	0.05	0.33	0.17
500	Avg (V)	20.68	17.93	9.17
	stdev	0.46	0.22	0.10

4.2. Aluminum electrode 개수에 따른 결과

앞에서 언급했듯이 양 aluminum electrode 간의 겹치는 면적이 커질수록 전압 출력도 커지게 된다.

따라서 기존의 aluminum electrode 개수, 3 개에서 줄이게 되면 전압 출력도 낮아질 것이라는 것을 미리 예측할 수 있다. 따라서 스프링 강성을 고정 값으로 두고 aluminum electrode 의 개수에 따른 출력 변화를 측정하였다. Fig. 4(a) 같은 경우는 aluminum electrode 의 개수를 변화하고 스프링 강성은 0.3 N/mm 로 고정 값을 둔 그래프이다. Fig. 4(a)에서도 나타나듯이 aluminum electrode 의 개수가 적을수록 전압 출력이 현저히 낮아졌다. 이는 스프링 강성이 0.5 N/mm 인 Fig. 4 (b), 스프링 강성이 1 N/mm 인 Fig. 4(c)에 경우에도 유사한 형태를 보인다. 이 실험결과는 aluminum electrode 간의 겹치는 면적이 전압 출력에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 물론 전압 출력 크기는 aluminum electrode 의 개수에 따라 다르게 나오지만, 질량 무게에 따른 선형성은 계속 유지되고 있다는 것을 Fig. 4 를 통해 알 수 있다. 따라서 전압 출력을 조정하기 위해 aluminum electrode 의 크기나 개수를 사용 환경 및 필요 조건에 맞게 수정할 수 있다.

5. 결론

최근 많은 에너지 소요와 환경 문제로 인해 신재생 에너지 개발은 끊임없이 이루어지고 있다. 그 중 마찰 대전을 이용해 역학적 에너지원으로부터 전력을 생산하는 기술이 주목받고 있다. 기존에는 일반적으로 마찰이 기계 파손 및 이상의 원인이 되므로 장치를 설계할 때 마찰을 최소화하려고 노력하였다. 하지만 최근에는 오히려 이 마찰을 이용하려는 연구가 계속해서 이루어지고 있으며, 마찰 대전을 기반으로 발생하는 전기를 전력 뿐 아니라 일종의 전기신호로써 활용하는 연구 사례들도 증가하는 추세이다. 본 연구에서는 시스템에 작용되는 무게에 기반하여 발생하는 마찰 대전 전기 신호의 정확성과 정밀성을 확인하였다. 그 결과 작은 질량 무게 차이까지 잘 감지하였고 이론과 대응하게 전압 출력도 선형적으로 생성됨을 확인하였다. 마찰 대전을 기반으로 정확한 전기 신호가 나오므로 측정계 말고도 진동이 자주 일어나는 장치, 예를 들어 차량 엔진 같은 경우 진동이 일정하게 일어나다가 장치에 이상이 있을 경우 진동의 패턴이 달라지므로 마찰 대전 원리를 이용해 신호를 감지하여 운전자에게 알려주는 시스템에도 적용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] F. R. Fan, Z. Q. Tian, Z. L. Wang, "Flexible triboelectric generator", Nano energy, vol. 1, no. 2, pp. 328-334, 2012.

- [2] J. Luo, W. Gao, Z. L. Wang, "The triboelectric nanogenerator as an innovative technology toward intelligent sports", *Advanced materials*, vol. 33, no. 17, pp. 2004178, 2021.
- [3] W. G. Kim, D. W. Kim, I. W. Tcho, J. K. Kim, M. S. Kim, Y. K. Choi, "Triboelectric nanogenerator: Structure, mechanism, and applications", *Acs Nano*, vol. 15, no. 1, pp. 258-287, 2021.