

출품번호

1154

제69회 전국과학전람회

우블렉의 진동에 따른 전기전도도 변화에 대한 고찰



2023. 8. 22.

출품학생	
지도교원	
구 분	
출품부문	물리

【 차 례 】

I. 탐구 동기 및 목적	1
1. 탐구 동기	1
2. 탐구 목적	1
II. 탐구 개요	2
1. 탐구 절차	2
2. 탐구 기간	2
III. 이론적 배경 및 선행연구 조사	3
1. 이론적 배경	3
가. 비뉴턴 유체	3
나. 우블렉의 상(phase)의 변화 원리	
다. 전기전도도 센서의 원리	4
2. 선행연구 조사	5
III. 탐구 내용	8
1. 사전 탐구 - 우블렉에 외력을 가하면 전기전도도가 변할까?	8
가. 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화	8
나. 본 실험에서의 표준 우블렉 제작	10
2. 본 탐구 - 충격과 진동에 따른 전기전도도의 변화 관계	13
가. 우블렉의 충격에 따른 전기전도도의 변화	13
나. 우블렉의 진동에 의한 전기전도도 변화	16
IV. 결론 및 활용 방안	22
V. 참고 문헌	23

<그림 차례>

그림 1 탐구 절차 개요	2
그림 2 전단응력, 전단율	3
그림 3 비뉴턴 유체의 전단응력-전단율	3
그림 4 전분의 구조	3
그림 5 우블렉의 내부 구조	3
그림 6 약한 힘을 가했을 때	4
그림 7 강한 힘을 가했을 때	4
그림 8 전기전도도 센서	4
그림 9 선행연구 결과, 점도에 따른 저항 변화 관찰	5
그림 10 선행연구 결과, 충격에 따라 달라지는 이온의 이동 경로	6
그림 11 선행연구 결과, 우블렉을 넣어 제작한 댐퍼의 힘	7
그림 12 전기전도도 센서와 PASCO사의 wireless conductivity sensor	8
그림 13 배양기에 코니컬 튜브와 센서가 꽂혀 있는 사진	8
그림 14 우블렉에 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도 변화 그래프	9
그림 15 전분별 우블렉	10
그림 16 농도가 다른 우블렉	10
그림 17 염도가 다른 우블렉	11
그림 18 채운 정도에 따른 사진	11
그림 19 종류별 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화 그래프	11
그림 20 전분과 물의 비율을 다양하게 하여 진동을 줄 때 전기전도도의 변화 그래프	12
그림 21 소금물의 농도를 다양하게 하여 우블렉을 제작한 뒤 전기전도도의 변화 그래프	12
그림 22 코니컬 튜브에 채운 정도를 다르게 한 뒤 전기전도도 변화 그래프	13
그림 23 실험용 아크릴박스	13
그림 24 충격 실험 모습	14
그림 25 충격 줬을 때 우블렉의 전기전도도 변화	14
그림 26 우블렉의 중간 부분 입자의 변위	15
그림 27 우블렉의 중간 부분 입자가 받는 전단변형	15
그림 28 우블렉의 중간 부분 입자가 받는 실제 전단변형	15
그림 29 우블렉을 진동시킬 시에 전기전도도 변화를 예측한 그래프	16
그림 30 우블렉의 진동에 따른 전기전도도 변화 그래프	17
그림 31 우블렉의 0.5Hz 진동의 유무에 따른 전기전도도 변화	17
그림 32 실험용 통 제작 모식도	18
그림 33 실험용 통 실제 제작 사진	18
그림 34 높이에 따른 전기전도도 변화	19
그림 35 전기전도도 측정 지점	19
그림 36 Floor 위치 모식도	19
그림 37 진동을 주다가 멈추었을 때의 전기전도도 변화	19
그림 38 진동과 수평인 벽과의 거리에 따른 전기전도도 변화	20
그림 39 전기전도도 측정 지점	20
그림 40 위치 모식도	20

그림 41 진동에 수직인 벽과 거리에 따른 변화	21
그림 42 LINE 위치 모식도	21
그림 43 전기전도도 측정 지점	21

I

탐구 동기 및 목적

1. 탐구 동기

우블랙은 전분 가루를 물에 일정 비율로 혼합하여 만든 현탁액인데, 이 우블랙의 신기한 특징은 외부에서 우블랙에 충격을 가하면 우블랙이 평상시에는 액체였다가 부분적으로 고체로 변한다는 것이다. 그런데 우리는 우블랙에 충격이 아닌 진동을 주었을 때 우블랙의 상은 어떻게 변하는지, 특별한 현상이 나타나지는 않는지 의문이 생겼다. 이에 관해서 찾아보니 우블랙에 스피커를 이용하여 진동을 주었을 때 아래의 그림처럼 우블랙이 공중에 뜨거나 우블랙이 살아있는 것처럼 움직이는 모습을 볼 수 있었다. 이런 현상들이 신기하게 느껴져 그 속에 어떤 원리가 있는지 탐구해 보고자 하였다. 따라서 우블랙에 다양한 진동을 주며 우블랙의 부분별 점도 변화를 측정해보고자 하였다.



그림 2 우블랙을 스피커에 올려놓고 진동을 준 사진



그림 3 레오미터 회전식 점도계

이때, 점도를 측정해보기 위하여 시중에 사용되고 있는 점도계에 대해서 알아보았는데, 현재 사용되고 있는 점도계는 모두 용액을 통에 담아놓고, 내부에서 스피들을 회전시켜 점도를 구하는 방식을 사용하였다. 이 때문에 점도를 측정하는 동시에 무언가 다른 실험을 진행하거나, 부분적인 점도를 측정하는 것이 불가능하였다. 따라서 우블랙의 부분 점도를 측정해보고자 다양한 방법들을 고민하며 비뉴턴 유체에 관한 논문들을 찾아보았다. 그 결과 비뉴턴 유체 중 하나인 실리카에 탄소나노튜브를 첨가한 용액인 C-STF에 대해 충격을 주며 저항과 점도의 관계에 관해 연구한 논문을 찾게 되었다. 논문의 내용에 따르면 점도가 저항에 반비례함을 알 수 있었다. 이를 보고 우블랙에 이온을 첨가한다면, 우블랙에 충격이 가해져 우블랙의 점도가 변화함에 따라 이온의 이동성이 바뀔 것으로 추측하였다. 따라서 우블랙의 전기전도도 변화를 통해 우블랙의 점도 변화를 관찰하고, 진동을 주었을 때 우블랙의 점도 변화를 관찰해보고자 하였다.

2. 탐구 목적

기존 여러 우블렉에 관한 연구에서는 대부분 충격에 따른 우블렉의 특성이나, 우블렉의 거동 현상에 대해서만 진행되었고, 우블렉의 전기전도도에 관한 연구는 진행되지 않았다. 또한 우블렉에 대하여 진동을 가하는 연구 역시, 활발히 일어나지 않았다. 이에 우블렉에 가해지는 진동에 따른 우블렉의 전기전도도 변화를 측정하고, 전기전도도가 변화하는 현상의 원리를 해석할 것이다.

이 과정에서, 다른 연구에서는 사회적으로 통용되는 우블렉 농도인 물:전분 비율 1:2를 사용하였는데, 왜 이값을 사용하는지에 대한 근거가 불분명하여, 우리의 표준 우블렉을 제작하여 실험에 사용할 것이다.

또한, 우블렉의 전기전도도가 진동에 따라 변화하며 발생하는 여러 현상들을 관측하고, 이를 충분한 비뉴턴 유체에 대한 이해를 바탕으로, 해석하여, 전기전도도 변화의 원리를 해석할 것이다.

결론적으로는, 우블렉의 전기전도도가 변화하는 현상의 원리를 해석함으로써, 새로운 비뉴턴 유체에 관한 실험 방법을 제시할 수 있을 것이다.

II

탐구 개요

1. 탐구 절차

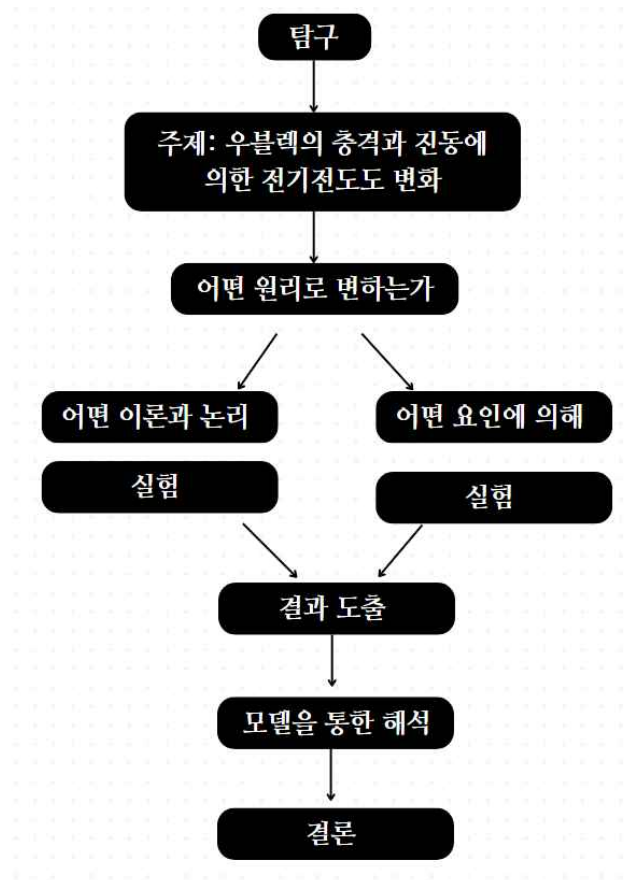


그림 4 탐구 절차 개요

2. 탐구 기간

[표 1] 탐구 기간

연구내용	추진 시기(월)														
	4월			5월			6월			7월			8월		
	초	중	말	초	중	말	초	중	말	초	중	말	초	중	말
탐구 주제 선정	▶	▶													
선행 연구 조사 및 분석		▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	
이론적 배경 파악			▶	▶	▶	▶	▶	▶							
탐구설계				▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶			
탐구 수행					▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶
결과 정리 및 보고서 작성						▶	▶	▶				▶	▶	▶	▶

III

이론적 배경 및 선행 연구 조사

1. 이론적 배경

가. 비뉴턴 유체

$$\tau [Dynes/cm^2] = \mu \frac{\partial u}{\partial y} [Poise \cdot sec^{-1}]$$

일반적으로 뉴턴 유체는, 위의 식에서 μ 가 상수이다. 즉, τ (전단응력)과 $\frac{\partial u}{\partial y}$ (전단율)이 선형적 관계를 갖는 유체이다. 즉 다른 말로 점성이 일정하다고 할 수 있다.

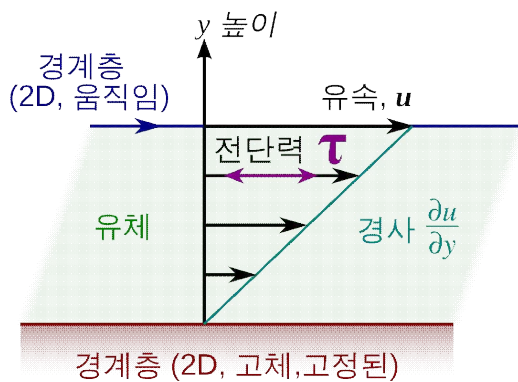


그림 5 전단응력, 전단율

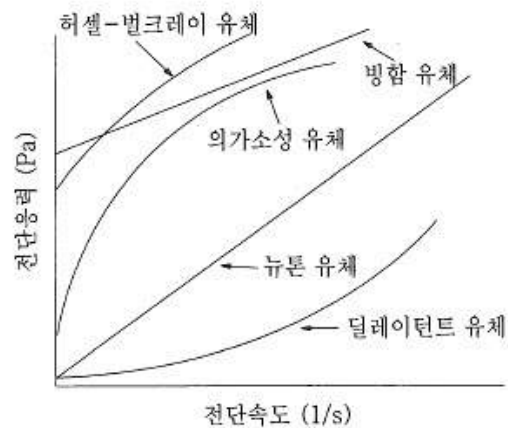


그림 6 비뉴턴 유체의 전단응력-전단율

반면, 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid)는 전단응력과 전단변형률이 선형적 관계를 갖지 않거나 관계 곡선이 원점을 지나지 않는 유체를 의미한다. 우블랙은 비뉴턴 유체의 일종으로, 점성이 일정하지 않다. 이러한 성질로 인해 짧은 시간에 큰 충격을 가하면 고체처럼 행동한다.

나. 우블랙의 상(phase)변화 원리

우블랙은 물과 전분으로 구성되어 있다. 이때, 전분의 분자구조는 다음과 같다.

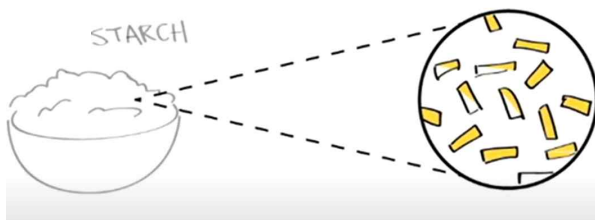


그림 7 전분의 구조

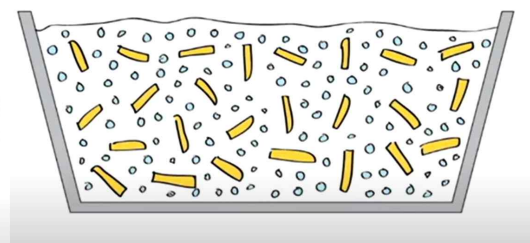


그림 8 우블랙의 내부 구조

이때, 평상시에 전분 입자들은 물과 함께 위와 같이 혼합된 상태이다.

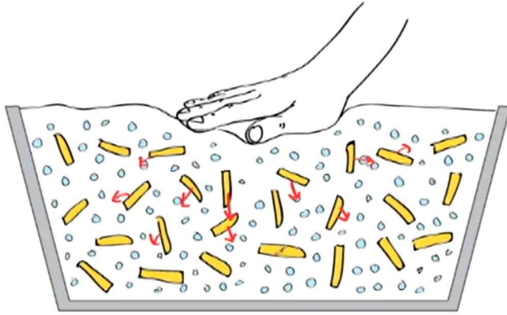


그림 9 약한 힘을 가했을 때

이때, 약한 힘을 주게 되면 왼쪽의 사진처럼 전분 입자와 물 분자가 함께 빠져나가서 흐르게 된다. 하지만 강한 힘이 작용하게 되면 물 분자가 먼저 충격 지점에서 빠져나가게 되고, 충격을 받은 지점의 농도가 높아져 고체처럼 유동하게 된다.

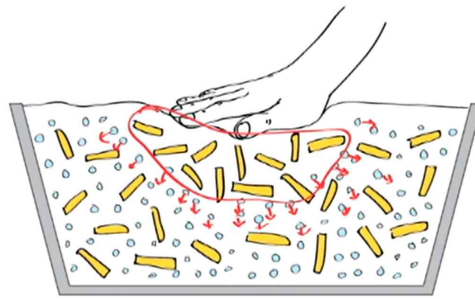


그림 10 강한 힘을 가했을 때

다. 전기전도도 센서의 원리

전기전도도란 물질이나 용액이 전하를 전달하는 능력을 나타내는 물리량이다. 전기전도도는 용액 내에 농도가 높은 이온들이 전하를 운반하며 발생한다.



그림 11 전기전도도 센서

이를 측정하는 방법은 용액에 담겨있는 한 쌍의 전극에 교류전압을 가하고 전류를 흐르게 하여 용액의 비저항을 확인한다. 전류의 크기는 용액의 전기전도도에 따라 변하게 된다. 이때 두 평행 전극 간의 용액의 저항을 측정하고, 이를 옴의 법칙을 통해 전기전도도를 계산한다. 이때, 비저항 값을 이용해 전기전도도를 계산할 때의 계수는 전극의 표면적과 두 전극 사이의 거리에 따라 변화하게 된다. 따라서 우리가 전기전도도를 알고 있는 표준 용액의 실험값을 통해 계수를 조정하여 전기전도도를 제작한다.

2. 선행연구조사

가. Shear dependent electrical property of conductive shear thickening fluid

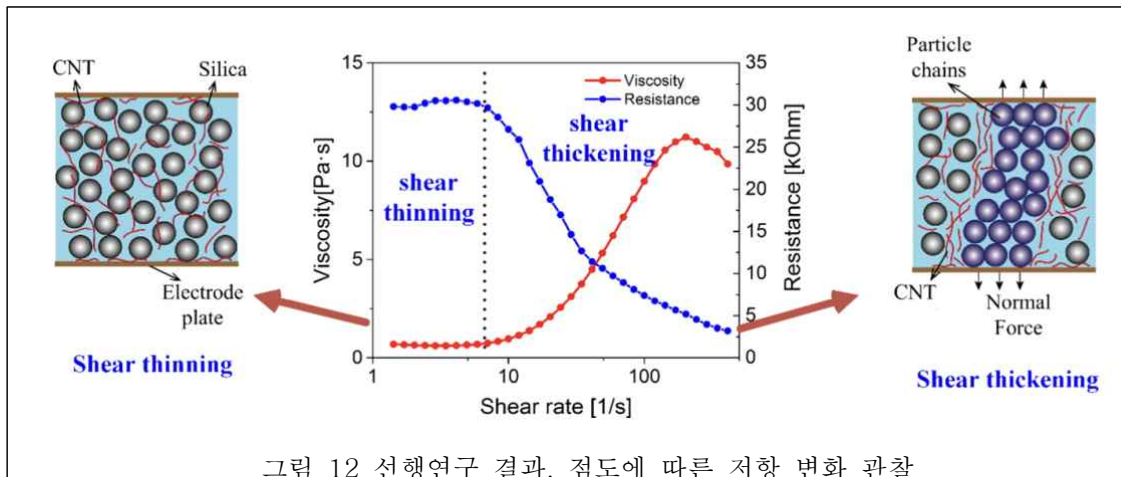


그림 12 선행연구 결과, 점도에 따른 저항 변화 관찰

내용	C-STF라는 탄소나노튜브와 실리카를 혼합한 비뉴턴 유체의 점도에 따른 전기전도도를 측정함. 레오미터 회전식 점도계에 저항을 측정할 수 있는 장치를 추가하여 점도에 따른 전기전도도를 측정하여 점도가 저항에 반비례한다는 결론을 얻음. 이를 해석하는 모델로 전단변형률을 높이면 실리카 입자와 탄소나노튜브가 섞여 있다가 실리카 입자들이 서로 클러스터를 형성하고, 이에 따라 탄소나노튜브가 하나의 이온을 전달할 수 있는 도선을 형성하며 전기전도도가 올라간다는 모델을 제시함.
본 연구와의 차이점	비뉴턴 유체의 점도에 따른 저항의 변화에 관해서 연구했다는 면에서 우리의 연구와 비슷한 부분이 있으나, 우리의 연구는 우블렉에 진동을 가하여 계속해서 우블렉 안 입자들의 정렬 상태나, 전단변형률이 시간에 따라 방향이 변하는 등 매우 동적인 점에 반해, 해당 연구는 전단 농축 용액이 정상상태를 떨 때까지 매우 천천히 회전시켜 전기전도도를 측정했다는 점에서 다르다.

나. Predictive Design of Shear-Thickening Electrolytes for Safety Considerations

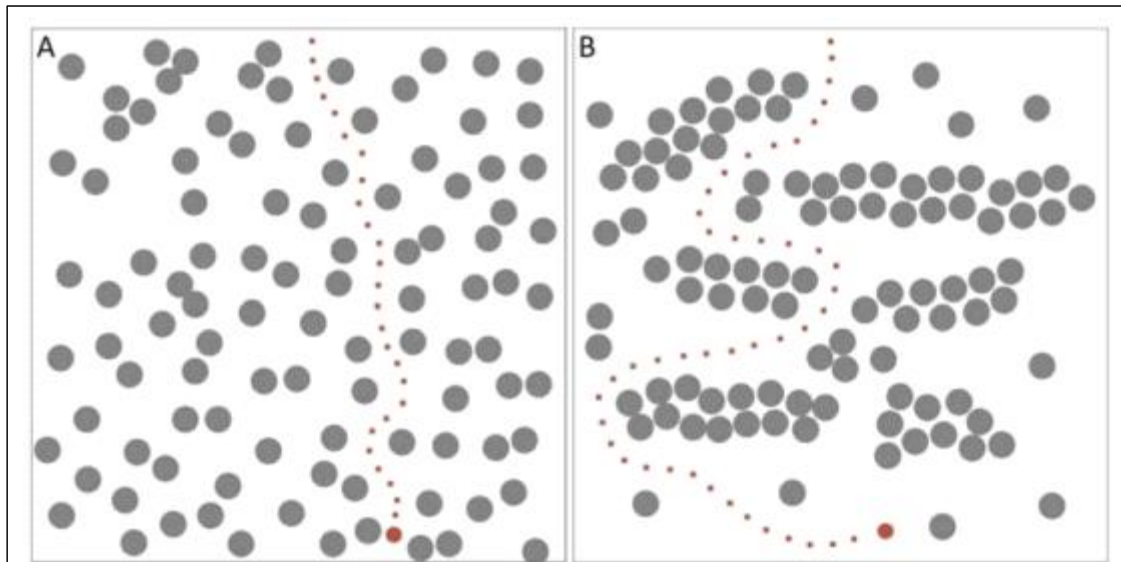


그림 13 선행연구 결과, 충격에 따라 달라지는 이온의 이동 경로

내용	시뮬레이션을 이용하여 전단 상태에서 비뉴턴 유체의 점도와 전기전도도가 변하는 모델을 제시함. 그 결과, 비뉴턴 유체에 수직 방향으로 전단력을 가하면 수평 방향으로 클러스터가 형성되고, 이때 수직 방향으로 전기전도도를 측정할 경우, 정상상태의 비뉴턴 유체보다 이온이 이동할 통로가 길어져 전기전도도가 감소한다는 결과를 내렸다.
본 연구와의 차이점	비뉴턴 유체에 충격을 가한 뒤, 내부 입자들의 정렬 상태나, 이온의 이동성에 관해서 연구하였다는 점에서 우리의 탐구와 비슷한 점을 가지고 있다. 그러나, 우리의 연구는 단방향의 단순한 전단력이 아닌, 진동을 주어 주기적인 외력을 가하여 우블렉의 내부 정렬 상태를 연구하고자 한다는 점에서 차이점을 가진다.

다. Dynamic performance of shear-thickening fluid damper under long-term cyclic loads

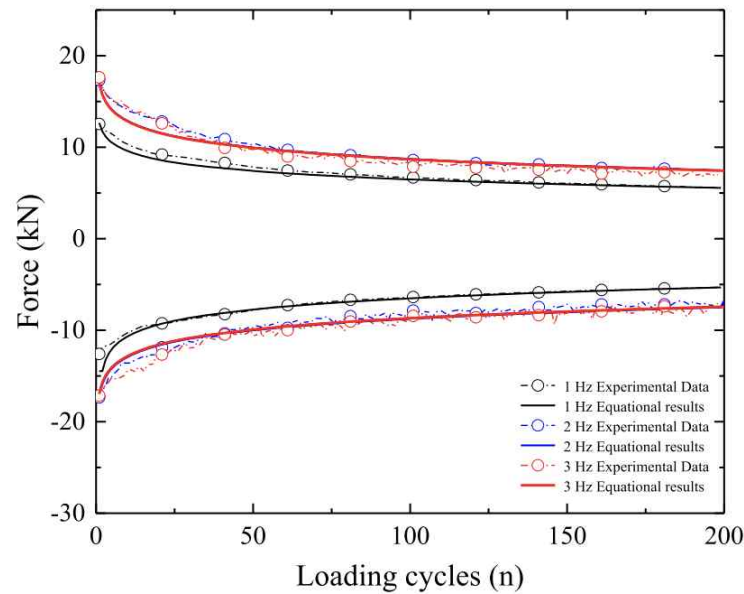


그림 14 선행연구 결과, 우블렉을 넣어 제작한 댐퍼의 힘

내용	Shear-thickening fluid를 활용하여, 댐퍼(STFD, Shear Thickening Fluid Damper)를 제작하였다. 이 과정에서, STFD가 Shear thickening 상태에서 보이는 비선형 거동을 설명하기 위한 동적 모델을 제안하였으며, 재료가 주기를 가지고 변형하는 과정에서 연속적인 응력-변형률 상태를 나타내는 곡선인 히스테리시스 루프를 관측함. 그 결과 최종적으로 20mm의 일정한 진폭을 갖는 다양한 정현파 하중 조건에서 동적 성능을 조사하여, 댐퍼의 힘이 하중 사이클의 증가에 따라 대수적으로 감소하는 것으로 나타남.
본 연구와의 차이점	본 논문에서는 실리카로 이루어진 STFD를 일정 주파수로 일정한 진폭을 가지도록 하여, 댐퍼의 힘을 측정된 실험이다. 이 때 일정 주파수와 일정 진폭을 사용한다는 점에서 우리의 탐구와 비슷한 점을 가지고 있다. 그러나, 본 논문은 초점이 댐퍼에 집중되어있어, 댐퍼의 힘을 측정하였고, 비뉴턴 유체의 특성에 대해 초점이 맞추어져 있지 않다는 점에서 우블렉의 전기전도도를 측정하는 우리의 탐구와 차이점을 가지고 있다.

IV

탐구 내용

1. 사전 탐구 - 진동을 가했을 때 전기전도도의 변화

가. 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화

선행연구를 통해 우블렉에 충격을 수직 방향으로 주었을 때는 수평 방향으로 클러스터가 생기며 이온의 이동해야 하는 경로의 길이가 길어져 전기전도도가 감소하는 경향을 띠는 사실을 알 수 있었다. 이에 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화는 어떻게 변화할지 의문이 생겨 실험을 통해 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도가 어떻게 변화하는지 측정해보았다.

1) 실험 도구

가) Sparkvue 프로그램과 전기전도도 센서

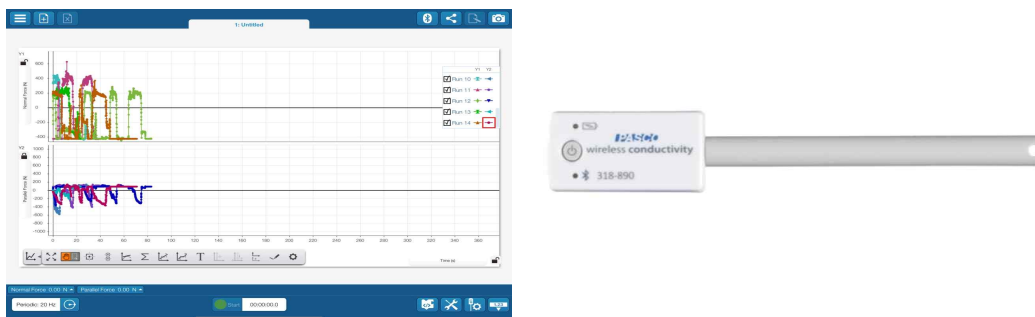


그림 15 전기전도도 센서와 PASCO사의 wireless conductivity sensor

PASCO 사의 전기전도도 센서와 프로그램을 사용하였다. 해당 센서는 시간에 따른 전기전도도 변화를 측정할 수 있다.

원래 교반 배양기는 미생물이나, 세균 등을 액체 내에서 중탕하며 일정 온도와 일정 주기로 왕복시키며 배양하기 위한 기계이다. 하지만 0 ~ 200 RPM의 일정한 주기로 왕복시킬 수 있어서 위 실험에서 사용하였다.



그림 16 배양기에 코니컬 튜브와 센서가 꽂혀 있는 사진

2) 실험 방법

- 가) 우블렉을 녹말과 물의 비율을 2:1, 소금을 물의 2%로 제작한다.
- 나) 우블렉이 담긴 용기의 중앙에 전기전도도 센서를 꽂은 후 120rpm으로 진동을 준다.
- 다) 측정된 전기전도도를 프로그램을 이용하여 시각화한다.

3) 실험 결과

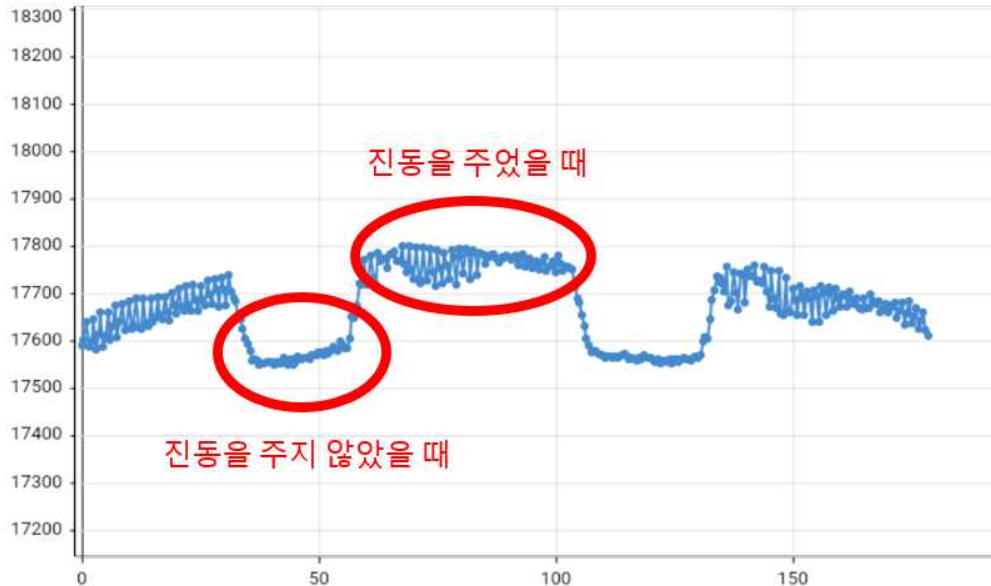


그림 17 우블렉에 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도 변화 그래프

가) 진동 유무에 따른 전기전도도의 변화

우블렉에 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도를 측정한 결과, 우블렉의 전기전도도가 상승하는 모습을 보였다. 따라서 기존의 논문 등을 참고하여 우블렉의 전기전도도가 상승하는 원리를 설명할 수 있는 물리적 모델을 세우고, 우블렉의 농도, 전해질의 종류에 따른 전기전도도 상승 폭 등 우블렉의 전기전도도를 변하게 하는 요인들에 대해서 추가적으로 알아보고자 한다.

나) 전기전도도의 진동

우블렉에 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도를 측정한 결과, 우블렉의 전기전도도가 일정한 주기의 sin 파와 비슷한 형태로 진동하는 모습을 보였다. 하지만 완전한 sin 파의 형태가 아닌 일그러진 모양의 sin파를 띄었다.

따라서 우블렉의 전기전도도 그래프가 일정한 진동수로 진동하는 이유가 무엇인지, 우블렉의 전기전도도를 진동하게 하는 요인은 무엇인지, 우블렉에 주는 물리적 진동과 우블렉 전기전도도의 진동 사이에는 어떤 상관관계가 있는지 알아보고자 한다.

나. 본 실험에서의 표준 우블렉 제작

기존의 우블렉을 이용한 연구를 찾아본 결과, 우블렉을 제작할 때 주로 물과 전분 1:2 비율로 제작하였으며, 그 비율을 명확하게 밝히지 않은 경우도 존재했다. 또한 기존의 우블렉에 관한 연구는 대부분 우블렉의 전기적인 특성을 연구한 것이 아닌 우블렉의 물리적인 특성에 관한 연구였다. 따라서 본 실험을 더욱 효과적으로 결과를 도출하기 위하여 우블렉의 전기전도도 실험에 가장 적합한 ‘표준 우블렉’을 제시하기 위하여 아래와 같은 실험을 통해 우블렉 제작 방법을 규정하였다. 실험을 진행하기 전 우블렉의 조건은 물:전분 = 1:2, 코니컬 튜브에 채운 정도는 1/2만큼, 소금의 양은 1%로 하였고, 진동은 교반기를 이용하여 120rpm으로 실험을 진행하였다. 실험을 통해 알아낸 조건은 다음 실험에서 적용하여 실험하였다.

1) 전분의 종류에 따른 전기전도도 변화

가) 고구마, 옥수수, 감자 3가지의 전분을 이용하여 우블렉을 제작한다.



그림 18 전분별 우블렉

2) 전분과 물의 비율에 따른 전기전도도 변화

가) 물과 전분의 비율을 1:1부터 1:2 까지 전분의 비율을 0.1씩 늘려가며 11가지의 우블렉을 제작한다.



그림 19 농도가 다른 우블렉

3) 물과 전해질의 비율에 따른 전기전도도 변화

가) 소금과 물의 비율을 1%, 5%, 10%(질량 비율)로 해 우블렉을 제작한다.



그림 20 염도가 다른 우블렉

4) 코니컬 튜브에 채운 정도에 따른 변화

가) 코니컬 튜브에 우블렉을 채운 정도를 1/3, 2/3, 1로 해 우블렉을 담는다.



그림 21 채운 정도에 따른 사진

위와 같은 방식으로 우블렉을 제작한 뒤, 교반기와 전기전도도 센서를 이용하여 실험을 진행하였다. 그 후 얻은 데이터는 다음과 같다.

1) 전분의 종류에 따른 전기전도도 변화

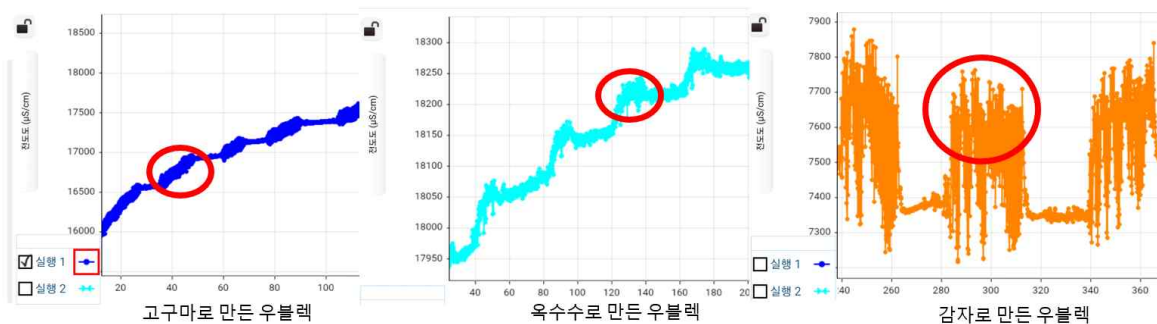


그림 22 종류별 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화 그래프

다양한 전분을 이용하여 우블렉을 제작한 뒤, 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화를 관찰한 결과, 감자 전분이 진동을 주기 전후의 전기전도도 변화가 가장 적었으며, 전기전도도의 진동이 감자 전분으로 제작한 우블렉에서 가장 관측하기 좋았다.

2) 전분과 물의 비율에 따른 전기전도도 변화

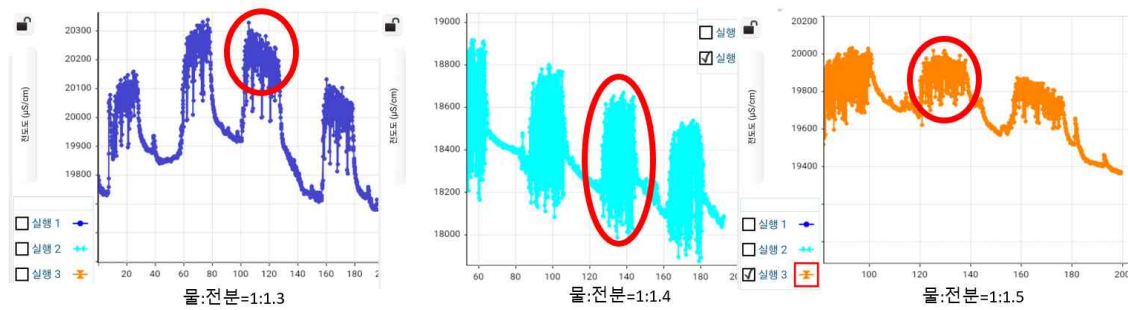


그림 23 전분과 물의 비율을 다양하게 하여 진동을 줄 때 전기전도도의 변화 그래프

물과 전분의 비율을 다양하게 하여 우블렉을 제작한 뒤, 우블렉의 전기전도도를 관찰하였다. 그 결과, 물과 전분의 비율이 1:1.6 이상이거나, 1:1.2 이하에서는 진동에 따른 우블렉의 전기전도도 변화를 관찰하기 힘들었다. 따라서 진동에 의한 전기전도도의 변화를 관찰할 수 있는 우블렉의 전기전도도 그래프가 위의 세 개의 그래프이다. 위 그래프를 보면 물과 우블렉의 비율이 3개 모두 변화하는 모습을 볼 수 있다. 하지만 물과 우블렉의 비율이 1:1.5일 때 노이즈가 가장 적게 발생했다는 점과 계량이 용이하여 1:1.5의 비율을 선택하였다.

3) 물과 전해질의 비율에 따른 전기전도도 변화

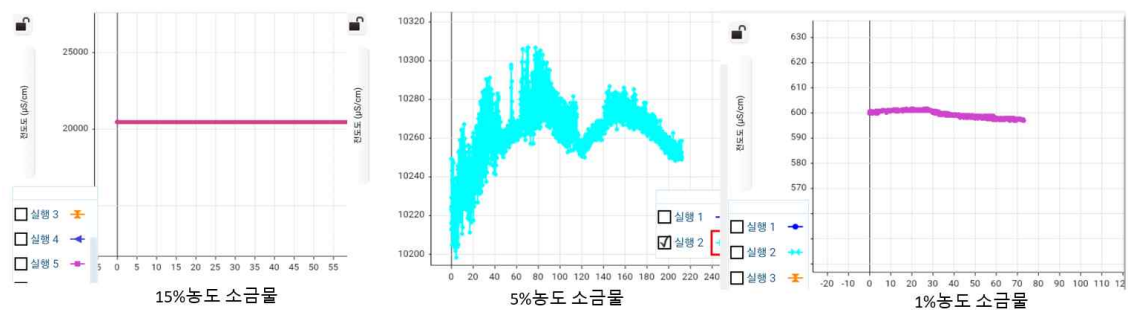


그림 24 소금물의 농도를 다양하게 하여 우블렉을 제작한 뒤 전기전도도의 변화 그래프

물과 소금의 비율을 다양하게 하여 우블렉을 제작한 뒤, 우블렉의 전기전도도 변화를 측정하였다. 그 결과 우블렉을 제작할 때 소금을 첨가하는 것은 우블렉의 물성에 영향을 주지 않았다. 따라서 우리가 보유하고 있는 센서가 측정할 수 있는 범위 내의 중간값인 5% 농도의 소금물을 사용하여 우블렉을 제작하기로 선택하였다.

4) 코니컬 튜브에 채운 정도에 따른 변화

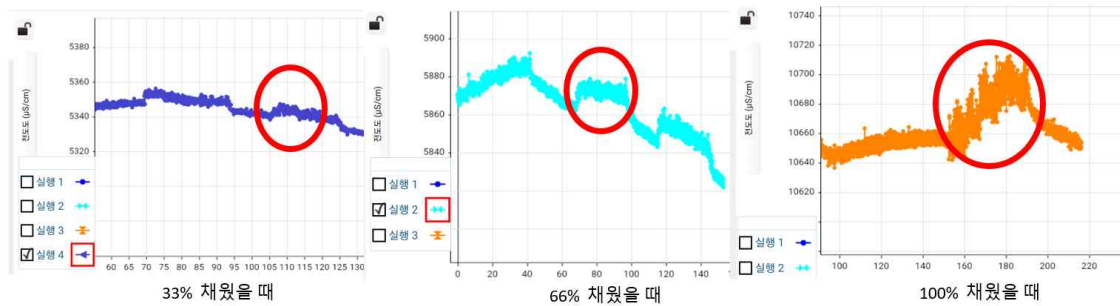


그림 25 코니컬 튜브에 채운 정도를 다르게 한 뒤 전기전도도 변화 그래프

코니컬 튜브에 우블렉을 채운 정도에 따른 우블렉의 전기전도도 변화를 관찰한 결과 33%에서는 전기전도도의 변화가 있었지만, 그 변화가 미미하여 관찰하기 힘들었고, 100%에서는 전기전도도의 그래프가 노이즈가 많아 66%를 채워 실험을 진행하였다.

2. 본 탐구 - 외력에 따른 우블렉의 전기전도도 변화

가. 우블렉의 충격에 따른 전기전도도의 변화

탐구 1 - 가를 통하여 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도가 진동으로 인하여 변화함을 알 수 있었다.

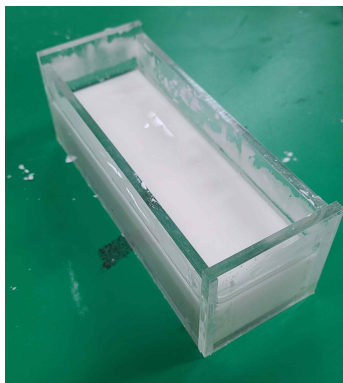


그림 26 실험용 아크릴박스

탐구1 - 가를 통하여 우리의 실험에 가장 적합한 우블렉을 제작하였다. 그 후 우블렉에 충격을 주었을 때 전기전도도의 변화가 어떤지 조금 더 자세하게 관찰하여 보기 위해 아래의 실험을 진행하였다. 또한, 코니컬 튜브를 이용한 실험은 우블렉에 진동을 줄 때 우블렉에 닿아 있는 벽의 형태가 원형이기 때문에 코니컬 튜브 속 우블렉 내부의 유속이나, 전단변형률이 다르게 발생할 것이 우려되었다. 따라서 더욱 통제된 전단변형률을 주기 위하여 위와 같은 내부의 넓이가 150*50*50 (가로*세로*높이, mm) 크기의 옆면이 정사각형인 직육면체 모양의 틀을 아크릴 5T로 제작하여 실험에 사용하였다.

1) 실험 방법

- 가) 우블렉을 실험1에서 정의한 ‘표준 우블렉’ 조건으로 제작한다.
- 나) 우블렉을 직사각형 통에 담은 뒤, 전기전도도 센서의 전극이 우블렉의 중간 지점까지 잠기도록 한다.
- 다) 우블렉을 통에 담은 순간을 0초로 하여 5초에 추를 놓아 충격을 주었다.
- 라) 25cm 높이에 250g의 추를 실로 연결한 뒤, 45도 각도에서 추를 놓아 우블렉에 일정한 충격을 주며 우블렉의 전기전도도 변화를 관찰하였다.



그림 27 충격 실험 모습

그 결과로 아래와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 아래에서 보이는 것처럼 충격을 주었을 때는 전기전도도가 즉각적으로 증가하지만, 원래의 전기전도도로 돌아갈 때는 즉각적으로 감소하는 것이 아닌 서서히 감소해 원래의 전기전도도에 도달하기까지 시간이 걸리는 모습을 볼 수 있었다. 이를 통하여 다음 같은 가설을 세울 수 있다.

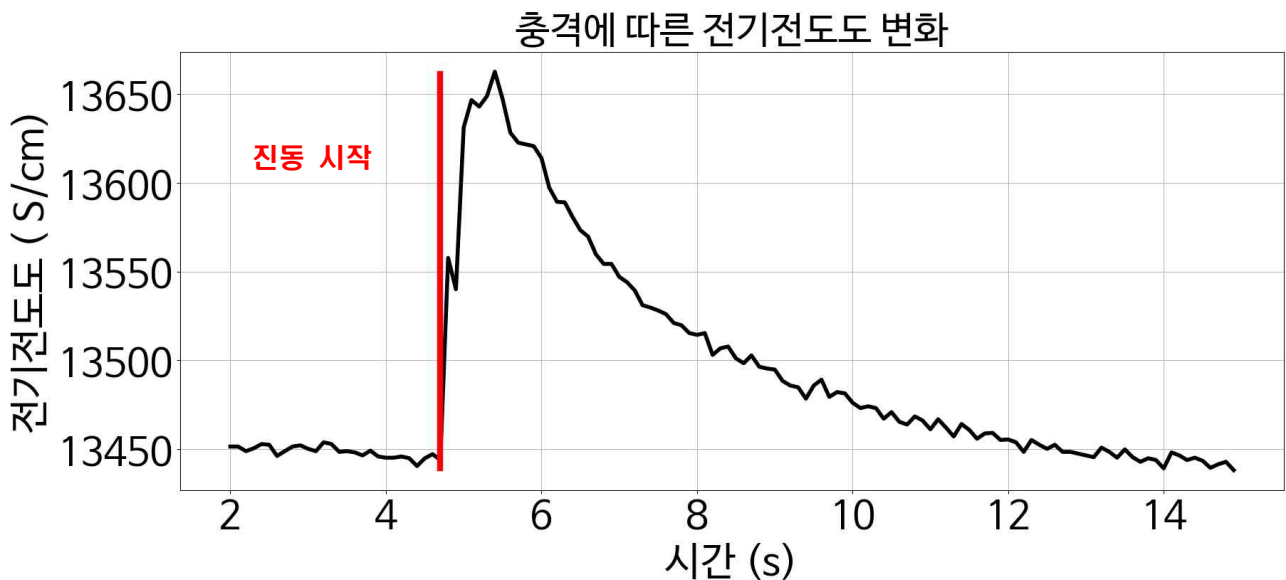


그림 29 충격을 줬을 때 우블렉의 전기전도도 변화

우블렉에 진동을 주었을 때 벽과 가까이 있는 우블렉은 정지상태이고, 가운데 쪽에 있는 우블렉은 $\sin$ 파의 진동을 주었으므로 아래와 같은 $\sin$ 파와 비슷한 그래프의 개형으로 운동할 것이다.

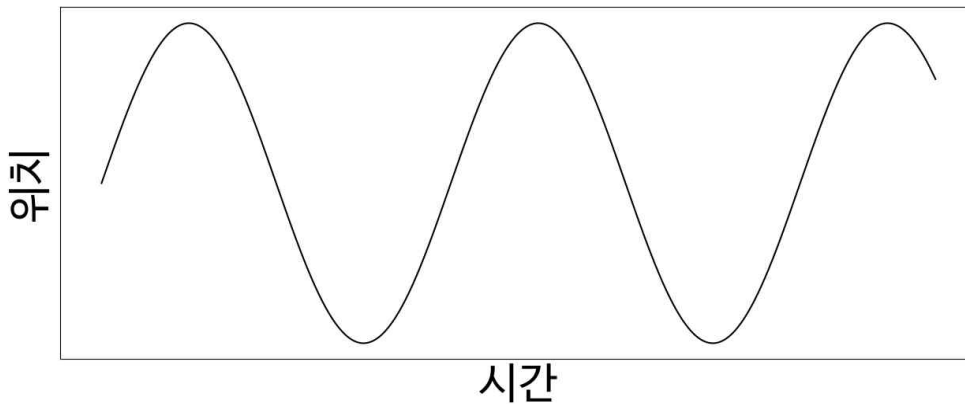


그림 30 우블렉
중간 입자의 변위

따라서 우블렉에 발생하는 전단변형률은 충격에 수평 방향인 벽과 움직이는 지점의 속도 차이에 의해 발생한다. 따라서 전단변형률은 다음의 그래프와 같이 $\cos$ 파일 것이다.

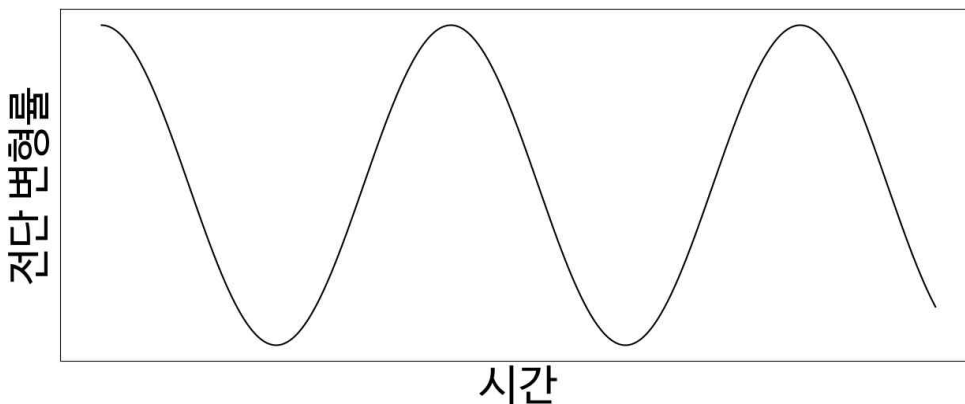


그림 31 우블렉의
중간 부분 입자가
받는 전단변형률

하지만 전단변형률은 속도 차이의 크기에 의해 생기므로 $\cos$ 파가 아닌 아래처럼 $|\cos|$ 의 모양일 것이다. 스칼라값인 전기전도도를 측정하는 것이기에 전단변형의 방향은 무시한다.

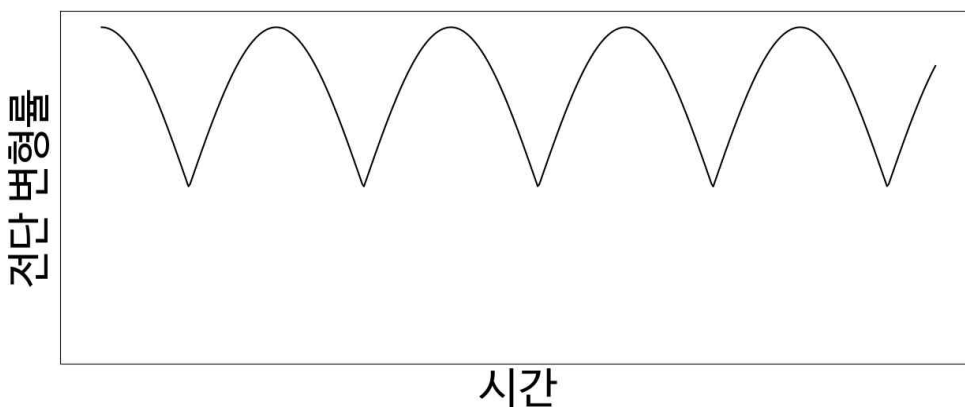


그림 32 우블렉의
중간 부분 입자가
받는 실제 전단변
형률

위의 내용을 반영하면 우블렉은 위와 같이 전기전도도가 변할 것이다. 하지만 실험 2-

가 에서 얻은 결과처럼 우블렉이 전단변형에는 즉각적으로 반응하지만, 원래의 전기전도도로 돌아갈 때는 일정 시간이 걸림을 알 수 있다. 즉, 이전 충격으로 인해 올라갔던 전기전도도가 다 내려가지 못한 순간에 다시 전기전도도가 올라가고, 따라서 전기전도도가 다 감소하지 못하기 때문에 평균적으로 전기전도도가 올라갈 것이다. 즉, 이전의 전단변형에 의한 전기전도도 변화가 아직 변하지 못해 내려가는 와중에 다시 증가하기 때문에 두 개의 $|\cos|$ 파가 중첩된 듯한 아래와 같은 그래프를 그릴 것이라고 예상한다.

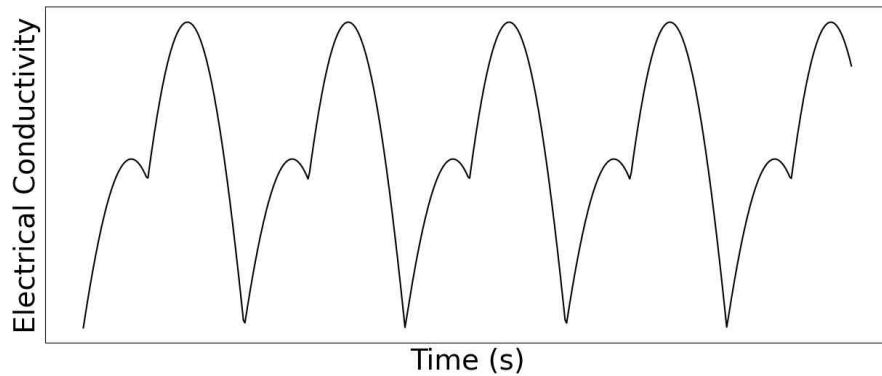


그림 33 우블렉을 진동시킬 시에 전기전도도 변화를 예측한 그래프

나. 우블렉의 진동에 의한 전기전도도의 변화

앞선 실험을 통하여 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화를 예측해 보았다. 그 후 실제 실험을 통하여 우블렉에 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도 변화를 자세히 관찰해보도록 하였다. 우리의 전기전도도 센서 주기가 2 ~ 10Hz 이기 때문에 전기전도도의 변화를 자세히 관찰하기 위하여 진동의 주기를 0.5Hz로 해 전기전도도의 변화를 자세하게 관측해보았다.

1) 실험방법

- 가) 우블렉을 실험1에서 정의한 ‘표준 우블렉’ 조건으로 제작한다.
- 나) 우블렉을 직사각형 통에 담은 뒤, 전기전도도 센서의 전극이 우블렉의 중간 지점까지 잠기도록 한다.
- 라) 우블렉에 1Hz의 진동을 주며 우블렉의 전기전도도 변화를 측정한다.
- 마) 얻은 전기전도도 데이터는 엑셀을 이용하여 처리 후 시각화한다.

2) 실험 결과

우블렉에 1Hz의 진동을 주며 우블렉의 전기전도도 변화를 관찰한 결과는 다음과 같다.

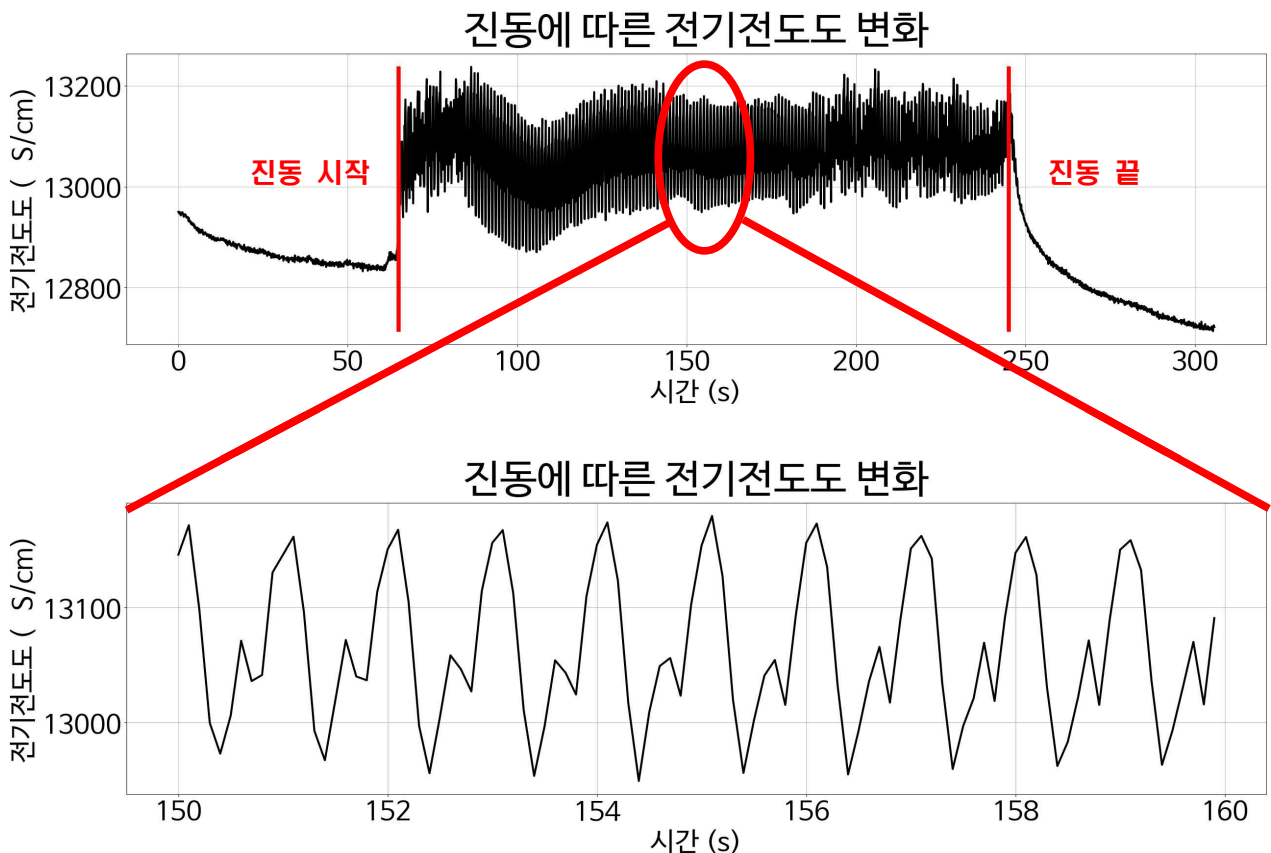


그림 36 우블렉에 1Hz 진동을 주었을 때 전기전도도의 변화

위와 같이 진동을 주기 시작했을 때 전기전도도가 상승하며 주기적으로 진동하는 모습을 관찰할 수 있다.

진동을 줄 때의 그래프를 확대하여 보면 위와 같이 그래프의 개형이 주기적으로 반복되는 형태를 띠는 것을 알 수 있다. 이때 반복되는 파형의 주기가 1초 간격으로 나타남을 알 수 있다. 또한, 전기전도도가 상승한 뒤 조금 감소했다가 다시 크게 증가하는 부분이 생기는 모습을 볼 수 있고, 이 부분 또한 1초 간격으로 나타나는 모습을 볼 수 있다. 이는 이전 실험에서 예측했던 것처럼 쇠뿔값 이전에 움푹 들어간 모양이 반복해서 나타남을 확인할 수 있다.

다. 전기전도도 센서의 위치에 따른 전기전도도 변화양상 확인

우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도가 변화하는 현상을 위의 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 선행연구를 통해 점도와 전기전도도가 비례한다는 사실을 알 수 있었다. 점도는 우블렉의 부분별 전단변형률을 통해 확인할 수 있으므로 우블렉에 주는 진동이 우블렉에 어떤 전단변형률이 생기는지 확인해야 했다. 따라서 진동에 따라 부분적으로 변화하는 우블렉의 전단변형률은 전기전도도를 이용하여 측정해보았다. 아래의 실험을 진행할

때 우블렉의 일정한 혼합 정도를 유지하기 위하여 우블렉을 큰 통에 제작하였다. 그 후 실험을 진행할 때 우블렉을 계속해서 섞어주며 일부를 덜어 실험에 사용하고, 실험이 끝난 뒤 다시 혼합하여 같은 전분 농도와 소금 농도를 유지하고자 하였다. 하지만 아래의 그래프에 나온 것처럼 동시에 하나의 통에서 진행한 실험임에도 불구하고 실험을 시작할 때의 전기전도도 측정값이 서로 다른 모습을 볼 수 있다. 이를 통하여 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도 변화양상은 관측할 수 있었으나, 실험 과정에서 우블렉의 농도에 대한 변인 통제가 잘 이뤄지지 않았음을 알 수 있었다. 따라서 추후 탐구로 우블렉의 농도를 일정하게 유지하며 전극의 오차를 보정하고, 반복 실험을 통하여 더욱 정확성 높은 데이터를 얻을 예정이다.

1) 실험 방법

가) 우블렉을 실험 1에서 정의한 ‘표준 우블렉’ 조건으로 제작한다.

나) 우블렉을 담아 실험할 통을 제작하기 위해 내부가 14*14*6cm인 직육면체를 제작한다. 그 후 높이를 0.5cm 간격으로 10개, 진동과 수직인 방향으로 5개, 진동과 수평인 방향으로 5개를 뚫어서 제작한다.

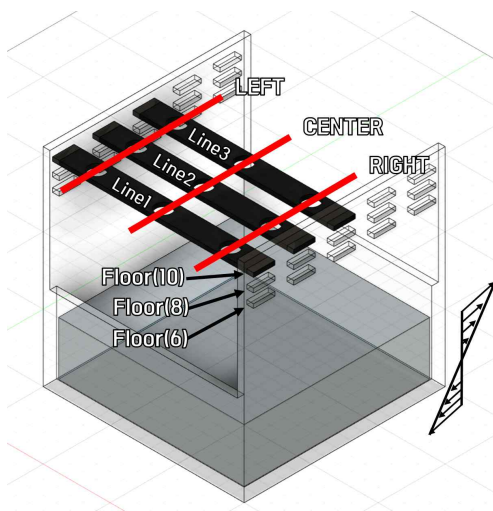


그림 37 실험용 통 제작 모식도

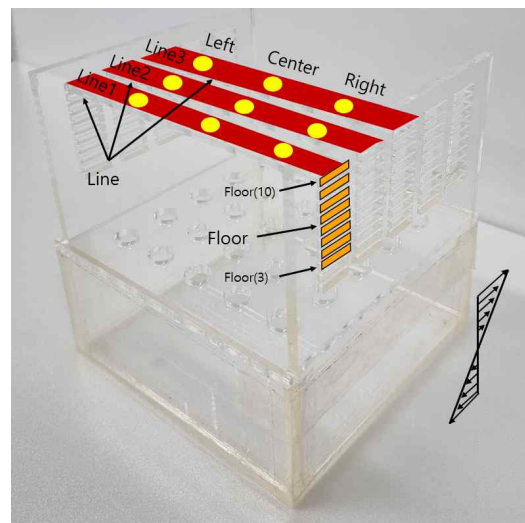


그림 38 실험용 통 실제 제작 사진

다) 같은 라인에 전기전도도 센서를 3개 꽂은 후 Floor 10, 8, 6으로 3단계, Line 1, 2, 3으로 3단계, Hz를 2단계로 나누어서 총 18번의 실험, 54개의 전기전도도 변화데이터를 얻는다.

라) 모든 실험에서는 균일한 우블렉의 혼합 상태를 위해서 큰 통에 우블렉을 제작한 뒤, 계속해서 섞어주었다. 그리고 우블렉을 통에 옮겨 담았을 때를 0초로 하여 1분간 전기전도도를 측정하며 정지시켜놓았다. 그 후 3분간 진동을 주며 전기전도도를 측정, 4분째 되는 구간에서 진동을 멈췄다. 그 후 1분간 우블렉을 관찰하며 전기전도도를 측정하였다.

2) 실험 결과

아래의 그래프 제목에 Line은 진동에 수직인 벽과의 거리를 의미하고 Line 1이 진동 방향에 수직인 벽과 가장 가깝고, Line 3이 가장 멀다. Floor은 바닥에서의 높이를 의미한다, Floor 10은 전기전도도 센서의 극이 가장 바닥에서 멀고, 6은 바닥에 가장 가깝다. LEFT, RIGHT, CENTER는 진동에 평행한 벽과의 거리를 의미한다. LEFT, RIGHT는 진동에 평행한 벽과의 거리가 가깝고, CENTER는 정중앙에 위치한다. Hz는 우블랙에 주는 진동의 진동수를 의미한다.

가) 시간의 흐름에 따른 전기전도도의 변화

1. 실험값들의 전기전도도 변화양상을 보면 높이에 따라 전기전도도가 시간이 지남에 따라 서로 다르게 변화하는 모습을 볼 수 있다.

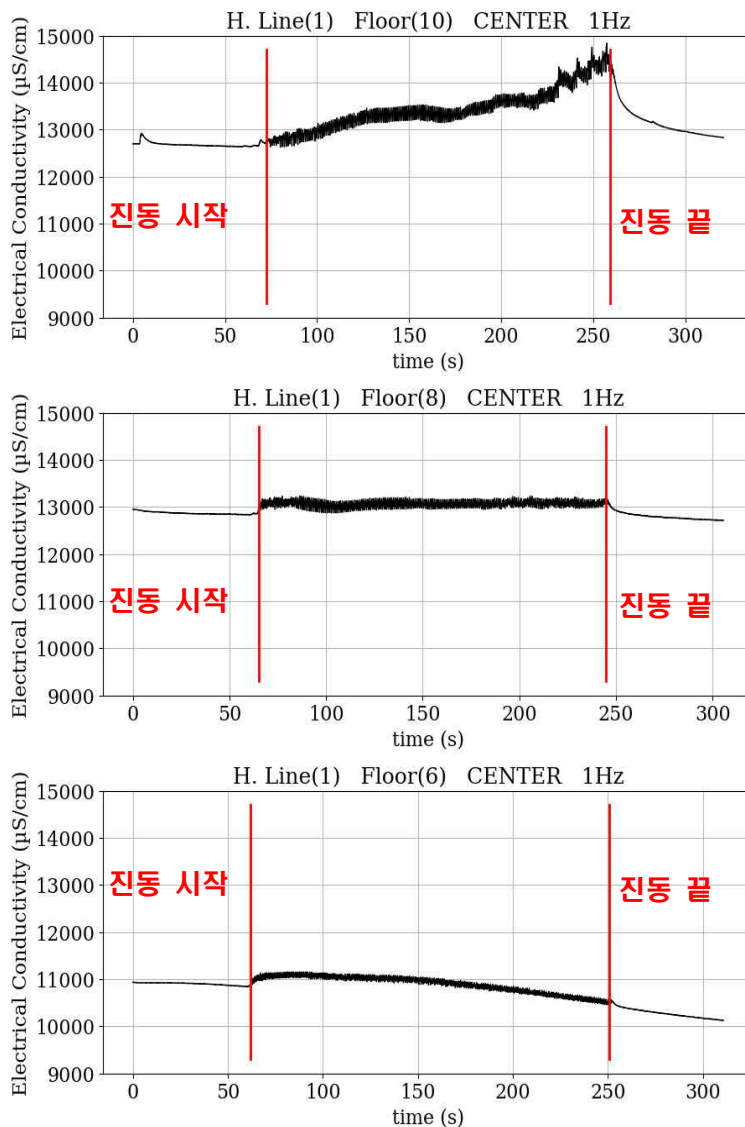


그림 41 높이에 따른 전기전도도 변화

Floor10은 우블랙 윗부분의 전기전도도 변화를 관찰한 그래프이다. 이때 그래프를 보면 진동을 주는 동안 전기전도도가 높아지는 경향성을 띠는 모습을 볼 수 있다. Floor6은 우블랙 아랫부분의 전기전도도 변화를 관찰한 그래프이다. 이 그래

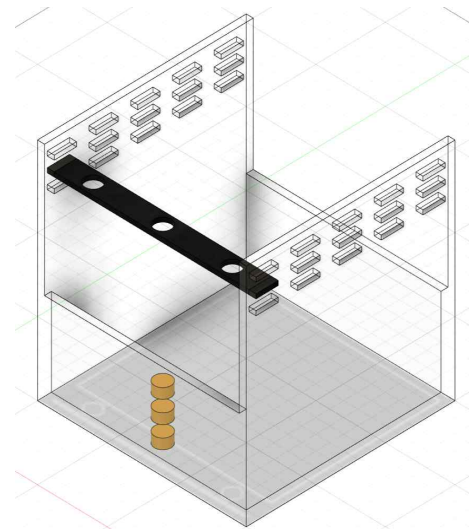


그림 39 전기전도도 측정 지점

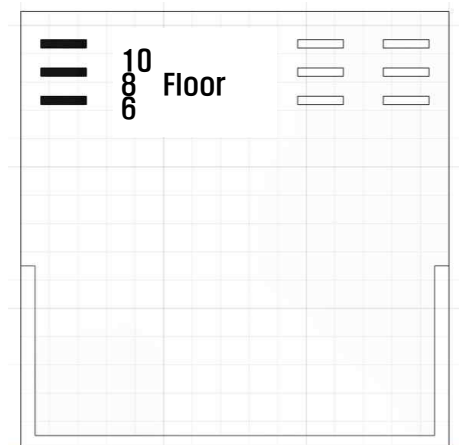


그림 40 Floor 위치 모식도

프 또한 진동을 주는 동안 전기전도도가 낮아지는 경향성을 띠는 모습을 관찰할 수 있다.

위 데이터를 통하여 예측할 수 있는 것은 우블렉 내 전분이 시간이 지남에 따라 중력의 영향에 의해 바닥으로 내려가고 물이 위로 올라가게 된다. 따라서 물과 이온이 함께 이동하게 되고, 높이가 높은 쪽은 시간이 지남에 따라 전기전도도가 증가하고, 높이가 낮은 쪽은 시간이 지남에 따라 전기전도도가 감소하는 것으로 예상할 수 있다. 이 가설이 맞는다면 전기전도도를 통하여 우블렉 부분의 전분 농도 변화 또한 측정할 수 있을 것으로 예측한다.

대부분의 측정한 데이터들은 측정한 부분의 높이가 높으면 전기전도도도 진동을 주었을 때 따라서 높아지고, 측정한 부분의 높이가 낮으면 전기전도도가 감소하는 경향을 띠었다. 하지만 Line 1 Floor 10등 몇몇 그래프에서는 진동을 주었을 때 전기전도도가 유지거나, 예상과 반대로 움직이는 등 예측과는 일치하지 않아 반복 실험과 변인 통제를 통하여 정확한 데이터를 얻을 예정이다.

2. 진동을 일정 시간 동안 주어 우블렉이 정상상태가 되었을 때 진동을 멈추면 전기전도도가 충격을 주었을 때의 전기전도도 변화 그래프처럼 증가했다가 감소하는 모양을 띤다. 이처럼 진동을 멈추었을 때 전기전도도가 상승하는 현상은 전기전도도를 측정한 위치에 상관없이 관찰할 수 있었다.

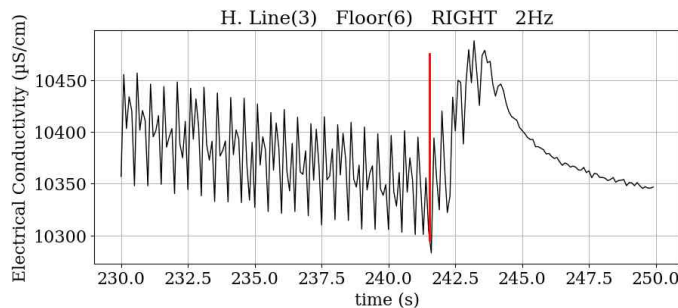


그림 42 진동을 주다가 멈추었을 때의 전기전도도 변화(우블렉의 위 부분, 통의 중간 지점의 전기전도도를 측정한 데이터)

나) 진동에 수평 방향 벽과의 거리에 따른 전기전도도의 변화

LEFT와 RIGHT는 진동에 평행한 벽과의 거리가 CENTER에 비해서 가까운 센서이다. 이때, 아래의 그래프처럼 벽과 가까운 쪽은 전기전도도가 가운데에 비해 높아지는 경향을 띠는 것을 확인할 수 있었다.

이때, 위 그래프에서 볼 수 있듯 처음 전기전도도의 시작 값이 13000, 11000, 12700 μ S 가량의 값으로 한 통에서 우블렉을 덜어 사용했지만, 전기전도도 측정값이 다름을 보아 우블렉의 혼합 정도가 부분에 따라 다르게 분포하고 있고, 골고루 섞이지 않음 알 수 있다. 따라서 추후 실험에서는 전분의 농도를 일정하게 유지하며 실험을 반복 수행하여 더욱 정확한 데이터를 얻을 예정이다.

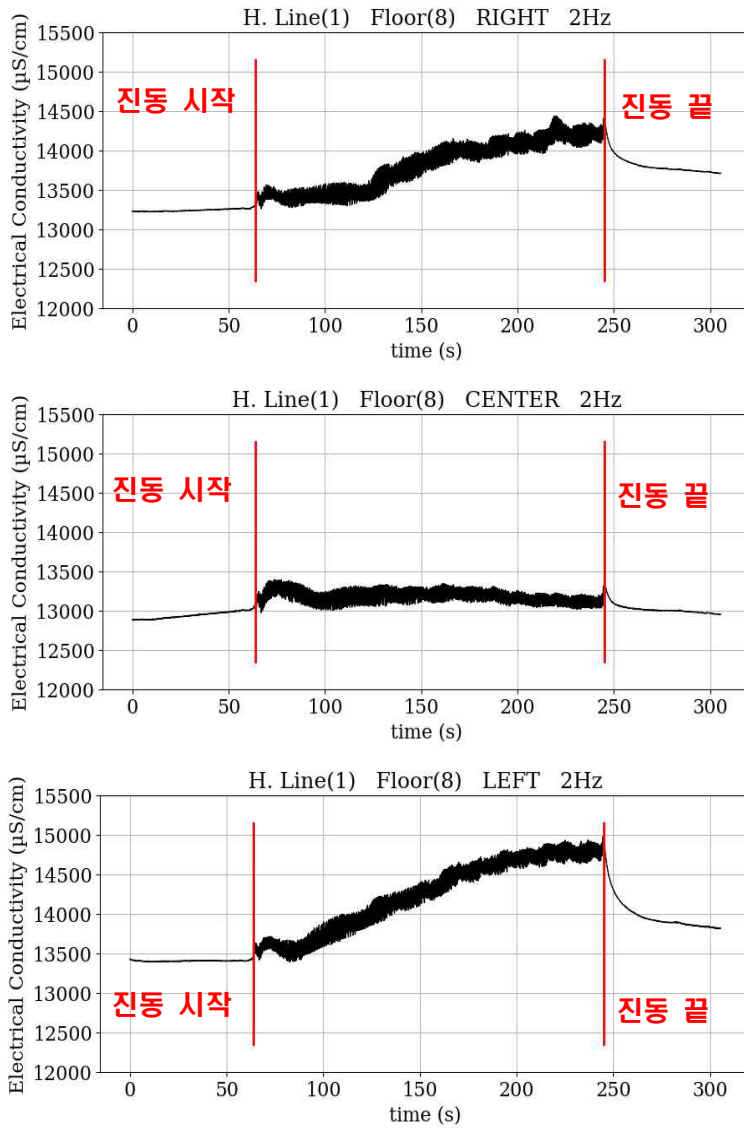


그림 45 진동과 수평인 벽과의 거리에 따른 전기전도도 변화

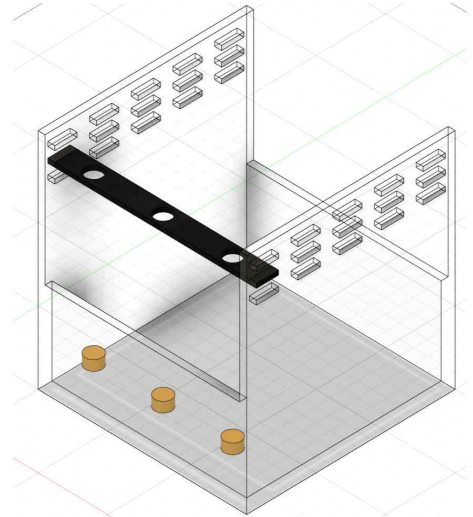


그림 43 전기전도도 측정 지점

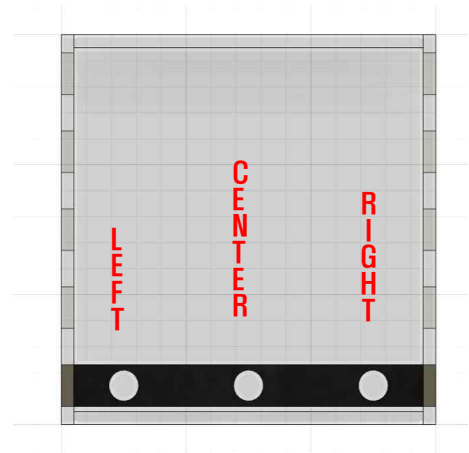


그림 44 위치 모식도

위 그래프를 보면 Floor가 8일 때 진동을 주기 시작함에 따라 전기전도도도가 LEFT와 RIGHT는 증가하지만, CENTER는 유지되는 모습을 볼 수 있다.

이를 통하여 우블랙에 주는 진동이 우블랙 내부에서 전분 가루를 통의 가운데 쪽으로 이동시키는 것으로 예측할 수 있을 것이다.

다) 진동에 수직 방향 벽과의 거리에 따른 전기전도도의 변화

Line은 앞쪽 벽과 가까운 정도를 의미한다. 이때, LEFT, RIGHT와는 다르게 Line3가 통에서 보았을 때는 중앙에 위치하고, Line 1이 벽에 가장 가까운 센서를 의미한다.

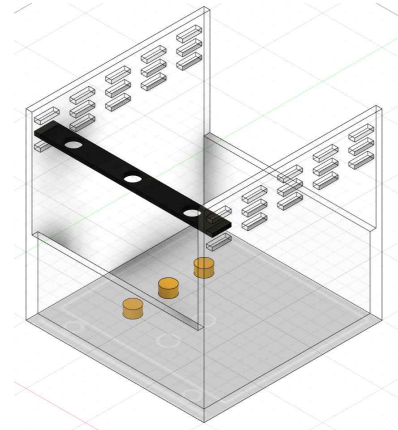
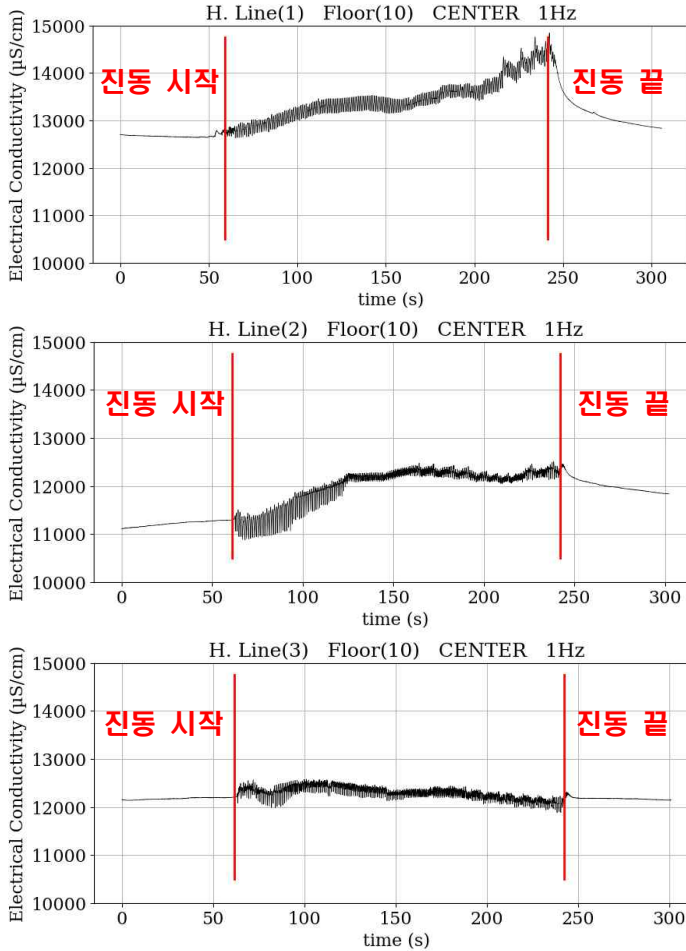


그림 47 전기전도도 측정 지점

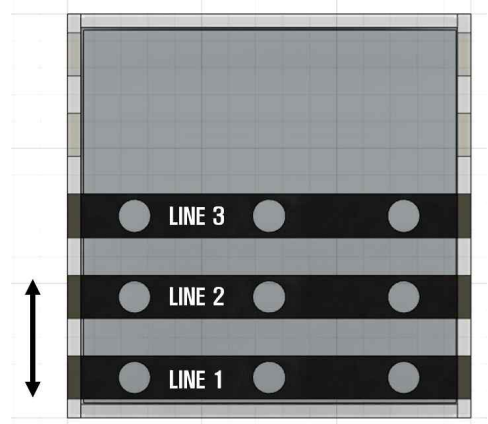


그림 48 진동에 수직인 벽과의 거리에 따른 전기전도도 변화 그림 46 LINE 위치 모식도

위 그래프를 보면 Line 1에서 진동을 주었을 때 전기전도도가 상승하고, Line2에서 조금 상승, Line 3에서 거의 유지되는 모습을 볼 수 있다. 이를 통하여 진동 방향에 수직인 벽과 가까울수록 전기전도도가 진동을 줄 때 증가하는 경향을 띄는 것을 알 수 있다.

이를 통하여 예측 할 수 있는 점은 우블렉에 진동을 줄 때 우블렉 내의 전분이 진동에 수직 방향인 벽으로부터 떨어져 전분 농도가 묽어지는 것으로 예상 할 수 있다.

하지만 센서의 반복적인 사용으로 인해 전극의 저항값이 늘어나 전기전도도가 변화하고, 센서의 배터리가 부족하여 데이터에 노이즈가 끼는 등 측정 과정에서 문제가 생겨 반복 실험을 통해 추후 재측정을 진행할 예정이다.

V

결론 및 활용 방안

1. 결론 및 향후 탐구계획

가. 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도는 진동의 영향을 받는다.

- 1) 우블렉에 진동을 주었을 때 우블렉의 전기전도도가 상승한다.
- 2) 우블렉에 진동을 주었을 때 전기전도도가 진동의 2배 진동수로 진동한다.
- 3) 우블렉에 진동을 주다가 멈췄을 때 전기전도도가 잠깐 상승했다가 서서히 감소한다.

나. 향후 탐구계획

- 1) 기존에 했던 실험의 변인을 통제하며 데이터 재측정
- 2) 회전식 점도계를 이용한 전단변형률에 따른 점도, 전기전도도 변화 관찰
- 3) 전기전도도 센서의 극 보호를 위한 가림 판이 전기전도도 변화에 끼치는 영향 탐구
- 4) 우블렉의 상변화 원리에 대해 알아보기 위한 우블렉에 충격을 줄 때 우블렉의 부분별 전기전도도가 변하는 범위 확인
- 5) 우블렉의 전기전도도가 변하는 진동의 범위에 관해 탐구
- 6) 진동에 수직인 벽과의 거리에 따른 전기전도도 변화 차이의 이유 탐구

2. 활용 방안

가. 기존의 비뉴턴 유체와 관련된 실험은 대부분 회전식 점도계를 이용하여 점도를 측정한다. 따라서 농도와 점도를 부분적으로 측정할 수 없다. 우리 연구를 통해 점도와 전기전도도가 반비례한다는 사실이 밝혀진다면 전기전도도를 이용해 용액의 일정 부분의 농도나 점도를 측정할 수 있을 것이다.

나. 이처럼 부분적으로 점도나 농도를 측정할 수 있다면 우블렉에서 나아가 비뉴턴 유체의 새로운 연구 방법론을 제시하는 것이며, 전체가

아닌 부분 측정을 통해 우블렉의 특성에 대해 더 구체적인 연구 결과를 얻을 수 있을 것이다.

다. 우블렉의 전기전도도 변화가 우블렉에 가해지는 진동의 정보를 포함하고 있으므로 우블렉의 전기전도도 변화를 통하여 역으로 진동에 대해 알아내는 진동센서의 역할을 할 수 있을 것이다.

VI 참고문헌

- [1] Qian Chen, Mei Liu, Shouhu Xuan, Wanquan Jiang, Saisai Cao, Xinglong Gong (2017). Shear dependent electrical property of conductive shear thickening fluid. *Materials & Design*, 121, 92-100. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.056
- [2] Brian H. Shen, Gabriel M. Veith, Wyatt E. Tenhaeff and Robert L. Sacchi(2017). Predictive Design of Shear-Thickening Electrolytes for Safety Considerations. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(12), A2547. DOI: 10.1149/2.1171712jes.
- [3] Kun Lin, Hongjun Liu, Minghai Wei, Annan Zhou and Fanrui Bu(2019). Dynamic performance of shear-thickening fluid damper under long-term cyclic loads. *Smart Materials and Structures*, 28(2), 025007. DOI: 10.1088/1361-665X/aaf079.
- [4] A Basic Introduction to Rheology.
<https://cdn.technologynetworks.com/TN/Resources/PDF/WP160620BasicIntroRheology.pdf>
- [5] Baptiste Darbois Texier, Henri Lhuissier, Yoël Forterre & Bloen Metzger(2020). Surface-wave instability without inertia in shear-thickening suspensions. *Communications Physics*, 3, 232. DOI: 10.1038/s42005-020-00500-4.
- [6] V. Siva Rama Krishna, Shaik Hussain, CH. Ravi Kiran, K. Vijaya Kumar(2021). Experimental evaluation of impact energy on oobleck material (non-Newtonian fluid). *Materials Today: Proceedings*, 45(Part 2), 3609-3617. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.1112.
- [7] Neil Y.C. Lin, Christopher Ness, Jin Sun, Itai Cohe(2016). Tunable shear thickening in suspensions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39), 10774-10778. DOI: 10.1073/pnas.16083481.