

탐구 보고서

저주파에 의한 미세플라스틱의 밀도 기반 분류 실험

김여은, 박소희, 박장형, 방소운

1. 탐구 동기 및 목적

현대 사회에서 플라스틱 사용량이 급증하면서, 그로 인한 환경 오염이 심각한 문제가 되고 있다. 특히 눈에 보이지 않는 미세플라스틱은 생태계에 장기간 잔존하며 생물에 흡수되어 축적되거나 인체에 피해를 유발할 수 있다.

하지만 미세플라스틱은 재질에 따라 독성, 분해성, 생물 축적성이 다르기 때문에, 단순한 제거보다 종류에 따라 분류하는 것이 매우 중요하다.

이에 따라 본 실험은 물 위에 떠 있는 다양한 미세플라스틱을 물리적 특성, 특히 밀도와 감쇠 시간 차이를 이용하여 분류할 수 있는지 탐구하고자 한다. 이를 통해 친환경적이고 효율적인 미세플라스틱 분류 기술의 가능성을 확인하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 초음파와 입자 운동

초음파는 20kHz 이상의 소리로, 매질을 따라 전달되는 종파이다. 물과 같은 매질에서 초음파가 플라스틱 입자에 작용하면 수직/수평 방향의 힘이 전달되고, 이때 입자의 질량, 밀도, 탄성계수에 따라 반응이 달라진다. 매질 속에서 저주파에 비해 상대적으로 감쇠가 크고, 파장이 짧아 직진성이 우수해 반사와 산란에 강하다는 특징이 있다. 초음파 진단기나 음향 현미경 등에 주로 사용된다.

2.2 저주파와 입자 운동

저주파는 일반적으로 20Hz에서 200Hz 이하의 소리를 의미하며, 매질을 따라 전달되는 종파이다. 물과 같은 매질에서 저주파가 플라스틱 입자에 작용하면 수직 및 수평 방향으로 힘이 전달된다. 이때 입자의 질량, 밀도, 탄성계수에 따라 입자의 반응이 달라진다. 매질 내부에서 상대적으로 감쇠가 작고, 파장이 길어 굴절보다 회절에 강하다는 특징이 있다. 저주파 세정기나 물리 치료기에서 주로 사용된다.

2.3 감쇠 진동 이론

물 위에 떠 있는 물체가 외부 진동(예: 음파)을 받은 뒤, 진동원이 제거되면 운동은 점차 줄어들게 된다. 이를 ****감쇠 진동(damped oscillation)****이라고 하며, 운동 속도는 다음과 같이 지수적으로 줄어든다.

$$v(t) = v_0 e^{-c/m \cdot t} \quad (c: \text{감쇠 계수 (마찰력)}, m: \text{질량 (밀도} \times \text{부피)})$$

이때 감쇠 시간 t 은 입자의 밀도에 비례하므로, 감쇠 시간 측정을 통해 입자의 밀도 차이를 간접적으로 확인할 수 있다.

· 물리적 원리

외부 진동원이 제거된 후 물체에 관성력과 감쇠력이 작용한다. 관성력에 의해 물체는 외력이 사라져도 일정한 운동을 유지하려는 성질을 가진다. 이때 물체의 질량이 클수록, 운동이 유지되기 쉽다.

물체가 수면 위에 떠있을 때 물은 점성 저항과 표면 마찰을 제공한다. 이 감쇠력은 속도에 비례하여

다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$F_d = -cv$$

이때 c 는 감쇠 계수로, 물의 점성, 표면적, 물체의 형상 등에 의해 결정되는 상수이다.

· 운동 방정식

외부 진동이 제거된 후, 물체는 복원력이 거의 없는 상태에서 감쇠력만 받으며 운동한다고 가정하였으므로 물체의 운동은 다음의 1차 미분방정식으로 모델링된다.

$$m \frac{dv}{dt} = -cv$$

이를 풀면 위에서 제시한 물체의 속도 식을 구할 수 있다.

$$v(t) = v_0 e^{-\frac{c}{m}t}$$

이 속도 식을 통해 시간에 따라 물체의 진동하는 속도는 함수적으로 줄어들어 결국 0에 수렴하는 것을 알 수 있다.

운동에너지도 속도와 마찬가지로 감소한다. 운동에너지가 속도의 제곱에 비례하므로 운동에너지 식은 다음과 같다.

$$E(t) = \frac{1}{2}mv_0^2 e^{-2\frac{c}{m}t}$$

외부 진동이 제거된 시점 이후로 더 이상 에너지가 공급되지 않기 때문에, 운동 에너지는 감쇠력에 의해 열로 소산되며 점차 줄어든다.

이 이론적 원리를 적용하면, 동일한 부피의 서로 다른 플라스틱 조각을 수면에 띄운 뒤 외부 진동을 가하고 제거했을 때, 감쇠 시간이 밀도에 비례할 것임을 알 수 있다. 따라서 감쇠 시간을 측정하면 물질의 밀도 차이를 기반으로 한 분류가 가능하다는 이론적 결론을 얻을 수 있다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1 실험 재료

3.5% 소금물 30mL, 동일 크기의 플라스틱 조각 (PP, PS, PET) 3mm × 3mm × 0.1mm, 음파 발생을 위한 스마트폰 앱, 스피커, 스톱워치 (혹은 영상 기록 후 분석)

3.2 실험 방법

1. 용기에 3.5% 소금물을 채운다.
2. 플라스틱 조각을 종류별로 구분하여 동일한 크기로 준비한다.
3. 각 조각을 물 위에 띄운다.
4. 스피커를 통해 60Hz의 저주파를 5초간 가한다.
5. 이후 조각이 완전히 멈추는 시간을 측정한다.
6. 각 플라스틱 종류에 대해 30회 반복 실험을 수행한다.
7. 평균 감쇠 시간을 계산한다.

4. 실험 결과

횟수 \ 재료	PS	PP	PET
1	20.37	32.46	40.37
2	24.82	34.00	45.22
3	21.94	30.99	43.67
4	24.51	32.92	44.98
5	23.68	34.98	42.29

6	24.76	34.27	40.38
7	23.49	31.68	44.72
8	21.26	30.19	41.95
9	22.34	32.75	42.16
10	21.1	33.04	43.28
11	24.95	34.89	44.09
12	23.31	30.41	41.63
13	20.89	32.92	40.82
14	22.15	33.58	42.75
15	22.83	31.02	44.44
16	24.42	30.85	40.57
17	23.19	34.36	42.92
18	20.11	32.18	43.87
19	24.09	31.49	44.63
20	24.23	33.91	41.12
21	23.87	34.08	43.49
22	24.19	30.63	40.21
23	23.76	32.04	42.38
24	21.97	33.75	44.85
25	20.58	31.93	41.78
26	22.96	30.77	40.04
27	24.7	34.51	42.57
28	22.57	30.04	43.66
29	21.52	31.26	40.82
30	24	32.61	41.35

재질	밀도 (g/cm³)	감쇠 시간 평균 (초)
PS	0.15	22.94

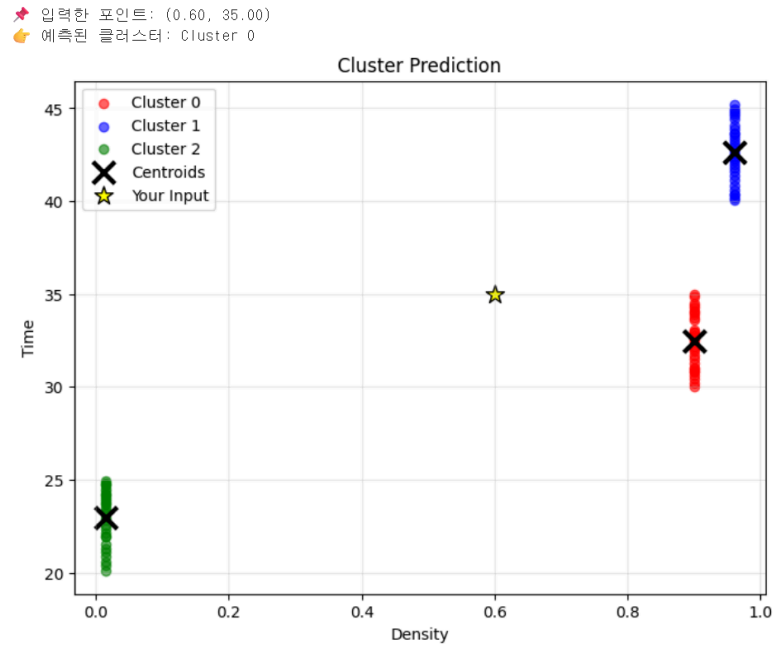
PP	0.90	32.41
PET	0.96	42.77

밀도가 높을수록 감쇠 시간도 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 동일 부피 조건이므로 질량 = 밀도 × 부피 관계에 따라, 감쇠 시간은 밀도에 비례함을 확인할 수 있다.

5. 결과 해석

플라스틱 조각이 멈추는 시간은 물과의 마찰력, 질량, 재질 특성 등 다양한 요인의 영향을 받는다. 플라스틱 조각들의 부피가 같으므로 밀도가 증가하면 질량 증가하면서 감쇠 시간까지 증가한다는 관계가 확인되었다. 이는 단순 감쇠 진동 모델과 일치하며, 분류 기준으로 사용할 수 있다. 또한, 플라스틱의 재질에 따라 진동 흡수(내부 마찰력, 분자 구조, 탄성계수 등) 특성이 달라져 추가적인 분류의 기준이 될 수 있음을 시사한다.

이번 탐구를 통해 수면 위에서 플라스틱 조각이 진동을 멈출 때까지의 감쇠 시간을 측정하면, 그 값이 플라스틱의 밀도와 밀접하게 연관되어 있음을 실험적으로 확인하였다. 동일한 부피의 **PP, PS, PET** 조각을 대상으로 여러 차례 실험을 진행한 결과, 밀도가 클수록 감쇠 시간이 길어지는 경향을 분명하게 관찰할 수 있었고, 이는 고전역학에서 제시하는 감쇠운동의 이론적 모델과도 일치하였다. 또한 실험 과정에서 여러 번의 실패를 겪으면서 실험 조건을 조정하고, 감쇠 시간의 측정 기준과 데이터 처리 방법을 개선하며 보다 신뢰성 있는 데이터를 확보하였다. 확보된 데이터를 기반으로 파이썬을 활용해 **k-means clustering** 알고리즘을 이용하여 사용자가 입력한 임의의 특성을 가진 플라스틱 조각이 어떤 종류의 플라스틱인지 구분하는 프로그램을 만들었다. 이를 통해 플라스틱의 감쇠 시간을 입력값으로 하여 재질별로 군집화하고 분류하는 데 성공하였다. 이러한 결론은 해양에서 심각한 환경 문제로 대두되는 미세플라스틱을 물리적 특성에 따라 효율적으로 분류할 수 있는 새로운 가능성을 제시한다는 점에서 의의가 크다.



분류 프로그램에 밀도 0.6, 감쇠 시간 40초인 임의의 플라스틱을 입력한 화면.

6. 결론

본 실험에서는 저주파에 의한 감쇠 시간 측정을 통해 플라스틱의 밀도 차이를 기반으로 분류하는 것이 가능함을 보였다. PET > PP > PS 순으로 감쇠 시간이 길었으며, 이는 밀도와 일치하였다. 플라스틱을 분류하는 프로그램을 더 발전시킨다면 추후 해양 오염을 추적하고 정화하는 데에 현재 사용되고 있는 여러 방법과 더불어 또 다른 한 가지의 방법으로 이용할 수 있을 것이다.

7. 반성 및 향후 보완점

7.1 실험의 한계

- 초음파 주파수 조절 장비의 부재로 고주파 실험은 수행하지 못함
- 조각 상태와 표면 장력 변화 등 외부 변수가 완전히 통제되지 못함
- 동일 조건을 만족하는 고정 장치가 부족하여 오차가 발생할 수 있음

7.2 보완 및 발전 방향

- 고출력 정밀 초음파 발생기와 고속 카메라를 이용한 정밀 측정

- 실험 데이터의 **K-means clustering**을 통한 자동 분류 알고리즘 고도화
- 다른 분류 요소(정전기, 표면 장력, 탄성계수 등)와의 연계 실험

8. 참고문헌

1. 환경보건종합정보시스템. (n.d.). 미세플라스틱이란?. 한국환경산업기술원.
<https://www.ehtis.or.kr>
2. 양선진 외. (2023). 토양 내 미세플라스틱 분석을 위한 유기물 제거 및 밀도차 분리 최적화. 환경독성보건학회 학술대회.
3. SpecialChem. (n.d.). *Plastics and Elastomers Table*.
<https://www.specialchem.com/plastics>