

출품번호

1154

제66회 전국과학전람회

충격과 진동에 따른 이산화탄소의 방출량 변화에 대한 탐구

2020. 9. 24.

출품학생	
지도교사	
구분	학생작
출품부문	물 리

목 차

1. 탐구 동기 및 목표	1
2. 이론적 배경 및 선행 연구 조사	1
가. 이론적 배경	1
1) 기체의 용해도	1
2) 기체의 용해 속도	2
3) 용해의 원리	3
4) 핵화 현상	3
5) 공동 현상	4
나. 선행 연구 조사	4
3. 탐구 내용 및 결과	4
가. 가설 설정	4
나. 실험 설계	4
1) 실험 개요	4
2) 변인 설정	5
3) 실험 목록	9
다. 실험 방법	10
라. 실험 결과	11
1) 상온에서 보관한 콜라를 그냥 뺐을 때 기체 방출량에 대한 실험 결과	11
2) 실험에 사용할 콜라는 몇 초를 흔들어야 적당한지에 대한 실험 결과	12
3) 콜라를 흔들고 뺐을 때 기체 방출량에 대한 실험 결과	13
4) 콜라에 충격을 주는 횟수에 따른 기체 방출량에 대한 실험 결과	14
5) 콜라에 진동을 주는 시간에 따른 기체 방출량에 대한 실험 결과	16
4. 원리 탐구	18
가. 실험 결과를 설명할 수 있는 원리 찾기	18
나. 나. 원리 설명을 위한 새로운 가설 검증 실험	19
5. 결론 및 활용 방향	20
6. 참고 문헌	21
7. 부록	22

1

탐구 동기 및 목표

탄산음료를 실수로 떨어뜨리거나 흔들었을 때 뚜껑을 열면 거품이 많이 발생하며 터지고 탄산음료의 탄산이 많이 빠지게 된다. 그래서 탄산음료의 폭발을 방지하기 위해선 병의 뚜껑을 때리면 된다는 속설이 있는데, 우리는 이 행동이 실제로 효과가 있는지, 만약 그렇다면 왜 그런 효과가 나타나는지 궁금해서 이를 탐구하고자 하였다.

처음 탐구에서는 속설을 그대로 재현하여 콜라의 뚜껑에 충격을 주는 횟수에 따라 콜라에서 방출되는 탄산의 양이 어떻게 변하는지 확인하고자 하였고, 이후의 탐구에서는 충격을 주는 것과 진동을 주는 것이 비슷한 효과를 보이지 않을까 생각하여 콜라병의 옆면에 진동을 가하는 시간에 따라 콜라에서 방출되는 기체의 양이 어떻게 변하는지에 대해 탐구하고자 하였다.

또한, 이렇게 얻어진 실험 결과를 설명하기 위하여 용해도, 용해 속도, 핵화 현상 등에 대해 조사하였고 이러한 원리를 이용해 충격과 진동이 콜라에서 이산화탄소 방출량에 미치는 메커니즘을 설명하고자 하였다.

2

이론적 배경 및 선행 연구 조사

가. 이론적 배경

1) 기체의 용해도

가) 물 1mL에 녹는 기체의 부피나 물 100g에 녹는 기체의 질량

나) 기체의 용해도는 기체의 종류에 따라 다르고, 온도와 압력에 따라서도 크게 달라짐

다) 기체의 종류와 용해도

라) 물에 잘 녹는 기체암모니아(NH_3), 염화수소(HCl), 황화수소(H_2S) 등과 같이 극성이 큰 기체

마) 물에 잘 녹지 않는 기체질소(N_2), 산소(O_2), 수소(H_2) 등과 같이 극성을 띠지 않는 기체

바) 온도에 따른 기체의 용해도

기체의 용해 과정은 발열 반응이므로 온도가 낮을수록 용해도가 증가

예1) 탄산음료의 뚜껑을 열고 실온에 두면 이산화탄소가 빠져나가 맛이 밋밋해짐

예2) 여름에는 수온이 높아져 물에 녹아있는 산소의 양이 감소하므로 물고기들이 호흡하기 위해 수면으로 올라옴

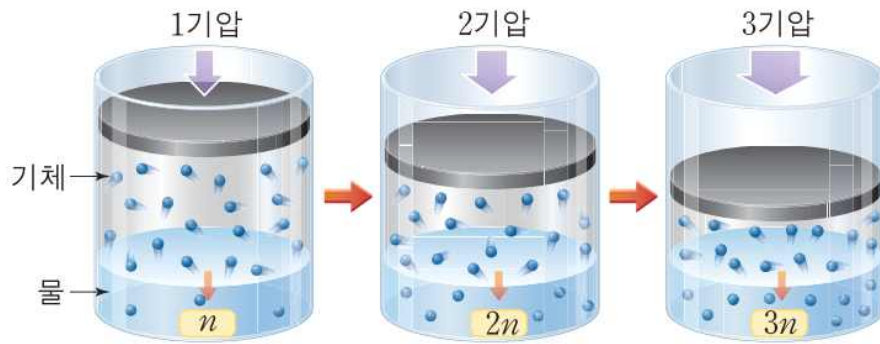
사) 몇 가지 기체 물질의 용해도

[표 1] 여러 가지 기체의 용해도

구분 \ 온도(°C)	0	20	40	60	80	100
암모니아	1176	702	398	—	—	—
염화수소	507	442	386	339	—	—
이산화탄소	1.71	0.88	0.53	0.36	—	—
산소	0.049	0.031	0.023	0.019	0.018	0.017
질소	0.024	0.016	0.012	0.010	0.0096	0.0095
수소	0.022	0.018	0.016	0.016	0.016	0.016

아) 압력에 따른 기체의 용해도: 압력이 높을수록 기체의 용해도는 증가

자) 헨리 법칙 : 질소(N_2), 산소(O_2), 수소(H_2)와 같이 용해도가 작은 기체의 경우 일정한 온도에서 일정량의 용매에 용해되는 기체의 질량은 그 기체의 부분 압력에 비례



[그림 1] 압력에 따른 기체의 용해도

암모니아 (NH_3), 염화수소(HCl), 황화수소(H_2S)와 같이 용해도가 큰 기체의 경우 압력에 관계없이 잘 녹으므로 헨리 법칙이 잘 적용되지 않는다.

예1) 탄산음료의 병뚜껑을 열면 질소 거품이 발생하면서 기체가 발생함

예2) 잠수부가 물속 깊이 잠수했다가 갑자기 물 밖으로 나오면 혈액에 녹아있던 기체가 빠져나오면서 혈액 순환 장애가 발생함

2) 기체의 용해 속도

용해란 용매 입자가 용질 입자를 둘러싸는 용매화로 인해 용질 입자가 다른 용질 입자로부터 떨어져 나오는 것이므로 용해의 빠르기는 **용매 분자와 용질 분자의 운동 상태와 용매 분자와 용질 분자의 접촉 기회에 따라 달라지게 된다.**

일반적으로 고체 용질을 액체 용매에 녹이는 경우 용해 속도를 빠르게 해 주려면 액체의 온도를 높여 주어 용매와 용질 분자의 운동 상태를 활발하게 해 주거나, 용질을 녹일 때 유리 막대 등으로 잘 저어 주며 녹이거나, 용액이 담긴 그릇을 잘 흔들어 주면 된다. 또 용질을 잘게 부수어 가루 상태로 만들어 녹이면 용질 분자와 용매 분자가 접촉하는 면적이 넓어지므로 용해 속도가 빨라지게 된다. **용해 속도는 용해도와는 다르며 단지 녹아 들어가는 속도만을 의미한다.** 용해도는 용해 속도가 아니라 용매에 녹을 수 있는 용질의 양적인 관계이다.

3) 용해의 원리

액체 용매에 고체 용질이나 액체 용질이 녹는 경우에 용해가 일어나는 원리는 다음과 같다. 용매 속으로 들어온 용질 입자를 용매 입자가 둘러싼다. 이를 용매화라고 하며 용매가 물인 경우는 수화라고 한다. 이 경우 용매 입자와 용질 입자 사이의 인력이 용질 입자들 사이의 인력보다 크면 용질 입자는 용매에 둘러싸인 채로 떨어져 나오게 된다. 이러한 과정으로 용질 입자가 녹게 되는 것이다. 이런 용해 현상이 잘 일어나려면 용매와 용질의 분자 구조가 비슷해야 하며, 용매와 용질 분자 사이의 인력이 용질 분자들 사이의 인력보다 커야 한다. 예를 들어 소금을 물에 넣으면 잘 녹지만 기름을 물에 넣으면 잘 섞이지 않으며 물 위에 뜨게 되는데 물과 기름은 분자 구조가 비슷하지 않기 때문이다. 대부분의 기체는 물에 잘 녹지 않지만 암모니아와 염화수소는 물과 아주 잘 섞인다. 이 이유는 암모니아와 염화수소가 물과 마찬가지로 극성이기 때문이다.

염화나트륨이 물에 녹는 경우 과정은 다음과 같다.

염화나트륨 결정이 물에 녹으면, 나트륨 이온(Na^+)이나 염화 이온(Cl^-)을 물 분자들이 둘러싸게 된다. 이 때 나트륨 이온은 (+)전하를, 염화 이온은 (-)전하를 띠므로, 나트륨 이온을 둘러싸는 물 분자는 전기적으로 (-)인 산소 원자가 나트륨 이온 쪽으로 향해 있고, 염화 이온을 둘러싸는 물 분자는 전기적으로 (+)인 수소 원자가 염화 이온 쪽으로 향해 있다. 이 수화 과정에 의해 염화나트륨 입자가 떨어져 나와 녹는 것이다.

암모니아를 물에 녹인 경우는 다음과 같다.

암모니아는 구성 성분이 질소와 수소인데 질소는 전기적으로 (-)이고 수소는 전기적으로 (+)이다. 그러므로 물 분자의 수소 원자 쪽이 암모니아의 질소 쪽을 에워싸고, 물 분자의 산소 원자 쪽이 암모니아의 수소 쪽을 에워싸면서 서로 섞이게 되는 것이다. 결론적으로 용해는 용질 입자와 용매 입자 사이의 친화도와 관계가 있는데, 용질 입자들 사이의 결합력보다 용질 입자가 용매와 결합하려고 하는 힘이 강하면 용질 입자는 떨어져 나와 용매와 섞이게 된다.

4) 핵화 현상(Nucleation)

어떤 물질을 중심으로 반응이 쉽게 일어나는 현상을 말한다. 기체의 경우에 기포가 처음 생성되는 것을 표면장력이 방해하여 문턱 에너지와 같이 기포가 쉽게 생성되지 못하는데, 이때 아주 작은 공기 방울(기포)을 인위적으로 만들어주면 마치 핵처럼 그것을 중심으로 기포가 쉽게 형성될 수 있게 된다.

인공 강우를 위해 구름 씨를 뿌리는 것도 구름 형성을 가속화하기 위해 인공 응축 핵을 추가하는 과정이다.

탄산 액체 용기에서 압력이 방출된 직후 이산화탄소 기포가 핵을 형성한다. 콜라에 멘토스를 넣었을 때 폭발하는 것도 핵화 현상으로 설명 가능하다. 멘토스 캔디의 표면은 탄산음료로부터 이산화탄소 거품을 형성하기 위한 핵 형성 부위를 제공한다.

월슨의 안개상자도 과포화된 기체에 입자가 지나가면서 핵을 형성하여 입자의 궤적을 따라 구름이 생성되어 눈에 보이게 되는 원리이다.



[그림 2] 손가락 주변의 이산화탄소 기포핵 형성

5) 공동 현상(Cavitation)

공동 현상(Cavitation)이란 유체의 압력 변화로 인해 유체 내에 공동이 생기는 현상을 말한다. 용액에 초음파를 가하는 경우, 초음파로 인해 용매 분자 사이의 거리가 멀어지고 충분한 음압이 가해져 용매에 공동이 생기고, 미세 기포가 발생하게 된다.

나. 선행 연구 조사

1) 학생 연구 조사

국립 중앙 과학관 전국과학전람회 작품 검색 사이트에서 다음 키워드로 검색한 결과 우리의 탐구와 관련된 선행 연구를 찾을 수 없었다.

용해, 용해 속도, 이산화탄소, 탄산, 콜라, 핵화 현상, 발포, 기포

2) 해외 연구 조사

해외 논문 검색 결과 콜라에 멘토스를 넣었을 때 폭발하는 원리 및 이와 관련된 실험 논문을 몇 편 찾을 수 있었다. 우리의 연구 주제인 충격이나 진동이 콜라의 기체 방출에 영향을 주는 지에 대한 연구는 찾을 수 없었다.

초음파 진동이 일부 조건에서 용해도를 증가시킨다는 논문이 있었으나 그 효과가 미미하고 고압 조건에서 실험된 것이기에 우리 연구와의 관련은 없다고 판단하였다.

3

탐구 내용 및 결과

가. 가설 설정

1. 흔들어진 콜라를 그냥 여는 것보다 뚜껑에 충격을 가한 후 열면 콜라에서 방출되는 기체의 양이 더 적을 것이다.
2. 흔들어진 콜라를 그냥 여는 것보다 콜라병 옆면에 진동을 가한 후 열면 콜라에서 방출되는 기체의 양이 더 적을 것이다.

나. 실험 설계

1) 실험 개요

- 가) 500mL 콜라를 격렬하게 5초 동안 흔든다.
- 나) 충격 또는 진동을 주고 콜라 뚜껑을 연다.
- 다) 뚜껑을 열기 전, 후의 질량을 비교하여 방출된 기체의 양을 측정한다.
- 라) 대조군으로, 콜라를 흔든 후 콜라에 충격 또는 진동을 주는데 걸린 시간만큼을 그냥 기다린 다음 뚜껑을 열었을 때 방출된 기체의 양을 측정하여 비교한다.

2) 변인 설정

가) 조작 변인

콜라 뚜껑에 충격을 가하는 횟수와 진동을 주는 시간을 조작 변인으로 설정하였다.

(1) 가설 1 충격이 이산화탄소 방출에 미치는 영향 실험의 조작 변인

콜라에 충격을 가하는 방법, 충격의 세기, 충격을 주는 위치 등에 대해 고려해 본 결과, 반복하기 쉽고 일정하게 충격을 줄 수 있는 장치를 고안하여 충격을 가하는 횟수만 달리 하면서 결과를 측정하기로 하였다.

[그림 3]과 같이 일정한 시간 간격으로 쇠구슬을 떨어뜨리는 장치를 과학 상자를 이용해 만들었다. 일정한 높이에서 떨어뜨림으로써 충격의 크기를 통제하고자 하였으며, PVC 관을 통해 콜라 뚜껑에 정확히 충격을 가할 수 있도록 하였다. 구슬은 질량이 110g인 쇠구슬을 사용하였으며 약 2.7초의 주기로 떨어뜨렸고, 구슬이 낙하하는 높이는 약 40cm이다.



[그림 3] 콜라에 충격을 주기 위한 장치

(2) 가설 2 진동이 이산화탄소 방출에 미치는 영향 실험의 조작 변인

[그림 4]와 같이 진동 스피커를 콜라와 밀착시켜 진동을 주는 장치를 만들었다. 여기에 사용된 진동 스피커는 보통의 스피커에서 콘 모양의 진동판을 없애고 철판이나 캐비넷 같은 넓은 면에 부착하여 그 면을 진동판으로 활용하는 일종의 바이브레이터라고 할 수 있다. 26W의 출력을 가진 진동 스피커를 사용하였다. 콜라에 진동 스피커를 밀착하기 위해 우드락을 붙여 진동 스피커를 끼울 수 있는 구멍을 만들었고, 콜라를 바닥에 고정시키기 위해 콜라를 놓을 자리에 홈을 파고 스탠드 링을 이용하여 콜라를 스피커 쪽으로 밀어 고정하였다.



[그림 4] 콜라에 진동을 주기 위한 장치

진동수에 따른 예비 실험 결과, 진동수보다는 진동의 세기가 영향이 큰 것으로 판단하여 진동수는 274Hz로 고정하고 **진동을 주는 시간만 달리**하며 실험하였다.



[그림 5] 콜라에 100hz 사인파를 가했을 때



[그림 6] 콜라에 274hz 사인파를 가했을 때

진동수를 274Hz로 고정한 이유는 [그림 5], [그림 6]에서 볼 수 있듯이 우리가 진동수를 바꿔가면서 진동을 주었을 때 274hz에서 콜라병 속 콜라가 매우 격렬하게 떨리는 것을 볼 수 있었기 때문이다. 이런 격렬한 떨림의 원인으로 콜라가 들어있는 콜라병의 고유진동수가 274hz 정도이기 때문이라고 생각하였다.

또다른 예비 실험으로 [그림 7]과 같이 뚜껑을 연 콜라에 진동을 가했을 때는 약 170Hz에서 공진 현상이 일어나 기포가 발생하는 모습을 볼 수 있었고, [그림 8]과 같이 학교에 있는 초음파 세척기를 이용하여 40KHz의 진동을 가해 보았을 때도 낮은 진동수의 진동을 준 것과 비슷하게 기포가 발생하는 모습을 보였기 때문에 진동수 보다는 진동의 세기가 결과에 영향이 큰 것으로 판단하고, 뚜껑을 따지 않은 콜라에 진동 스피커를 이용해 가장 큰 진동을 전달할 수 있는 274Hz의 진동을 주기로 결정하였다.



[그림 7] 뚜껑을 연 상태에서 약 170Hz의 사인파를 가했을 때



[그림 8] 초음파 세척기를 이용해 40KHz의 진동을 가했을 때

나) 종속 변인

콜라 뚜껑을 연 후 **방출된 기체의 질량 비를 종속 변인**으로 설정하였다.

방출된 기체의 질량을 알기 위해 뚜껑을 열기 전 콜라의 질량을 재고, 뚜껑을 연 후 콜라의 질량을 재서 그 차이를 구하고 이를 뚜껑을 열기 전 콜라의 질량으로 나누어 방출된 기체의 질량비를 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{방출된 기체의 질량 비(\%)} &= \frac{\text{방출된 기체의 질량}}{\text{콜라 전체의 질량}} \times 100 \\ &= \frac{\text{뚜껑 열기 전 콜라 질량} - \text{뚜껑 연 후 콜라 질량}}{\text{뚜껑 열기 전 콜라 질량} - \text{빈 콜라 병 질량}} \times 100 \end{aligned}$$

뚜껑을 연 후 질량을 잴 때는 흘러넘친 콜라의 질량도 포함하여 잴 수 있도록 [그림 9], [그림 10]과 같이 수조를 설치하고 수조 안에서 뚜껑을 열고 측정하였다.



[그림 9] 흘러넘친 콜라 포함 질량 측정



[그림 10] 대용량 고정밀 저울과 수조

저울은 예비 실험에서는 최대 500g인 저울 두 개를 붙여서 사용하였고, 본 실험에서는 최대 측정 질량 3.2kg에 소수점 2번째 자리까지 표기되는 저울을 새로 구입하여 사용하였다.

다) 통제 변인



[그림 11] 2019년 실험 결과

실험을 처음 시작했던 작년 가을의 활동에서 나타난 실험 결과 오류를 바탕으로 통제 변인을 통제하고자 노력하였다. 작년의 실험 결과는 충격 회수에 따라 빠져나간 기체의 양이 줄어드는 모습을 보일 뿐만 아니라 충격 회수가 15회 증가할 때마다 빠져나간 기체의 양이 극대점을 보이는 모습이 있었다. [그림 11]

여기서 보이는 극대점의 원인을 찾는 것이 우리 탐구의 숨은 목표 중 하나였는데 결과적으로 올해 다시 실험했을 때는 이와 같은 극대점이 나타나지 않았다.

극대점이 나타났던 원인으로 짐작되는 것은 작년 실험 시기가 늦은 가을이어서 실험실에 온풍기가 작동하던 상황이었는데 온풍기가 주기적으로 작동하고 그에 따른 온도 변화가 기체의 용해도에 영향을 미친 것이 아닌가 생각한다. 그래서 이번 탐구에서는 실험실 온도와 습도 및 쿨라의 온도를 매 실험마다 측정하여 온도에 따른 영향을 배제하거나 결과 분석할 때 고려하고자 하였고 각 실험당 최소 3회의 반복 실험을 통해 오류를 줄이고자 노력하였다.

열화상 카메라를 이용해 쿨라의 온도를 측정하였고 일반 알콜 온도계를 이용해 실험실 기온을 측정하였다. 습도는 MBL 습도 센서를 이용해 측정하여 실험실 환경을 통제하고 혹시 모를 실험실 환경에 의해 실험 결과에 영향이 있었는지 확인할 수 있도록 하였다.



[그림 12] 열화상 카메라, 온도계, 습도 센서

3) 실험 목록

실험 결과의 신뢰성에 영향을 미칠 수 있는 요인을 최대한 고려하여 다음과 같이 실험 목록을 정하였다.

가) 콜라를 흔들지 않고 뺐을 때 기체가 얼마나 나오는가에 대한 실험

콜라에 용해되어있는 이산화탄소 기체의 양은 일정하다는 기본 가정을 하고 탐구를 진행하기 위해서 콜라를 흔들거나 충격을 주지 않은 상태에서 뚜껑을 열기 전, 후의 질량 차를 측정하여 공장에서 나온 콜라병마다 녹아있는 기체의 양의 편차를 확인해 보는 실험을 하였다.

나) 실험에 사용할 콜라는 몇 초를 흔들어야 적당한지에 대한 실험

우리 실험의 조작 변인을 충격의 횟수와 진동을 주는 시간으로 정하였기 때문에 충격을 주기 전에 콜라를 흔드는 강도와 시간은 일정하게 통제해야 했다. 콜라를 흔들어 주는 시간에 따라 빠져나오는 기체의 양을 측정하는 실험을 실시하여 콜라를 흔들어 주는 행위가 실험 결과에 거의 영향을 주지 않았음을 확인하고자 하였다.

다) 콜라를 흔들고 30초 후 뺐을 때 기체가 얼마나 나오는가에 대한 실험

콜라 뚜껑을 여는 방법과 속도에 따라 실험 결과에 영향이 있을 수 있다고 생각하여 한 사람이 일정한 방법으로 콜라 뚜껑을 여는 실험을 반복해서 실시함으로써 편차를 줄이고자 하였고 여러 번 확인 실험을 통해 그 편차를 확인하여 결과 분석에 반영하고자 하였다.

라) 콜라에 충격을 주는 횟수에 따라 콜라를 뺐을 때 방출되는 기체량이 얼마나 달라지는가에 대한 실험

우리 탐구의 주 실험으로서 직접 제작한 쇠구슬 떨어뜨리는 장치를 이용하여 일정 시간 간격으로 쇠구슬을 떨어뜨리고 콜라에서 빠져나오는 기체의 질량을 측정하였다. 이때 콜라에 충격을 가하는 횟수는 3의 배수로 최대 45회까지 실험하였고, 충격을 가하는 시간 간격이 약 2.7초로 45회의 충격을 가하는데 걸리는 시간이 약 2분 정도 걸렸다. 이에 따라 충격 회수가 늘어남에 따라 방출되는 기체의 양이 줄은 결과가 충격의 효과 때문인지 시간이 흘러 자연스럽게 다시 녹아 들어간 것 때문인지 확인하기 위해 콜라를 흔들고 충격을 준 것과 같은 시간이 지난 후 뚜껑을 열어서 방출되는 기체의 양을 측정하여 대조군으로 삼았다.

마) 콜라에 특정 진동수의 진동을 가하고 콜라를 뺐을 때 방출되는 기체량이 얼마나 달라지는가에 대한 실험

콜라에 충격을 주는 행위는 진동을 주는 것과 비슷할 것이라고 생각하여 쇠구슬로 충격을 주는 대신 진동을 가하고 콜라에서 방출되는 기체의 질량을 측정하였다. 진동을 가하는 시간을 2초, 4초, 6초, 8초, 10초, 20초, 30초, ..., 90초로 바꾸어 가며 실험하였다. 충격을 주는 실험과 마찬가지로 시간에 따라 자연스럽게 녹아 들어가는 효과와 비교하기 위해 진동을 주고 뺐 것과 같은 시간을 기다린 후 뚜껑을 뺀 콜라의 방출되는 기체량을 측정하여 대조군으로 삼았다.

다. 실험 방법

1) 상온에서 보관한 콜라를 흔들지 않고 그냥 댔을 때 기체 방출량에 대한 실험

- 가) 상온에서 보관한 콜라의 질량을 잰다.
- 나) 일정한 온도에서 아무런 충격을 주지 않고 콜라를 일정한 속도로 땀다.
- 다) 질량을 재고 이 실험을 15번 반복한다.
- 라) 가)의 콜라의 순수 질량(콜라 질량 - 콜라병 질량)에서 1-2의 실험을 거친 콜라의 순수 질량(실험한 콜라 질량 - 콜라병 질량)을 빼서 콜라에서 배출된 기체량을 구한다.
- 마) 구해진 값의 평균과 편차를 구한다.

2) 실험에 사용할 콜라는 몇 초를 흔들어야 적당한지에 대한 실험

- 가) 상온에서 보관한 콜라의 질량을 측정한다.
- 나) 2, 5, 10, 15, 20초 동안 콜라를 흔들고 뚜껑을 연 후 질량을 측정한다.
- 다) 가), 나)의 차이를 통해 방출된 기체량을 계산하고 각 실험을 3번씩 반복한다.
- 라) 방출된 기체량의 평균과 편차를 구하여 그래프를 그린다.

3) 콜라를 흔들고 댔을 때 기체 방출량에 대한 실험

- 가) 상온에서 보관한 콜라의 질량을 잰다.
- 나) 콜라를 5초 동안 흔들고 30초를 기다린다.
- 다) 콜라를 일정한 속도로 따고 질량을 잰다.
- 라) 가), 다)의 질량을 비교하여 빠져나간 기체의 양을 구한다.
- 마) 실험을 15번 반복하고 평균과 표준 편차를 구한다.

4-1) 콜라에 충격을 주는 횟수에 따른 기체 방출량에 대한 실험

- 가) 스탠드에 관을 연결하고 콜라를 고정시킬 장치와 수조를 얹은 저울을 준비한다.
[그림3], [그림10]
- 나) 상온에서 보관한 콜라의 질량을 잰다.
- 다) 콜라를 5초 동안(실험 2를 통해 결정한 시간) 흔들 후 충격을 주기 위한 장치에 고정한다.
- 라) 장치의 관을 통해 일정한 높이에서 추를 떨어뜨려 콜라에 같은 양의 충격을 준다.
- 마) 일정한 시간 간격(약2.7초)으로 총 3번의 충격을 준다.
- 바) 충격을 준 콜라를 저울 위의 수조에서 뚜껑을 열고 질량을 잰다.
- 사) 나), 바)의 질량 차를 이용해 콜라에서 방출된 기체량을 구한다.
- 아) 충격을 주는 회수를 3, 6, 9, ... , $3n=45$ 까지 늘려가면서 실험을 반복한다.
- 자) 나)~아)의 과정을 3회 반복한다.

4-2) 콜라에 충격을 주었을 때와 주지 않았을 때를 비교하기 위한 실험(대조군)

- 가) 상온에서 보관한 콜라의 질량을 잰다.
- 나) 콜라를 5초 동안 흔들다.

- 다) 4-1) 실험의 라), 마)에서 충격을 주는데 걸린 시간(예를 들어 n 번째 콜라는 대략 $n \times 2.7$ 초, 실제로 4-1) 실험에서 측정한 시간 사용)만큼 충격을 주지 않은 상태로 기다린다.
- 라) 흔들고 기다린 콜라를 저울 위의 수조에서 뚜껑을 열고 질량을 잰다.
- 마) 가), 라)의 질량 차를 이용해 콜라에서 방출된 기체량을 구한다.
- 바) 가)~마)의 과정을 3회 반복한다.

5-1) 콜라에 진동을 주는 시간에 따른 기체 방출량에 대한 실험

- 가) 콜라를 진동을 주기 위한 장치에 고정하고 수조를 얹은 저울을 준비한다.
[그림4], [그림10]
- 나) 상온에 보관한 콜라의 질량을 잰다.
- 다) 콜라를 5초 동안 흔들 후 진동을 주기 위한 장치에 고정한다.
- 라) 진동 스피커를 통해 274Hz의 진동을 2초 동안 콜라에 가한다.
- 마) 진동을 가한 콜라를 저울 위의 수조에서 뚜껑을 열고 질량을 잰다.
- 바) 나), 마)의 질량차를 이용해 콜라에서 방출된 기체량을 구한다.
- 사) 진동을 주는 시간을 2초, 4초, 6초, 8초, 10초, 20초, 30초, ..., 90초로 바꾸어 가며 실험을 반복한다.
- 아) 나)~사)의 실험 과정을 3회 반복한다.

5-2) 진동을 주었을 때와 주지 않았을 때를 비교하기 위한 실험(대조군)

- 가) 상온에서 보관한 콜라의 질량을 잰다.
- 나) 콜라를 5초 동안 흔들다.
- 다) 5-1) 실험의 라), 마)에서 진동을 주고 뚜껑을 열어 질량을 측정하는 데 걸린 시간(예를 들어 6초 진동을 준 콜라는 진동 장치에서 수조까지 옮겨 뚜껑을 열 때 까지 10초의 시간이 더 걸려서 총 16초의 시간이 걸림, 실제로 5-1) 실험에서 측정한 시간 사용)만큼 충격을 주지 않은 상태로 기다린다.
- 라) 흔들고 기다린 콜라를 저울 위의 수조에서 뚜껑을 열고 질량을 잰다.
- 마) 가), 라)의 질량 차를 이용해 콜라에서 방출된 기체량을 구한다.
- 바) 가)~마)의 과정을 3회 반복한다.

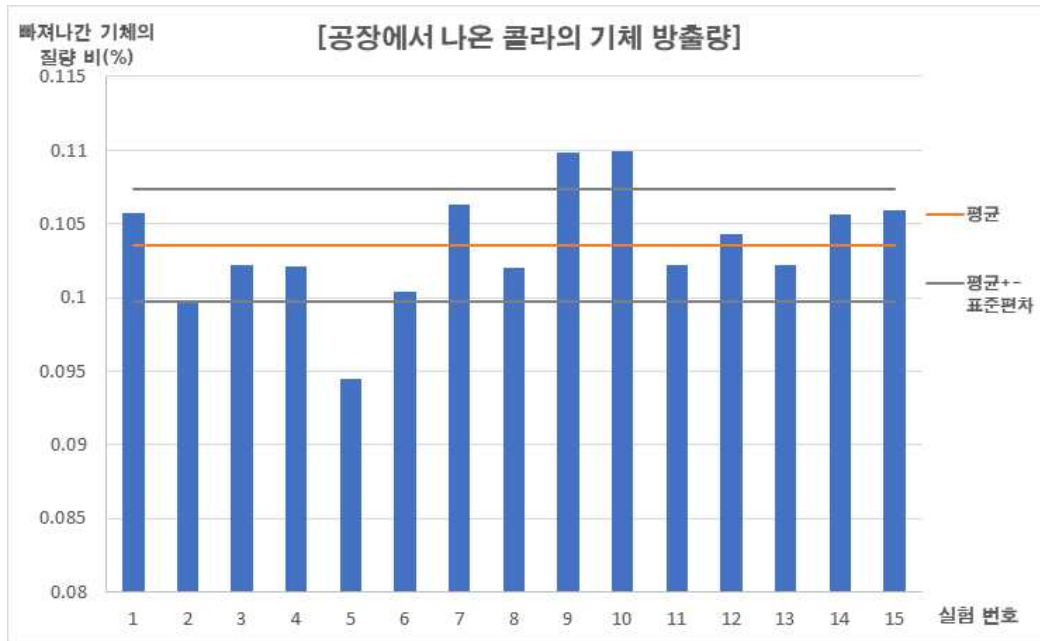
라. 실험 결과

1) 실험 1의 결과 :

상온에서 보관한 콜라를 흔들지 않고 그냥 댔을 때 기체 방출량에 대한 실험
(15번 반복한 상세한 실험 데이터는 [부록 1]에 있음)

[표 2] 상온에서 보관한 콜라의 기체 방출량

방출된 기체의 질량 비 평균(%)	0.104	표준 편차(%p)	0.004
--------------------	-------	-----------	-------



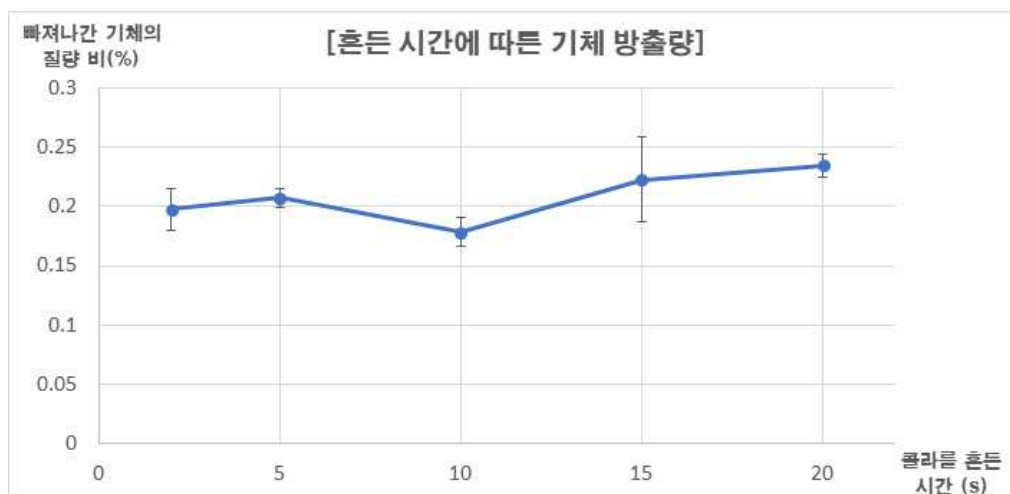
[그림 13] 공장에서 나온 콜라를 그냥 열었을 때 기체 방출량(15회 반복)

콜라를 흔들지 않고 바로 뚜껑을 열어 기체가 방출되는 양이 콜라의 질량에서 차지하고 있던 비율을 보는 실험 1에선 대부분의 결과 값들이 평균값±표준 편차를 그린 그래프 안쪽에 위치한 것을 볼 수 있다. 이 결과를 적용하면, 공장에서 나온 500ml 콜라 pet 병을 따면 약 $0.52 \pm 0.02\text{g}$ 의 기체가 빠져 나가는 것으로 취급할 수 있다.

2) 실험 2의 결과 : 실험에 사용할 콜라는 몇 초를 흔들어야 적당한지에 대한 실험 (3번 반복한 상세한 실험 데이터는 [부록 2]에 있음)

[표 3] 흔든 시간에 따른 기체 방출량

흔든 시간(초)	2	5	10	15	20
기체 방출량 3회 평균 (%)	0.20	0.21	0.18	0.22	0.23



[그림 14] 콜라를 흔든 시간에 따른 기체 방출량 3회 평균 및 표준 편차

위의 [그림 14]는 콜라를 흔드는 시간을 2, 5, 10, 15, 20초로 달리하여 흔들고 바로 탄 콜라에서 방출된 기체의 양을 3번 측정하고 평균을 내어 그린 그래프이다.

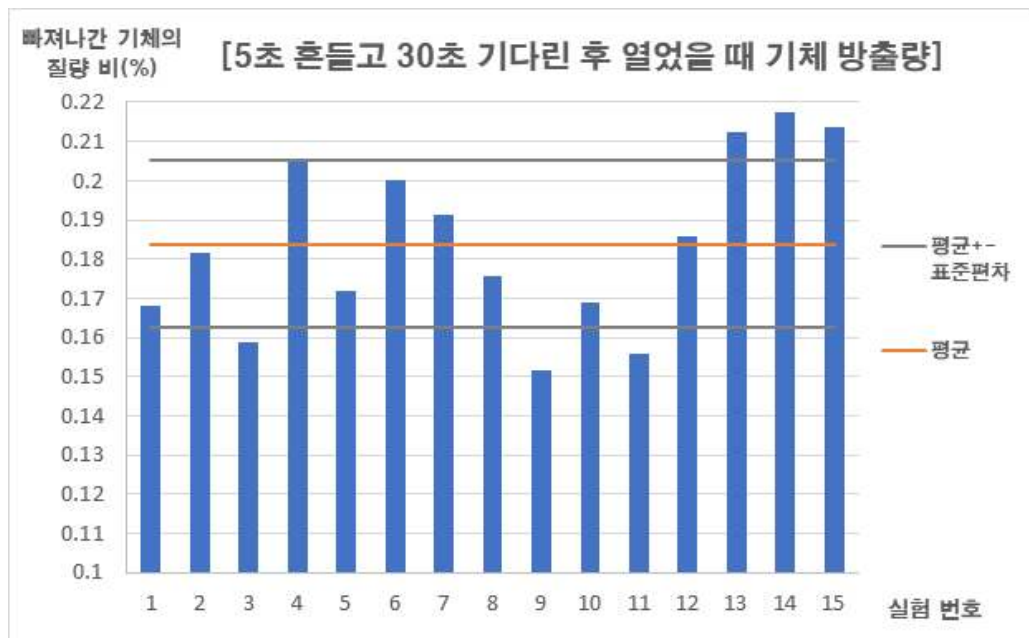
콜라를 흔들어 주면 뚜껑을 열었을 때 빠져나오는 기체의 양이 약간 증가하는 경향이 있지만 그리 크지 않다. 5초 동안 흔들었을 때 기체 방출량의 편차가 가장 작았고, 그 이상 흔들어도 흔드는 시간에 비례해서 빠져나가는 기체의 양이 증가하는 경향성이 작아서 이후의 실험에서 콜라를 흔드는 시간을 5초로 결정하였다.

3) 실험 3의 결과 :

콜라를 5초 흔들고 30초 기다린 후 뺏을 때 기체가 얼마나 나오는가에 대한 실험 (15번 반복한 상세한 실험 데이터는 [부록 3]에 있음)

[표 4] 5초 흔든 후 30초 방치한 콜라의 기체 방출량

빠져나온 기체의 질량 비 평균 (%)	0.184	표준편차(%p)	0.021
----------------------	-------	----------	-------



[그림 15] 콜라를 5초 흔들고 30초 기다린 후 열었을 때 기체 방출량(15회 반복)

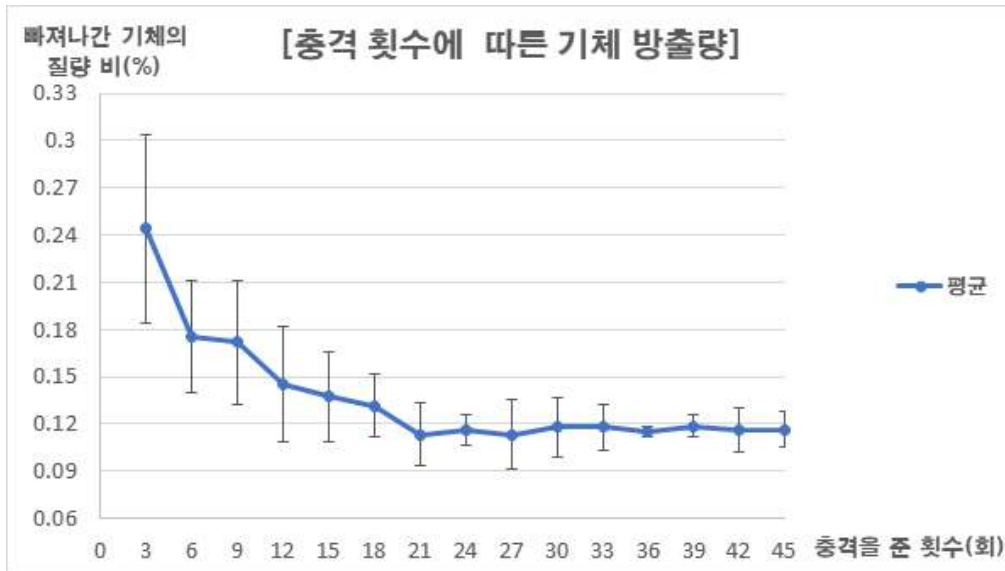
[그림 15] 그래프는 콜라를 5초간 흔들고 30초간 기다린 실험 3의 결과이다. 흔들지 않은 콜라에 비해 방출되는 기체가 콜라의 질량대비 약 0.10%에서 0.18%로 1.8배 많아졌고 표준 편차가 약 0.0038%에서 약 0.021%로 약 6배 커진 것을 알 수 있다.

또한 흔든 콜라에서 기체 방출량 측정값(0.18%) 대비 표준 편차(0.021%)의 비율은 약 11%로서 아주 일관된 결과가 나왔다고 볼 수는 없다. 콜라의 뚜껑을 여는 속도, 콜라를 흔드는 정도 등에 폭발이라는 무작위성이 더해진 결과로 생각된다.

그렇지만 향후 실험에서 11%보다 큰 차이가 날 경우 유의미한 차이로 판단하기로 기준을 삼고 이후 실험을 진행하였다.

4) 실험 4-1의 결과 : 콜라에 충격을 주는 횟수에 따른 기체 방출량

(3회 반복에 대한 상세한 실험 데이터는 [부록 4]에 있음)



[그림 16] 콜라를 5초 흔들고 충격을 준 후 열었을 때 기체 방출량(3회 반복)

실험 4는 **우리 탐구의 메인 실험**이다. 여기서 우리는 콜라를 5초 동안 흔들 후 충격을 주는 횟수에 따른 기체 배출량의 비를 보려 하였다. [그림 16]은 모두 3번 반복한 측정값의 평균과 표준 편차를 오차 막대로 나타낸 것이다.

방출된 기체량은 충격 횟수가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보이고 **21회 충격(약 1분 10초) 후에는 흔들지 않은 콜라(0.104%)와 거의 비슷하지만 약간 많은 방출량(0.116%)**을 보였다.

또한, 방출된 기체량과는 별개로 콜라가 병 위로 폭발하는지의 여부를 관찰하였는데 21회 충격 이후로 폭발하지 않았다.

실험 4-2의 결과: 콜라를 흔들 후 충격을 주지 않고 실험 4-1에서 걸린 시간과 같은 시간을 기다린 후 뗐을 때 방출된 기체량(실험 4-1의 대조군)

(3회 반복에 대한 상세한 실험 데이터는 [부록 4] 후반부에 있음)

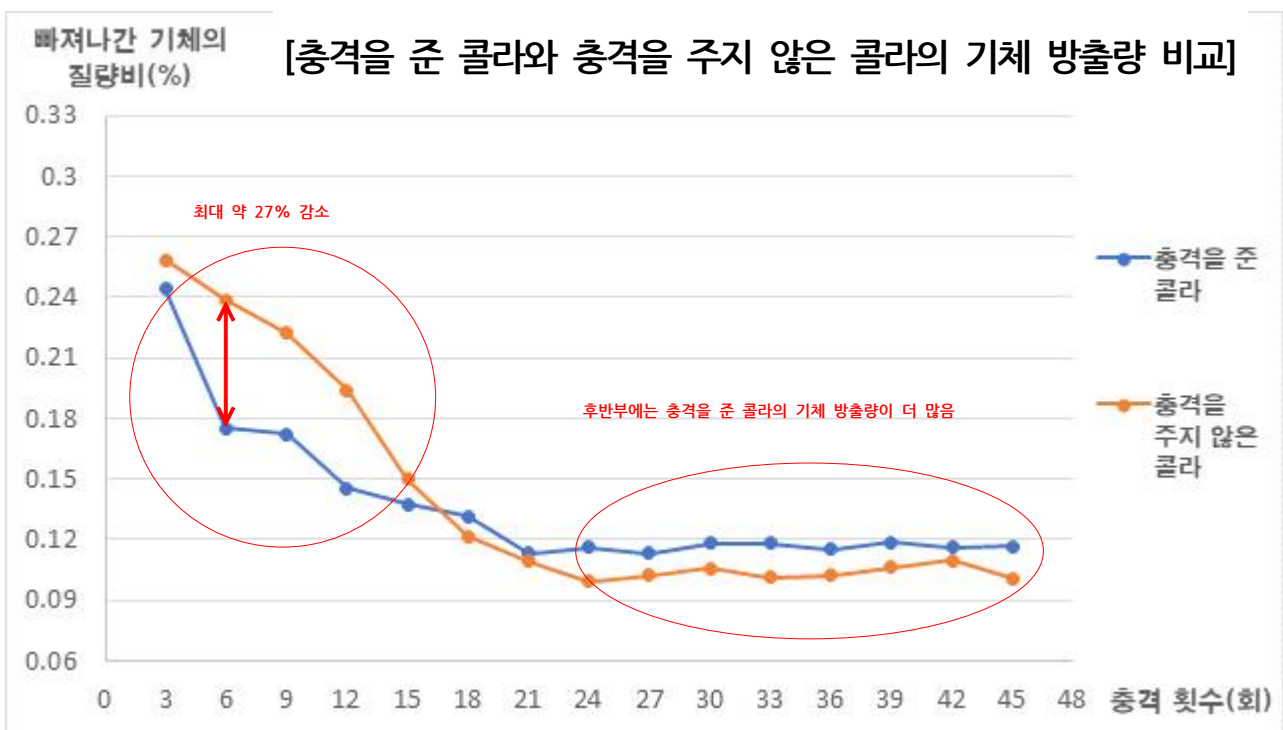


[그림 17] 콜라를 5초 흔들고 기다린 후 열었을 때 기체 방출량(3회 반복)

이 실험은 실험 4-1(콜라에 충격을 주는 실험)에서 충격을 주는 데 시간이 걸리기 때문에 충격 회수에 따라 기체 방출량이 줄어드는 것이 충격 때문인지 시간 때문인지 확인하기 위해 실시한 실험이다. 실험 4-1에서 충격을 주는 데 걸린 시간만큼 충격을 주지 않고 그냥 기다린 후 뚜껑을 열었을 때 방출된 기체의 양을 측정하여 그 평균과 표준 편차를 나타낸 것이다. [그림 17]

충격을 가한 경우와 마찬가지로, 기다린 시간이 길어짐에 따라 기체 방출량이 줄어들고 약 1분 10초 후에는 흔들지 않은 콜라(0.104%)와 거의 같은 기체 방출량(0.104%)을 보인다. 이 실험 결과로부터 알 수 있는 사실 하나는 5초 흔들 콜라를 70초 동안 세워 두면 흔들기 전의 상태로 돌아간다는 것이다.

폭발 여부에 대한 관찰은 충격을 준 콜라와 충격을 주지 않은 콜라 모두 충격 횟수 21회(콜라를 흔들 후 약 1분 10초) 이후부터 터지지 않기 시작했다.



[그림 18] 충격을 준 콜라와 충격을 주지 않은 콜라의 기체 방출량 비교

[그림 18]은 [그림 16]과 [그림 17]을 함께 나타낸 것이다. 충격을 준 콜라의 x축은 충격 횟수(회)이고 충격을 주지 않은 콜라의 x축은 충격을 주지 않고 기다린 시간(초)이다.

충격 횟수가 6회, 9회 일 때 충격을 주지 않고 기다린 콜라에 비해 기체 방출량이 감소했음을 확인할 수 있다. 기체 방출량이 감소한 비율이 최대 약 27%로서 우리 실험의 편차 범위를 고려해도 유의미한 감소 효과가 있다고 판단할 수 있다.

충격 횟수가 18회가 넘어가면 기체 방출량이 역전되어 충격을 준 콜라에서 더 많은 기체가 방출됨을 볼 수 있다. 편차 범위 내에 드는 차이이기 때문에 확신하기에는 부족하지만 일관된 경향성으로 보아 의미가 있다고 판단하였다.

5) 실험 5-1의 결과 : 콜라에 진동(274Hz)을 주는 시간에 따른 기체 방출량
(3회 반복에 대한 상세한 실험 데이터는 [부록 5]에 있음)



[그림 19] 콜라를 5초 흔들고 진동을 준 후 열었을 때 기체 방출량(3회 반복)

콜라에 진동을 가하는 경우에도 충격을 준 것과 비슷하게 진동을 준 시간이 커짐에 따라 기체 전체적으로 기체 방출량이 줄어드는 모습을 보인다. 그렇지만, 진동을 2초, 4초 주었을 때가 6초 진동을 주었을 때보다 기체 방출량이 더 적은 모습을 보였다. 이 부분은 편차 범위 내의 차이이기 때문에 확신할 수 없어서 진동 시간 2초, 4초, 6초에 대해 추가 실험을 3회씩 해 보았는데도 비슷한 결과가 나왔다. 따라서 우리는 진동을 짧게 주는 것이 기체 방출량 감소에 효과가 더 좋을 수도 있다는 가능성을 발견하였으나 이에 대한 후속 실험은 아직 진행하지 못했다.

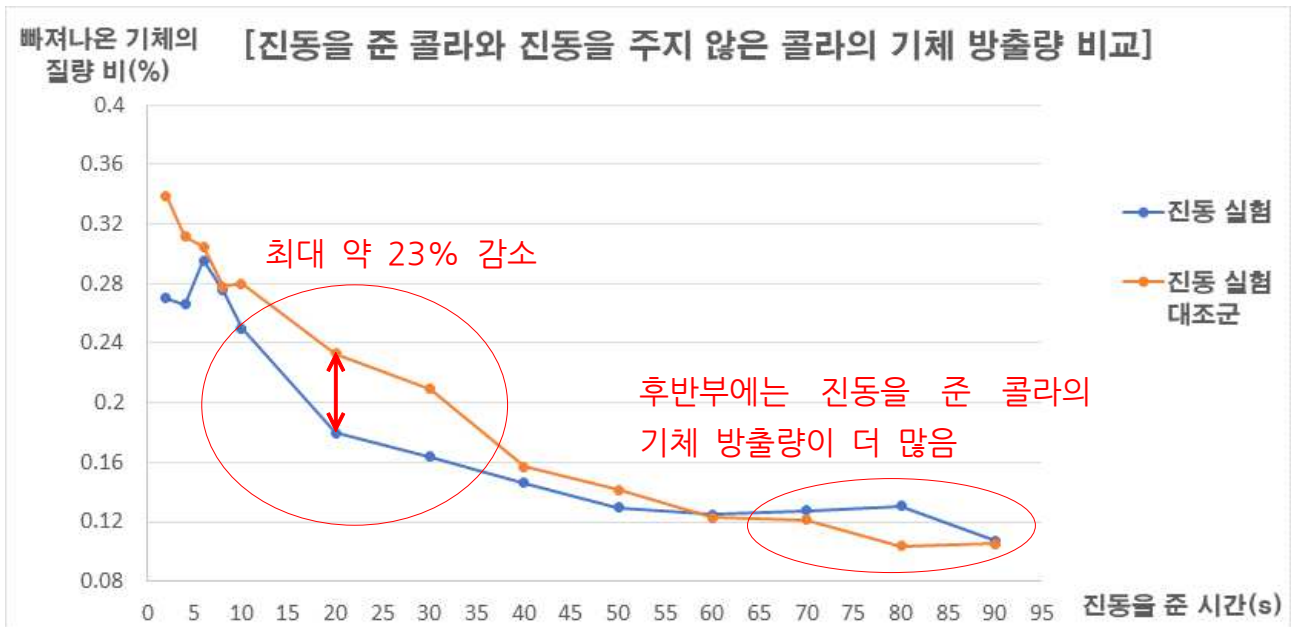
실험 5-2의 결과: 콜라를 흔든 후 진동을 주지 않고 실험 5-1에서 진동을 준 시간과 같은 시간을 기다린 후 뗐을 때 방출된 기체량(실험 5-1의 대조군)
(3회 반복에 대한 상세한 실험 데이터는 [부록 5] 후반부에 있음)



[그림 20] 콜라를 5초 흔들고 진동을 주지 않고 기다린 후 열었을 때 기체 방출량

이 실험도 실험 4-2와 마찬가지로 실험 5-1(콜라에 진동을 주는 실험)에서 진동을 주는 시간이 커짐에 따라 기체 방출량이 줄어드는 것이 진동 때문인지 시간 때문인지 확인하기 위해 실시한 실험이다. 실험 5-1에서 진동을 주는 데 걸린 시간만큼 진동을 주지 않고 그냥 기다린 후 뚜껑을 열었을 때 방출된 기체의 양을 측정하여 그 평균과 표준 편차를 나타낸 것이다. [그림 20]

진동을 가한 경우와 마찬가지로, 기다린 시간이 길어짐에 따라 기체 방출량이 줄어들고 약 1분 20초 후에는 흔들지 않은 콜라와 거의 같은 기체 방출량을 보인다.



[그림 21] 진동을 준 콜라와 진동을 주지 않은 콜라의 기체 방출량 비교

[그림 21]은 [그림 19]와 [그림 20]을 함께 나타낸 것이다. 진동을 준 콜라의 x축은 진동을 준 시간(초)이고 진동을 주지 않은 콜라의 x축은 진동을 주지 않고 기다린 시간(초)인데 두 경우 모두 콜라 뚜껑을 열기까지는 진동을 주거나 기다린 시간에 10초가 더 걸린 결과이다.(진동 장치에서 저울위 수조로 옮겨 가는 시간을 통제 하기 위한 시간)

진동을 준 시간이 2초, 4초, 20초, 30초 일 때 진동을 주지 않고 기다린 콜라에 비해 기체 방출량이 감소했음을 확인할 수 있다. 기체 방출량이 감소한 비율이 최대 약 23%로서 우리 실험의 편차 범위를 고려해도 유의미한 감소 효과가 있다고 판단할 수 있다.

진동을 준 시간이 60초가 넘어가면서는 기체 방출량이 역전되어 진동을 준 콜라에서 더 많은 기체가 방출됨을 볼 수 있다. 편차 범위 내에 드는 차이이기 때문에 확신하기에는 부족하지만 일관된 경향성으로 보아 의미가 있다고 판단하였다.

가. 실험 결과를 설명할 수 있는 원리 찾기

1) 용해도와 용해 속도를 이용한 원리 설명 실패

처음에 우리는 콜라를 두드려주는 행위가 콜라가 터지는 것을 막는 원리는 콜라에서 빠져나온 기체가 콜라에 다시 녹아 들어가는 것을 충격이 촉진시키기 때문이라고 생각했다. 그래서 우리는 충격이 기체와 액체 분자들의 운동에 영향을 준다고 추측하고 용해도와 용해 속도에 대해 조사했다. 우리가 알고 있는 지식으로는 기체의 용해도는 압력과 온도에 영향을 받고 용해 속도는 확산 등 물질 전달 속도에 영향을 받기 때문에 충격이나 진동이 압력, 온도, 물질 전달에 어떤 영향을 주는지에 대해 조사하고 생각하였다.

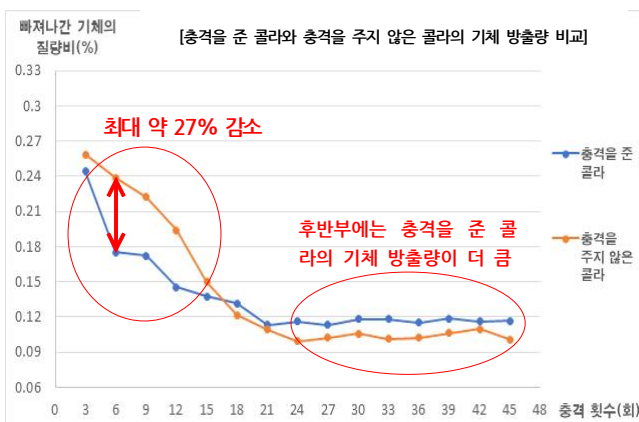
그러나 적은 충격이나 진동을 짧게 주었을 때는 기체 방출량이 감소하고, 많은 충격이나 긴 진동을 주었을 때는 오히려 기체 방출량이 약간이지만 증가하는 현상을 용해도와 용해 속도에 기반을 둔 원리로 설명하지 못했다.

2) 핵화 현상과 공동 현상을 이용한 원리 설명 성공

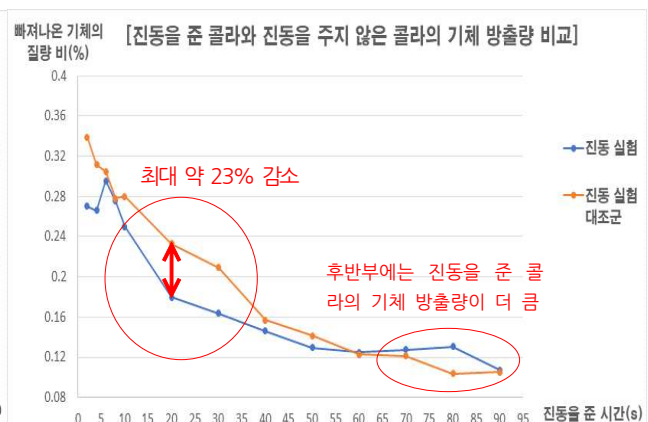
우리 실험 결과를 설명할 수 있는 원리에 대해 고민을 계속하던 중 콜라를 흔들면 기체가 방출되는 원리부터 명확히 알지 못하고 있었다는 사실을 깨닫고 콜라를 떨어뜨리거나 크게 흔들었을 때 기체가 방출되는 원리에 대해 깊이 생각해 보았다.

콜라를 떨어뜨리거나 크게 흔드는 경우 콜라의 압력과 온도는 크게 변화가 없을 것이기 때문에 우리가 알던 용해도와 관련된 생각으로는 기체가 방출될 이유가 없었다. 그럼에도 불구하고 기체가 방출되는 이유를 찾던 중 콜라에 멘토스 사탕을 넣으면 콜라가 폭발한다는 내용을 발견하였고 그 원리가 핵화 현상과 공동 현상에 의한 것임을 알게 되었다.

핵화 현상과 공동 현상을 적용해 우리 실험 결과를 설명하면 다음과 같다.



[그림 18] 충격을 준 콜라와 충격을 주지 않은 콜라의 기체 방출량 비교



[그림 21] 진동을 준 콜라와 진동을 주지 않은 콜라의 기체 방출량 비교

- 가) 콜라를 떨어뜨리거나 크게 흔들면 콜라와 기체가 섞이면서 많은 기포가 발생한다. 이 기포가 콜라 용기 벽면이나 콜라 액체 내부에 남아있을 때 콜라 뚜껑을 열면 이 기포들이 핵의 역할을 하여 핵화 현상으로 인해 폭발적으로 기체가 방출된다.
- 나) 흔들어진 콜라를 뚜껑을 열지 않고 방치하면 약 1분 후에 원상태로 돌아가는 것은 방출된 기체가 다시 녹아 들어가는 효과도 있겠지만, 흔들림으로 인해 만들어진 기포가 떠오르거나 다시 용해되어 액체 속에서 핵의 역할을 할 수 있는 기포가 사라졌기 때문이다.
- 다) 흔들어진 콜라에 충격이나 진동을 가하는 행위는 방출된 기체가 다시 용해되는 것을 촉진했다기보다 콜라병의 내부 벽면에 붙어있던 기포를 털어 주거나 콜라 액체 내부에 남아있던 미세 기포를 합쳐주어 기포의 상승 속도를 빠르게 해서 콜라 액체 속의 기포를 제거함으로써 핵화 현상을 억제한다.
- 라) 다만, 충격이나 진동은 기포를 제거하기도 하지만 공동 현상(cavitation)에 의해 새로운 기포가 생겨날 수도 있다.
- 마) 흔들어진 직후의 콜라처럼 이미 많은 기포가 존재하고 있을 때는 다)에서 설명한 핵화 현상 억제의 효과가 크게 나타나고, 시간이 지나서 기포가 많이 제거되었을 때는 라)에서 설명한 기포 발생 효과가 상대적으로 더 크게 나타난다고 생각하면 우리 실험 결과의 후반부에 기체 방출량이 역전되는 결과까지 잘 설명할 수 있다.

나. 원리 설명을 위한 새로운 가설 검증 실험

핵화 현상을 이용해 실험 결과를 설명한 내용이 맞는지 뒷받침 하기 위해 충격 또는 진동이 기포 제거에 효과가 있는지 확인해 보는 실험을 실시 하였다.

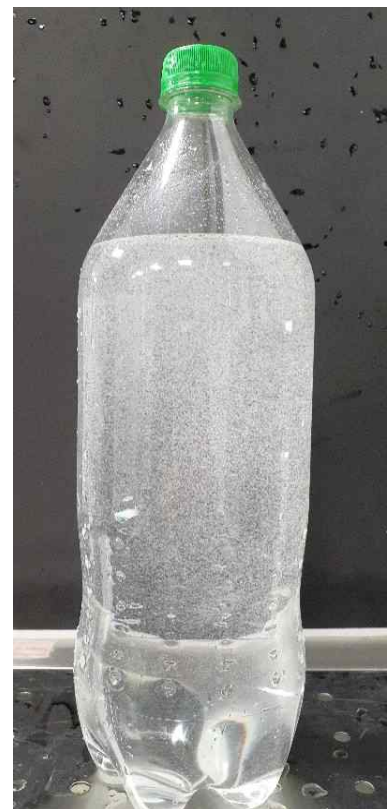
콜라 속의 기포는 잘 보이지 않아서 투명한 사이다로 실험을 진행하였다.

1.5L 사이다를 5초간 흔든 후 [그림 22]는 2초간 초음파를 가한 후 8초 기다린 모습이고 [그림 23]은 10초간 기다린 모습이다.

두 그림을 비교해 볼 때, 육안으로 보아도 확실할 정도로 초음파를 가한 경우 기포가 더 적게 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 초음파가 핵화 현상을 일으키는 기포들을 제거하는 데에 효과가 있음을 보여준다.



[그림 22] 2초 진동 후 8초 기다린 사이다의 기포



[그림 23] 10초 기다린 사이다의 기포

- 가. 흔들어진 콜라를 따기 전에 두드리는 행위는 콜라가 터지는 것을 막는데 효과가 있다는 속설을 실험을 통해 과학적으로 검증하였다.
- 나. 콜라에 진동을 가하는 행위도 콜라가 터지는 것을 막는데 효과가 있음을 실험을 통해 확인하였다.
- 다. 콜라에 충격이나 진동을 주는 행위가 콜라가 터지는 것을 막는데 효과가 있는 이유를 핵화 현상과 공동 현상을 이용해 설명하였다.
- 라. 진동이 액체 속의 기포 제거 속도를 빠르게 해 주는 사실을 실험을 통해 확인하여 원리 설명을 뒷받침하였다.
- 마. 물의 전기분해와 같이 기포가 발생해 효율이 떨어질 수 있는 화학 반응 실험에서, 충격이나 진동을 통해 미세 기포들을 떼어내거나 제거함으로써 반응 효율을 증진시킬 수 있을 것이라고 예상한다. 이 외에도 미세 기포들을 제거하는 모든 상황에서 충격과 진동이 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

- 가. 줌 학습 백과 기체의 용해도 <http://study.zum.com/book/12235>
- 나. 공부와락 학습 백과 용해 <http://dlegongbuwarac.edupia.com/xmlPrint.aspx?did=16789>
- 다. Probing the Mechanism of Bubble Nucleation in and the Effect of Atmospheric Pressure on the Candy-Cola Soda Geyser, Thomas S. Kuntzleman* and Ryan Johnson, J. Chem. Educ. 2020, 97, 4, 980-985 Publication Date:February 27, 2020
- 라. Aimin, T., Hongwei, Z., Gang, C., Guohui, X., & Wenzhi, L. (2005). Influence of ultrasound treatment on accessibility and regioselective oxidation reactivity of cellulose. Ultrasonics Sonochemistry, 12(6), 467-472.
- 마. Effects of ultrasonic waves on carbon dioxide solubility in brine at different pressures and temperatures, Hossein Hamidi, Erfan Mohammadian, Amin Sharifi Haddad, Roozbeh Rafati, Amin Azdarpour, Panteha Ghahri, Adi Putra Pradana, Bastian Andoni & Chingis Akhmetov. Petroleum Science volume 14, pages597-604(2017)
- 바. 위키 백과 핵화 현상 Nucleation <https://en.wikipedia.org/wiki/Nucleation>
- 사. 위키 백과 공동 현상 Cavitation <https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>

7

부록

[부록 1] 실험 1의 결과

실험 번호	1	2	3	4	5
실험 전 질량(g)	548.41	549.54	546.78	547.55	547.29
실험 후 질량(g)	547.86	549.02	546.25	547.02	546.8
빠져나온 기체의 질량(g)	0.55	0.52	0.53	0.53	0.49
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.106	0.100	0.102	0.102	0.094
상온(C)	27	27	27	27	27
콜라의 온도(C)	26.1	25.9	26.1	26	26
습도(%)	68.6	68.6	68.7	68.6	68.8

실험 번호	6	7	8	9	10
실험 전 질량(g)	546.2	545.92	548.03	547.15	546.68
실험 후 질량(g)	545.68	545.37	547.5	546.58	546.11
빠져나온 기체의 질량(g)	0.52	0.55	0.53	0.57	0.57
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.100	0.106	0.102	0.110	0.110
상온(C)	27	26.6	26.9	27	27
콜라의 온도(C)	25.8	26	26	26	26
습도(%)	68.9	69.4	68.9	68.9	69.1

실험 번호	11	12	13	14	15
실험 전 질량(g)	547.03	546.28	547	548.96	547.79
실험 후 질량(g)	546.5	545.74	546.47	548.41	547.24
빠져나온 기체의 질량(g)	0.53	0.54	0.53	0.55	0.55
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.102	0.104	0.102	0.106	0.106
상온(C)	26.8	26.9	27	26.9	27
콜라의 온도(C)	26	26.1	26.1	26	26.1
습도(%)	69.3	69.3	69.6	69.8	69.8

[부록 2] 실험 2의 결과

가) 첫 번째 실험 결과

흔든 시간(s)	2	5	10	15	20
실험 전 질량(g)	544.79	545.51	546.32	545.8	547.7
실험 후 질량(g)	543.76	544.47	545.48	544.4	546.48
빠져나온 기체의 질량(g)	1.03	1.04	0.84	1.4	1.22
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.199	0.201	0.162	0.271	0.235
상온(C)	25.1	27	27	25.8	25.8
콜라의 온도(C)	25.1	27	26.9	26	26.2
습도(%)	68.3	69.5	69.5	68.5	68.4

나) 두 번째 실험 결과

흔든 시간(s)	2	5	10	15	20
실험 전 질량(g)	546.63	544.53	546.43	546.75	544.38
실험 후 질량(g)	545.72	543.4	545.44	545.64	543.23
빠져나온 기체의 질량(g)	0.91	1.13	0.99	1.11	1.15
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.176	0.219	0.191	0.214	0.223
상온(C)	25	27	27	27	27
콜라의 온도(C)	25.2	27	27	26.9	27
습도(%)	68.4	69.8	69.7	69.7	69.8

다) 세 번째 실험 결과

흔든 시간(s)	2	5	10	15	20
실험 전 질량(g)	545.39	544.3	546.32	546.04	547.14
실험 후 질량(g)	544.26	543.26	545.38	545.09	545.86
빠져나온 기체의 질량(g)	1.13	1.04	0.94	0.95	1.28
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.219	0.202	0.181	0.184	0.247
상온(C)	25.1	25.8	25.6	25.5	25.8
콜라의 온도(C)	24.9	26.1	25.7	26	25.7
습도(%)	68.8	68.3	68.3	68.4	68.3

[부록 3] 실험 3의 결과

실험 번호	1	2	3	4	5
실험 전 질량(g)	546.75	546.04	545.16	545.04	546.75
실험 후 질량(g)	545.88	545.1	544.34	543.98	545.86
빠져나온 기체의 질량(g)	0.87	0.94	0.82	1.06	0.89
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.168	0.182	0.159	0.205	0.172
상온(C)	25.2	25.1	25	25	25.1
콜라의 온도(C)	25.1	25.1	25.3	25.3	25.1
습도(%)	70.2	69.8	70.2	70.1	70.4

실험 번호	6	7	8	9	10
실험 전 질량(g)	548.07	545.41	546.88	549.38	549.16
실험 후 질량(g)	547.03	544.42	545.97	548.59	548.28
빠져나온 기체의 질량(g)	1.04	0.99	0.91	0.79	0.88
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.200	0.191	0.176	0.152	0.169
상온(C)	24.8	24.7	24.9	24.9	25
콜라의 온도(C)	24.1	24.2	24.4	24.5	24.4
습도(%)	69.3	69.8	70.2	70.4	70.7

실험 번호	11	12	13	14	15
실험 전 질량(g)	547.68	545.61	546.58	547.72	547.43
실험 후 질량(g)	546.87	544.65	545.48	546.59	546.32
빠져나온 기체의 질량(g)	0.81	0.96	1.1	1.13	1.11
빠져나온 기체의 질량 비(%)	0.156	0.186	0.212	0.218	0.214
상온(C)	25	25	25	25	25
콜라의 온도(C)	24.2	24.2	24.6	24.5	24.9
습도(%)	70.7	70.1	71.7	71.6	71.7

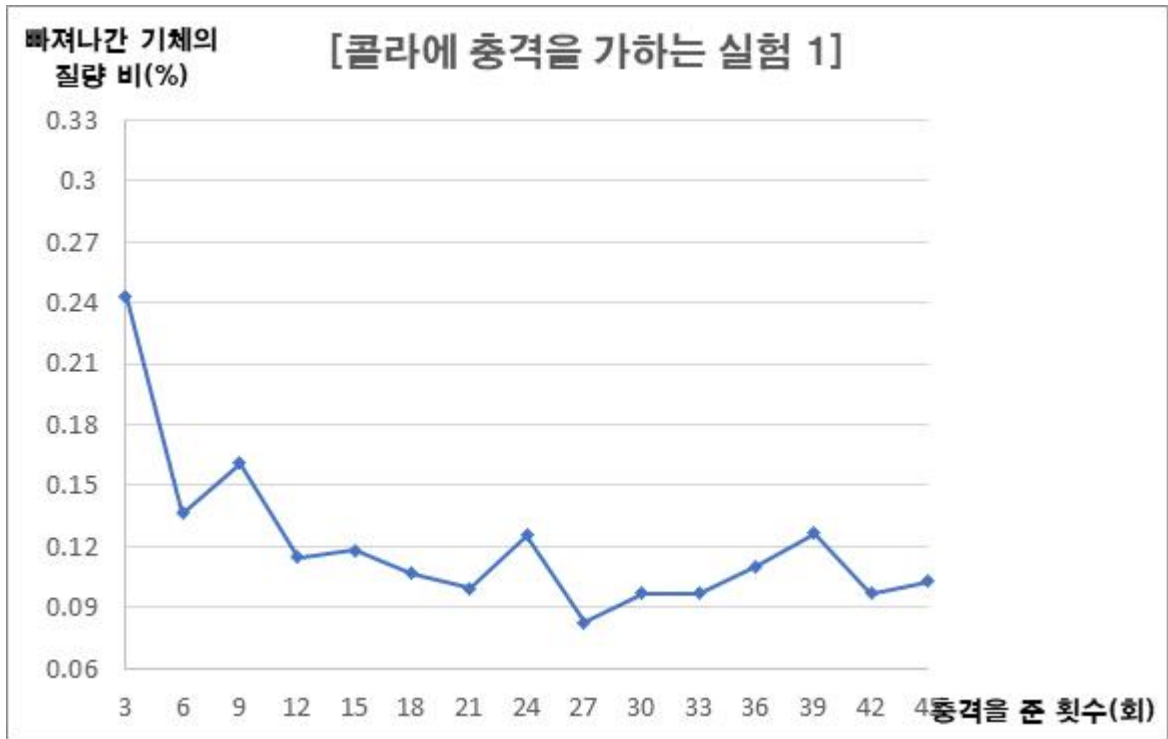
[부록 4] 실험 4의 결과

가) 콜라에 충격을 가하는 첫 번째 실험

충격을 준 횟수	3	6	9	12	15
터짐 여부	O	O	O	O	O
걸린 시간(s)	19.8	29.1	37.3	46.8	53
실험 전 질량(g)	546.01	542.03	543.37	541.84	545.56
실험 후 질량(g)	544.75	541.33	542.54	541.25	544.95
빠져나간 기체의 질량(g)	1.26	0.7	0.83	0.59	0.61
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.243	0.136	0.161	0.115	0.118
상온(C)	25	25	25	25	25
콜라 온도(C)	25	25	24.9	25	25
습도(%)	74	74.1	74.2	74.1	74.1

충격을 준 횟수	18	21	24	27	30
터짐 여부	O	X	O	X	X
걸린 시간(s)	62	71	77	88	95
실험 전 질량(g)	543.22	541.03	545.72	537.78	545.21
실험 후 질량(g)	542.67	540.52	545.07	537.36	544.71
빠져나간 기체의 질량(g)	0.55	0.51	0.65	0.42	0.5
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.107	0.099	0.126	0.082	0.097
상온(C)	25	25	25	25	25
콜라 온도(C)	25.1	25	25.3	25	25.1
습도(%)	74	74.5	74.4	74.3	74

충격을 준 횟수	33	36	39	42	45
터짐 여부	O	X	X	X	X
걸린 시간(s)	103	113	120.2	131	144
실험 전 질량(g)	544.7	545.6	541.89	543.19	542.7
실험 후 질량(g)	544.2	545.03	541.24	542.69	542.17
빠져나간 기체의 질량(g)	0.5	0.57	0.65	0.5	0.53
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.097	0.110	0.127	0.097	0.103
상온(C)	25	25	25	25	25
콜라 온도(C)	25	24.7	25	24.9	25.5
습도(%)	74.1	73.9	73.7	73.8	73.7



나) 콜라에 충격을 가하는 두 번째 실험

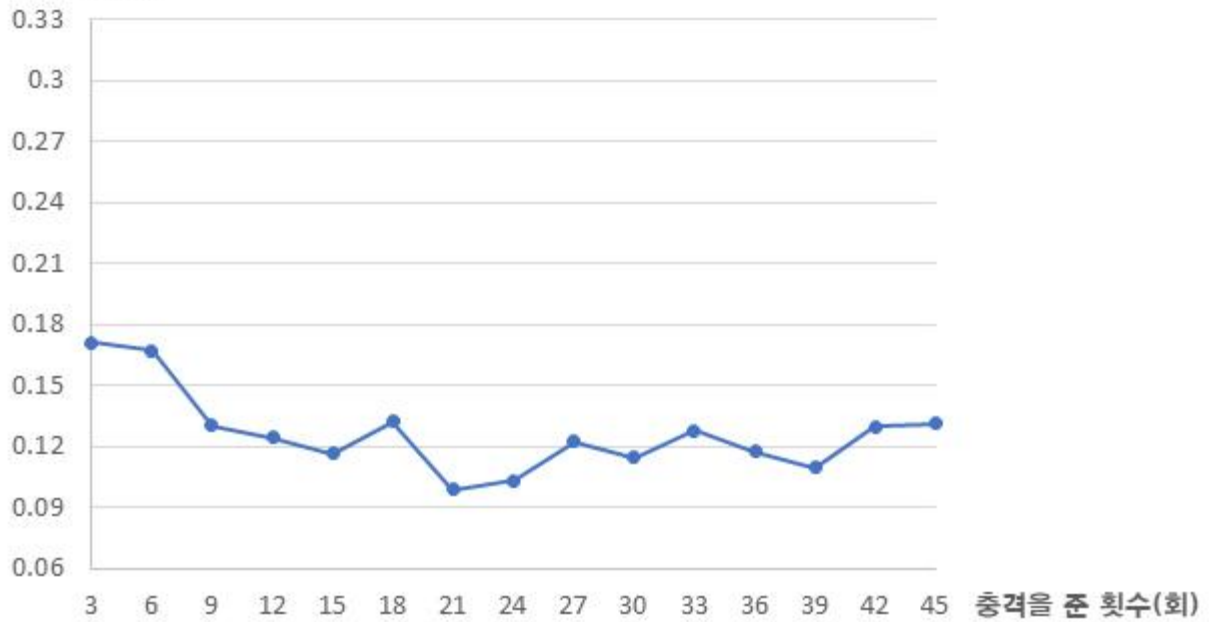
충격을 준 횟수	3	6	9	12	15
터짐 여부	O	O	O	O	O
걸린 시간(s)	20	30.1	37.8	47.8	53.7
실험 전 질량(g)	543.97	537.2	542.79	543.7	544.56
실험 후 질량(g)	543.09	536.35	542.12	543.06	543.96
빠져나간 기체의 질량(g)	0.88	0.85	0.67	0.64	0.6
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.170	0.167	0.130	0.124	0.116
상온(C)	25	25	25	25	25
콜라 온도(C)	25.2	25	25.4	25	25
습도(%)	73.5	73.4	73.4	73.5	73.5

충격을 준 횟수	18	21	24	27	30
터짐 여부	O	X	X	X	X
걸린 시간(s)	64.5	71.8	78.8	89.5	98.6
실험 전 질량(g)	543.86	545.31	541.91	544.41	544.66
실험 후 질량(g)	543.18	544.8	541.38	543.78	544.07
빠져나간 기체의 질량(g)	0.68	0.51	0.53	0.63	0.59
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.132	0.099	0.103	0.122	0.114
상온(C)	25	25	25	25	25
콜라 온도(C)	25	25	25.1	25.2	25.1
습도(%)	74.1	73.8	74	73.9	74.3

충격을 준 횟수	33	36	39	42	45
터짐 여부	X	X	X	X	X
걸린 시간(s)	106.3	113.5	124.1	133.5	148.1
실험 전 질량(g)	545.08	549.25	548.21	545.82	547.32
실험 후 질량(g)	544.42	548.64	547.64	545.15	546.64
빠져나간 기체의 질량(g)	0.66	0.61	0.57	0.67	0.68
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.128	0.117	0.110	0.129	0.131
상온(C)	25	25	25	25	25
콜라 온도(C)	25.2	25	25.2	25.4	25.2
습도(%)	74.1	73.9	73.7	73.8	73.7

빠져나간 기체의
질량 비(%)

[콜라에 충격을 가하는 실험 2]

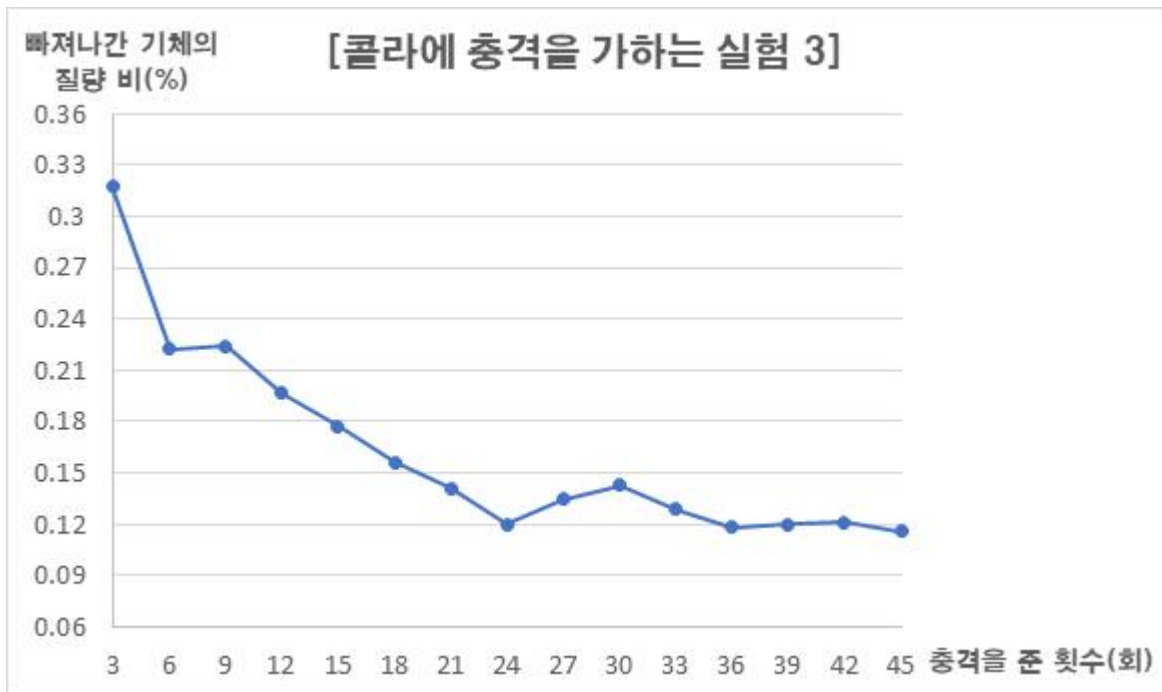


다) 콜라에 충격을 가하는 세 번째 실험

충격을 준 횟수	3	6	9	12	15
터짐 여부	O	O	O	O	O
걸린 시간(s)	22.1	31.6	40.5	45.8	55
실험 전 질량(g)	544.83	545.73	545.52	546.91	546.85
실험 후 질량(g)	543.19	544.58	544.36	545.89	545.93
빠져나간 기체의 질량(g)	1.64	1.15	1.16	1.02	0.92
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.318	0.222	0.224	0.197	0.177
상온(C)	25.5	25.9	25.9	26	26
콜라 온도(C)	25.2	25.3	25	25.2	25.1
습도(%)	74.3	73.2	72.9	74	73.3

충격을 준 횟수	18	21	24	27	30
터짐 여부	O	O	X	X	X
걸린 시간(s)	65.5	70.6	80.2	89.2	97.1
실험 전 질량(g)	546.88	545.1	545.35	547.83	539.35
실험 후 질량(g)	546.07	544.37	544.73	547.13	538.62
빠져나간 기체의 질량(g)	0.81	0.73	0.62	0.7	0.73
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.156	0.141	0.120	0.135	0.143
상온(C)	25.8	25.9	26	26	26
콜라 온도(C)	25	25.1	25.2	25.2	25.1
습도(%)	64.2	66.5	68.9	71.1	71.6

충격을 준 횟수	33	36	39	42	45
터짐 여부	X	X	X	X	X
걸린 시간(s)	108.1	113.5	123.4	135.5	144.2
실험 전 질량(g)	548.24	544.44	545.96	547.44	547.04
실험 후 질량(g)	547.57	543.83	545.34	546.81	546.44
빠져나간 기체의 질량(g)	0.67	0.61	0.62	0.63	0.6
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.129	0.118	0.120	0.121	0.116
상온(C)	26	26	26	26	26
콜라 온도(C)	25.2	25.2	25.3	25	25.1
습도(%)	71.5	71.4	72.2	72.6	73.1

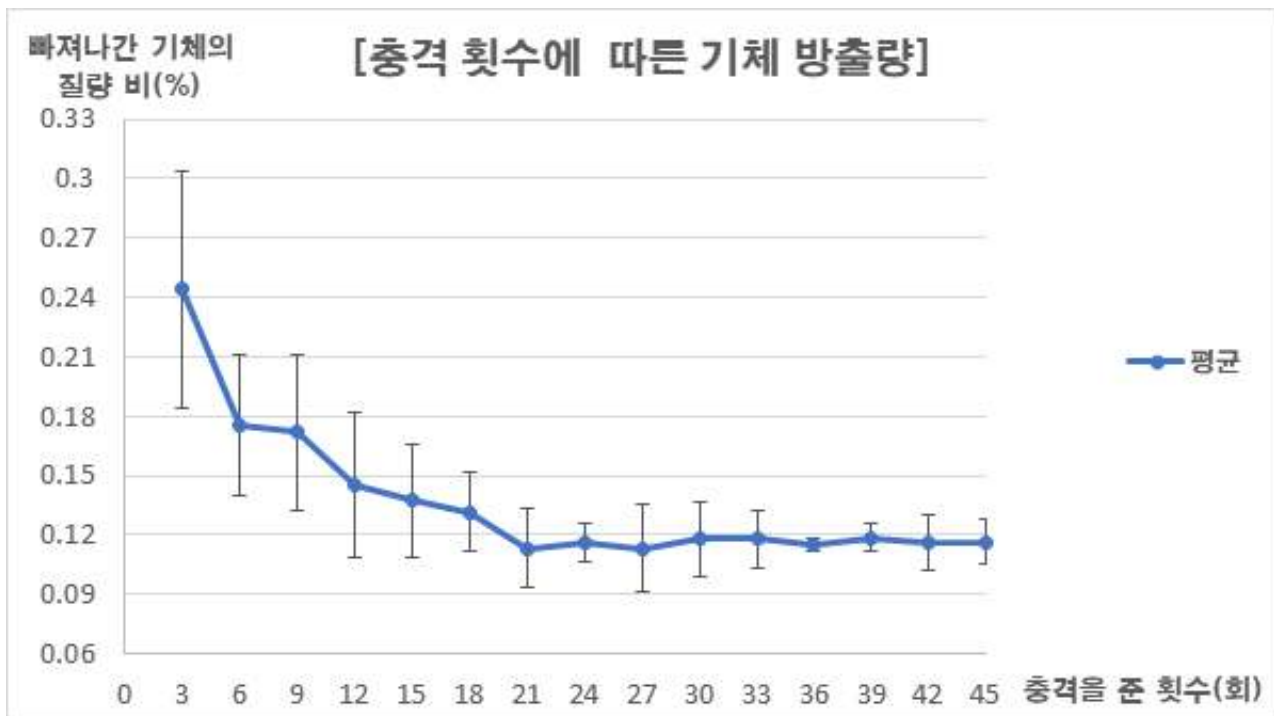


라) 콜라에 충격을 가하는 실험의 평균

충격을 준 횟수	3	6	9	12	15
걸린 시간 평균(s)	20.63	30.27	38.53	46.8	53.9
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.244	0.175	0.172	0.145	0.137
분산	0.0036	0.0013	0.0015	0.0013	0.0008
표준편차(%p)	0.060	0.036	0.039	0.037	0.028

충격을 준 횟수	18	21	24	27	30
걸린 시간 평균(s)	64	71.13	78.67	88.9	96.9
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.132	0.113	0.116	0.113	0.118
분산	0.0004	0.0004	0.0001	0.0005	0.0004
표준편차(%p)	0.020	0.020	0.010	0.022	0.019

충격을 준 횟수	33	36	39	42	45
걸린 시간 평균(s)	105.8	113.33	122.57	133.33	145.43
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.118	0.115	0.119	0.116	0.117
분산	0.0002	0.0000	0.0000	0.0002	0.0001
표준편차(%p)	0.015	0.004	0.007	0.014	0.011



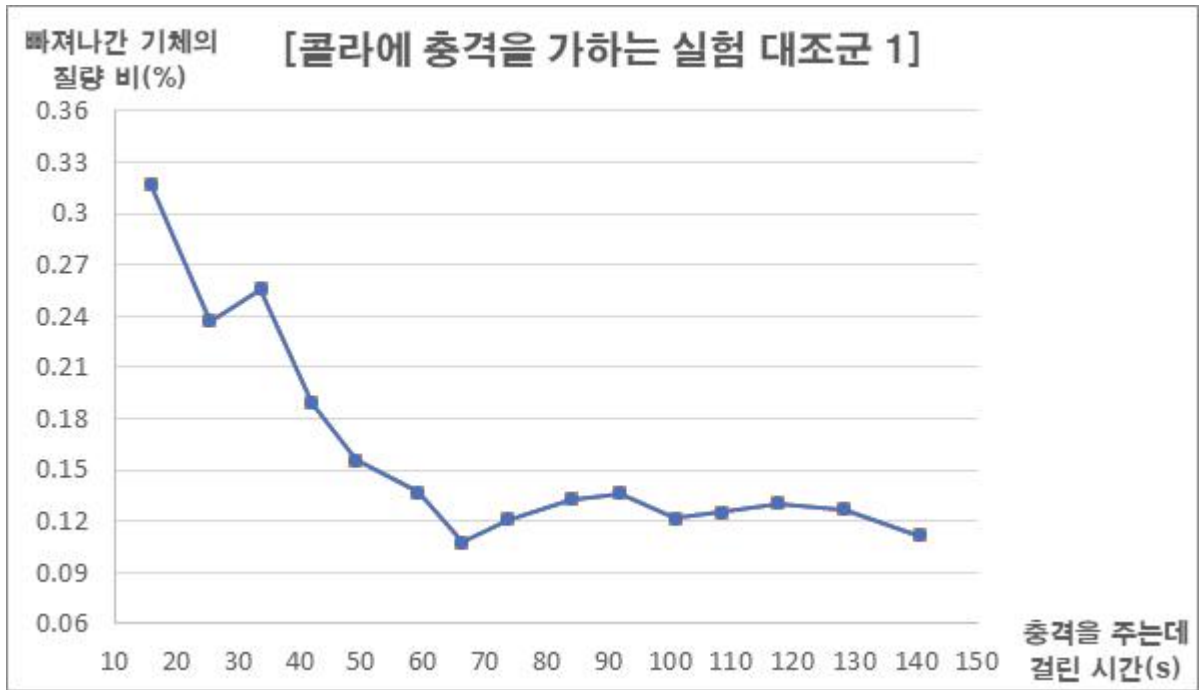
[그림 28] 콜라를 5초 흔들고 충격을 준 후 열었을 때 기체 방출량(3회 반복)

마) 콜라에 충격을 가하지 않은 첫 번째 실험

평균 시간(s)	20.63	30.27	38.53333	46.8	53.9
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	545.01	546.69	548.21	547.15	549.42
실험 후 질량(g)	543.37	545.46	546.88	546.17	548.61
빠져나간 기체의 질량(g)	1.64	1.23	1.33	0.98	0.81
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.317	0.237	0.256	0.189	0.155
상온(C)	26	26	26	26	26
콜라 온도(C)	25.1	25.2	25.3	25	25.2
습도(%)	74.6	74.9	74.7	74.9	75.1

평균 시간(s)	64	71.13	78.67	88.9	96.9
터짐 여부	○	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	547	549.54	549.53	546.93	548.35
실험 후 질량(g)	546.29	548.98	548.9	546.24	547.64
빠져나간 기체의 질량(g)	0.71	0.56	0.63	0.69	0.71
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.137	0.107	0.121	0.133	0.137
상온(C)	26	26	26	26	26
콜라 온도(C)	25.1	25.3	25.3	25.2	25.3
습도(%)	75.1	75.2	75.3	75.3	75.4

평균 시간(s)	105.8	113.33	122.57	133.33	145.43
터짐 여부	X	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	545.71	547.08	548.4	546.85	548.48
실험 후 질량(g)	545.08	546.43	547.72	546.19	547.9
빠져나간 기체의 질량(g)	0.63	0.65	0.68	0.66	0.58
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.122	0.125	0.131	0.127	0.116
상온(C)	26	26	26	26	26
콜라 온도(C)	25	25.3	25.2	25.2	25.2
습도(%)	75.4	75.5	75.5	75.5	75.6

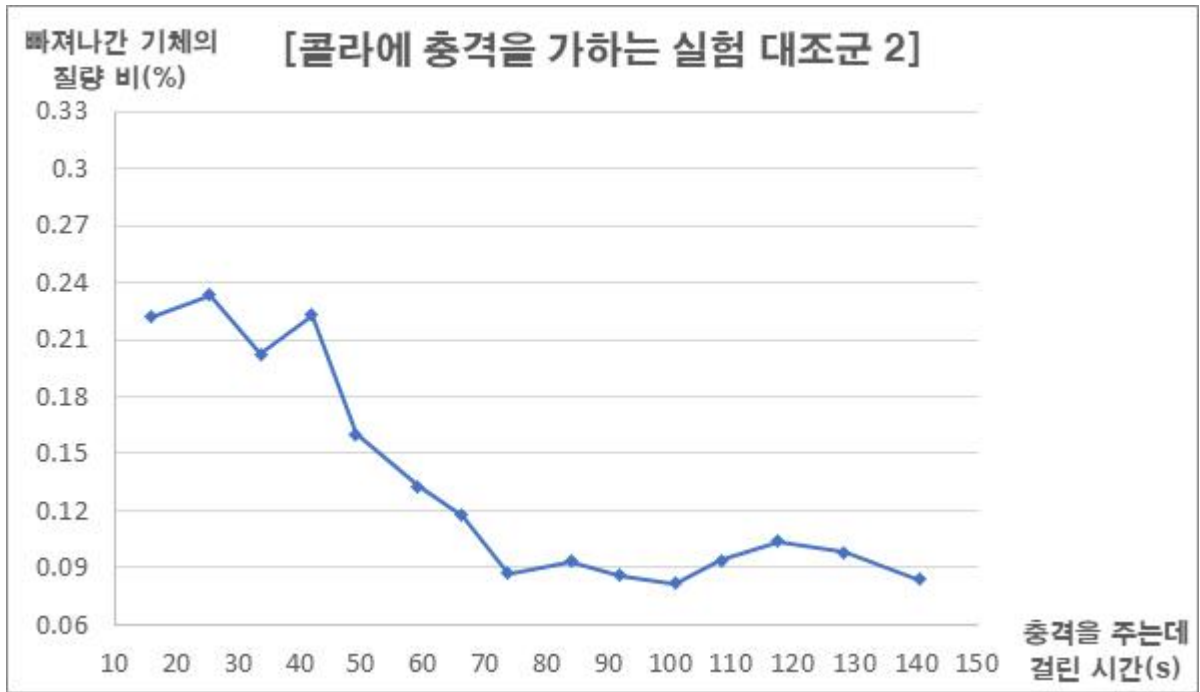


바) 콜라에 충격을 가하지 않은 두 번째 실험

평균 시간(s)	20.63	30.27	38.53	46.8	53.9
터짐 여부	O	O	O	O	O
실험 전 질량(g)	547.1	546.09	547.74	548.25	546.51
실험 후 질량(g)	545.95	544.88	546.69	547.09	545.68
빠져나간 기체의 질량(g)	1.15	1.21	1.05	1.16	0.83
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.222	0.234	0.202	0.223	0.160
상온(C)	26	26	26	26	26
콜라 온도(C)	25.1	25.2	25	25.1	25.2
습도(%)	73.2	74	76.1	77.4	77.7

평균 시간(s)	64	71.13	78.67	88.9	96.9
터짐 여부	O	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	548.87	538.39	545.21	541.98	540.99
실험 후 질량(g)	548.18	537.79	544.76	541.5	540.55
빠져나간 기체의 질량(g)	0.69	0.6	0.45	0.48	0.44
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.133	0.118	0.087	0.093	0.086
상온(C)	26	26	26	26	26
콜라 온도(C)	25.3	25.2	25.2	25.3	25.3
습도(%)	77.8	78.1	77.7	78.1	78.2

평균 시간(s)	105.8	113.33	122.57	133.33	145.43
터짐 여부	X	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	542.98	540.51	539.41	547.83	541.29
실험 후 질량(g)	542.56	540.03	538.88	547.32	540.86
빠져나간 기체의 질량(g)	0.42	0.48	0.53	0.51	0.43
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.082	0.094	0.104	0.098	0.084
상온(C)	26	26	26	26	26
콜라 온도(C)	25.3	25.2	25.3	25.2	25.3
습도(%)	78.1	78.4	78.5	78.2	78.6

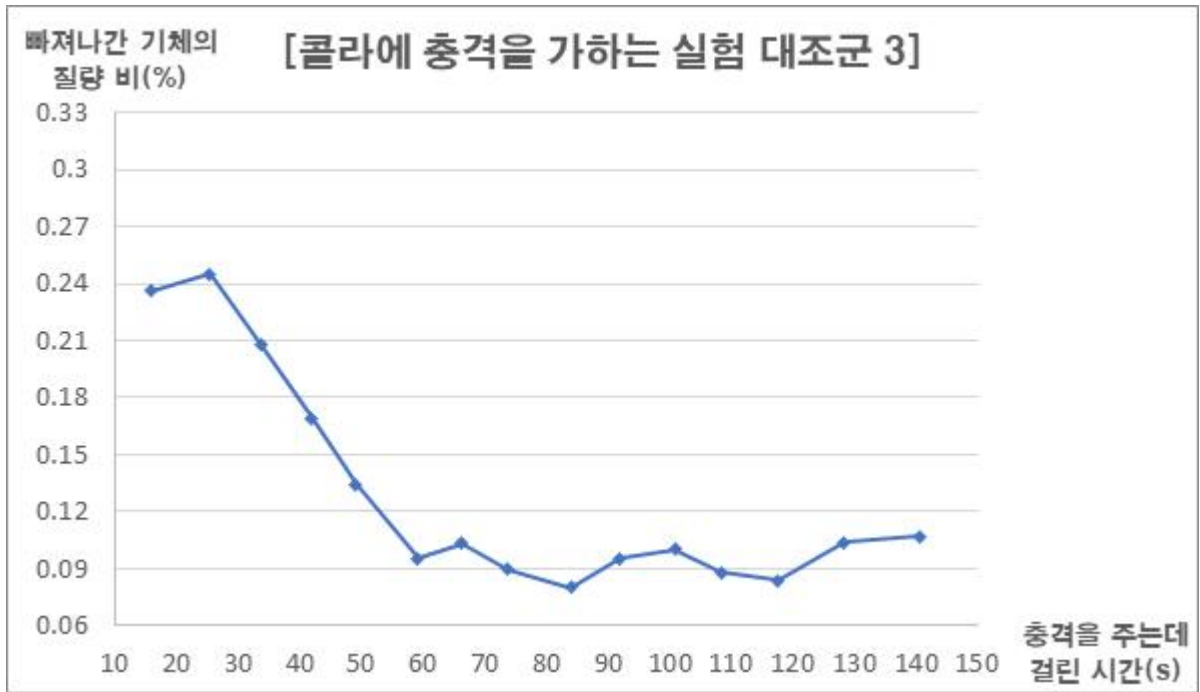


사) 콜라에 충격을 가하지 않은 세 번째 실험

평균 시간(s)	20.63	30.267	38.53	46.8	53.9
터짐 여부	O	O	O	O	O
실험 전 질량(g)	540.68	538.93	542.02	542.47	542.31
실험 후 질량(g)	539.47	537.68	540.95	541.6	541.62
빠져나간 기체의 질량(g)	1.21	1.25	1.07	0.87	0.69
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.236	0.245	0.208	0.169	0.134
상온(C)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5
콜라 온도(C)	25.6	25.6	25.6	25.7	25.7
습도(%)	79.5	80.7	79.7	81.4	80

평균 시간(s)	64	71.13	78.67	88.9	96.9
터짐 여부	O	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	542.16	543.17	543.17	540.98	543.86
실험 후 질량(g)	541.67	542.64	542.71	540.57	543.37
빠져나간 기체의 질량(g)	0.49	0.53	0.46	0.41	0.49
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.095	0.103	0.089	0.080	0.095
상온(C)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5
콜라 온도(C)	25.6	25.6	25.7	25.6	25.7
습도(%)	80.4	80	80.2	80.5	80.3

평균 시간(s)	105.8	113.33	122.57	133.33	145.43
터짐 여부	X	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	538.41	541.13	540.93	540.1	542.47
실험 후 질량(g)	537.9	540.68	540.5	539.57	541.92
빠져나간 기체의 질량(g)	0.51	0.45	0.43	0.53	0.55
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.100	0.088	0.084	0.104	0.107
상온(C)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5
콜라 온도(C)	25.7	25.7	25.6	25.6	25.7
습도(%)	80.5	80.4	80.4	80.5	80.4



아) 콜라에 충격을 가하지 않은 실험의 평균

평균 시간(s)	20.63	30.27	38.53	46.8	53.9
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.258	0.239	0.222	0.194	0.150
표준편차(%p)	0.042	0.005	0.024	0.022	0.011

평균 시간(s)	64	71.13	78.67	88.9	96.9
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.122	0.109	0.099	0.102	0.106
표준편차(%p)	0.019	0.006	0.015	0.023	0.022

평균 시간(s)	105.8	113.33	122.57	133.33	145.43
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.101	0.102	0.106	0.110	0.101
표준편차(%p)	0.016	0.016	0.019	0.013	0.012



[그림 32] 콜라를 5초 흔들고 기다린 후 열었을 때 기체 방출량(3회 반복)

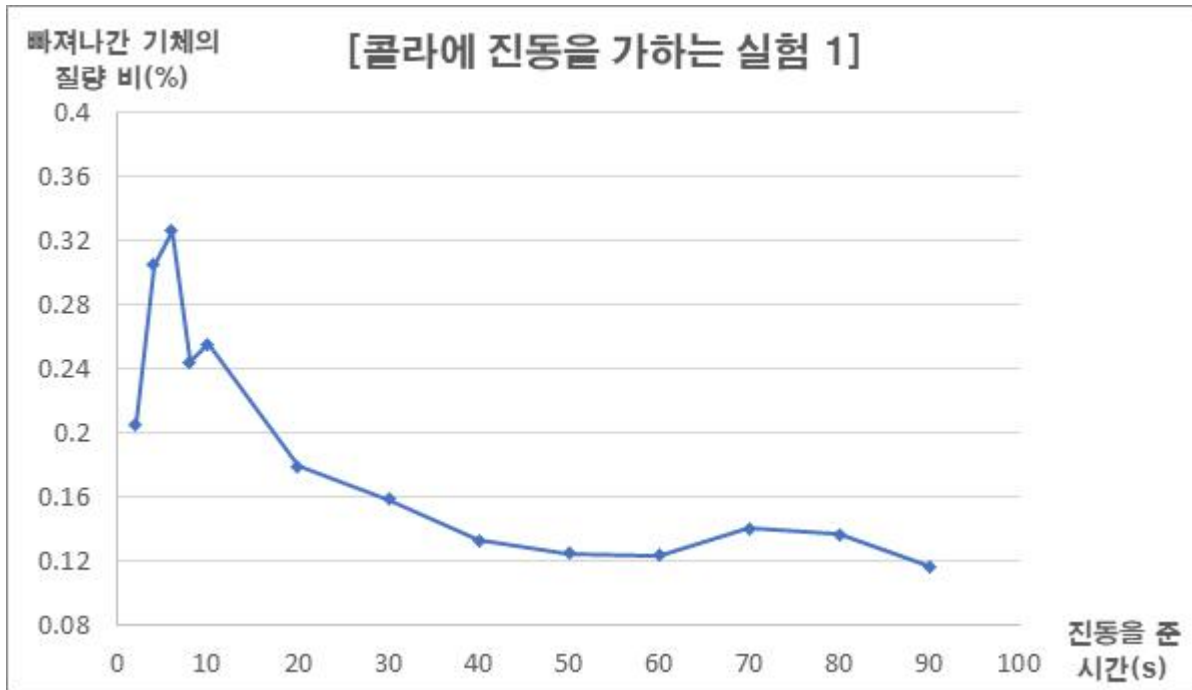
[부록 5] 실험 5의 결과

가) 콜라에 진동을 가한 첫 번째 실험

진동 시간(s)	2	2	4	4	6
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	550.77	549.29	547.21	546.29	544.54
실험 후 질량(g)	549.46	548.22	545.63	545.04	542.86
빠져나간 기체의 질량(g)	1.31	1.07	1.58	1.25	1.68
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.251	0.205	0.305	0.241	0.325
상온(C)	24	24.5	24.2	24	24.2
콜라 온도(C)	23.5	23.7	24	23.8	23.9
습도(%)	71.4	83.5	80.2	74.8	79.9

진동 시간(s)	8	10	20	30	40
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	548.63	549.44	548.04	547.27	548.06
실험 후 질량(g)	547.36	548.11	547.11	546.45	547.37
빠져나간 기체의 질량(g)	1.27	1.33	0.93	0.82	0.69
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.24	0.255	0.179	0.158	0.133
상온(C)	24.5	24	24	24.1	24.1
콜라 온도(C)	23.9	22.6	23.3	23.5	24
습도(%)	80.1	74.2	74.1	74.3	73.8

진동 시간(s)	50	60	70	80	90
터짐 여부	X	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	543.31	548.54	548.4	550.1	551.56
실험 후 질량(g)	542.67	547.9	547.67	549.39	550.95
빠져나간 기체의 질량(g)	0.64	0.64	0.73	0.71	0.61
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.124	0.123	0.140	0.136	0.117
상온(C)	24.2	24.3	24.4	24.4	25
콜라 온도(C)	23.6	23.7	23.5	23.6	23.6
습도(%)	72.6	73	73.5	70.4	71.5



나) 콜라에 진동을 가한 두 번째 실험

진동 시간(s)	2	2	4	4	6
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	546.87	545.66	548.63	550.03	550.65
실험 후 질량(g)	545.38	544.24	547.42	548.74	549.36
빠져나간 기체의 질량(g)	1.49	1.42	1.21	1.29	1.29
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.287	0.275	0.233	0.247	0.247
상온(C)	25	24.5	24.5	25	24.5
콜라 온도(C)	23.8	23.5	23.8	23.3	24
습도(%)	74	74.1	74	72.6	74.3

진동 시간(s)	8	10	20	30	40
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	547.75	552.38	559.5	545.8	547.6
실험 후 질량(g)	546.29	551.03	558.57	544.98	546.77
빠져나간 기체의 질량(g)	1.46	1.35	0.93	0.82	0.83
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.281	0.258	0.175	0.158	0.160
상온(C)	24.2	24.5	24.4	24.3	24.5
콜라 온도(C)	24.2	23.5	23.9	23.7	23.5
습도(%)	74.8	74.5	75.2	75.6	76.2

진동 시간(s)	50	60	70	80	90
터짐 여부	X	○	X	X	X
실험 전 질량(g)	550.13	548.97	547.62	549.22	548.22
실험 후 질량(g)	549.4	548.35	547.03	548.62	547.7
빠져나간 기체의 질량(g)	0.73	0.62	0.59	0.6	0.52
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.140	0.119	0.114	0.115	0.100
상온(C)	24.4	25.8	25.7	25	25
콜라 온도(C)	23.5	24.2	24.4	23.3	23.4
습도(%)	76.2	74.6	74.3	70.8	71

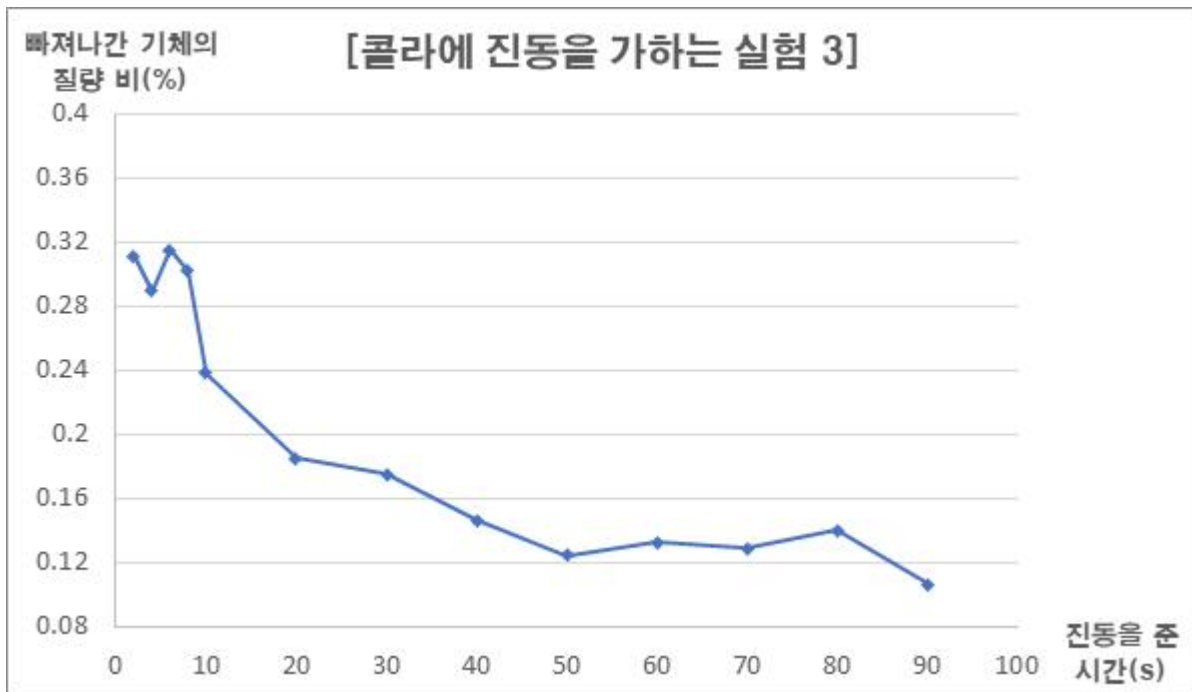


다) 콜라에 진동을 가한 세 번째 실험

진동 시간(s)	2	2	4	4	6
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	548.85	551.94	547.37	548.59	546.26
실험 후 질량(g)	547.33	550.31	545.87	547.12	544.63
빠져나간 기체의 질량(g)	1.52	1.63	1.5	1.47	1.63
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.292	0.311	0.289	0.283	0.315
상온(C)	25	25.2	25.5	25	25.5
콜라 온도(C)	23.9	24.5	24.2	23.9	24.2
습도(%)	73.4	72.9	72.7	73.5	73.5

진동 시간(s)	8	10	20	30	40
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	548.83	545.47	546.86	548.17	548.29
실험 후 질량(g)	547.26	544.24	545.9	547.26	547.53
빠져나간 기체의 질량(g)	1.57	1.23	0.96	0.91	0.76
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.302	0.238	0.185	0.175	0.146
상온(C)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5
콜라 온도(C)	24.2	24.5	24.5	24.5	24.7
습도(%)	71.7	71.6	71.1	70.7	73.5

진동 시간(s)	50	60	70	80	90
터짐 여부	X	X	X	X	X
실험 전 질량(g)	560.4	549.54	549.54	549.36	547.28
실험 후 질량(g)	559.74	548.85	548.87	548.63	546.73
빠져나간 기체의 질량(g)	0.66	0.69	0.67	0.73	0.55
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.124	0.132	0.129	0.140	0.106
상온(C)	25.1	25	25.2	25	25
콜라 온도(C)	24.6	24.7	24.6	23.3	23.5
습도(%)	73.5	73.8	74.9	71.8	72.5

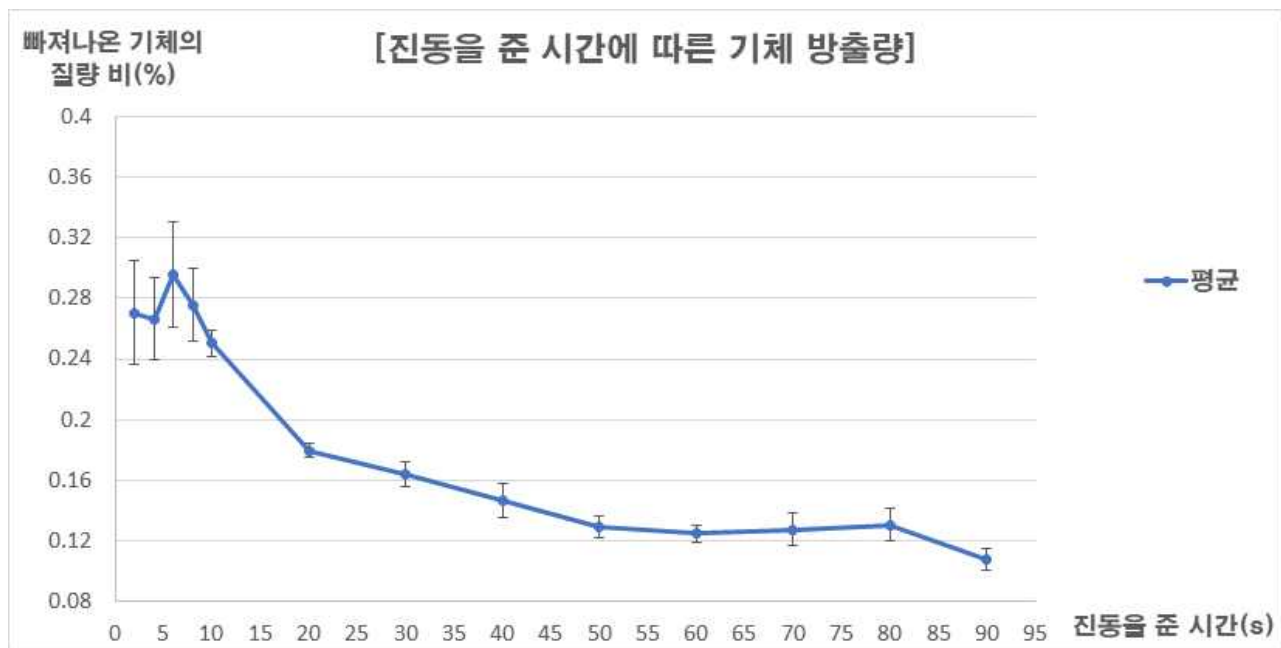


라) 콜라에 진동을 가한 실험의 평균

진동 시간(s)	2	4	6	8	10
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.270	0.266	0.296	0.276	0.250
표준편차(%p)	0.034	0.027	0.035	0.024	0.009

진동 시간(s)	20	30	40	50	60
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.180	0.164	0.146	0.129	0.125
표준편차(%p)	0.004	0.008	0.011	0.007	0.006

진동 시간(s)	70	80	90		
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.128	0.130	0.108		
표준편차(%p)	0.011	0.011	0.007		



[그림 36] 콜라를 5초 흔들고 진동을 준 후 열었을 때 기체 방출량(3회 반복)

마) 콜라에 진동을 가하지 않은 첫 번째 실험

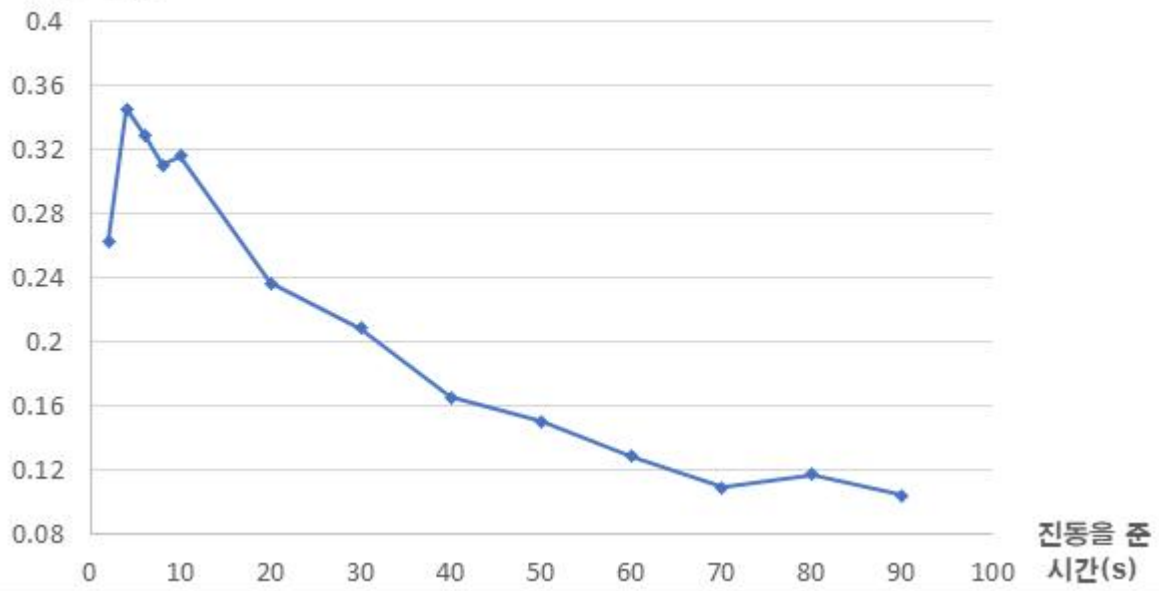
진동 시간(s)	2	4	6	8	10
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	549.54	549.39	550.67	552.61	549.81
실험 후 질량(g)	548.17	547.59	548.95	550.98	548.16
빠져나간 기체의 질량(g)	1.37	1.8	1.72	1.63	1.65
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.263	0.345	0.329	0.311	0.316
상온(C)	24.2	24.3	24.5	24.6	24.8
콜라 온도(C)	23.8	23.5	23.4	23.6	23.5
습도(%)	76.8	76.6	76.6	76.5	76.8

진동 시간(s)	20	30	40	50	60
터짐 여부	○	○	○	○	X
실험 전 질량(g)	547.78	545.48	552.74	546.9	549.5
실험 후 질량(g)	546.55	544.4	551.87	546.12	548.83
빠져나간 기체의 질량(g)	1.23	1.08	0.87	0.78	0.67
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.237	0.209	0.166	0.150	0.129
상온(C)	24	23.9	24	24	24
콜라 온도(C)	23.1	22.3	22.8	22.8	23.3
습도(%)	70.9	70.9	71.6	71.6	72.2

진동 시간(s)	70	80	90		
터짐 여부	X	X	X		
실험 전 질량(g)	548.75	546.75	546.34		
실험 후 질량(g)	548.18	546.14	545.8		
빠져나간 기체의 질량(g)	0.57	0.61	0.54		
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.110	0.118	0.104		
상온(C)	24	25	25		
콜라 온도(C)	23.3	23.6	23.9		
습도(%)	72.2	71	70.5		

빠져나간 기체의
질량 비(%)

[콜라에 진동을 가하는 실험 대조군 1]



바) 콜라에 진동을 가하지 않은 두 번째 실험

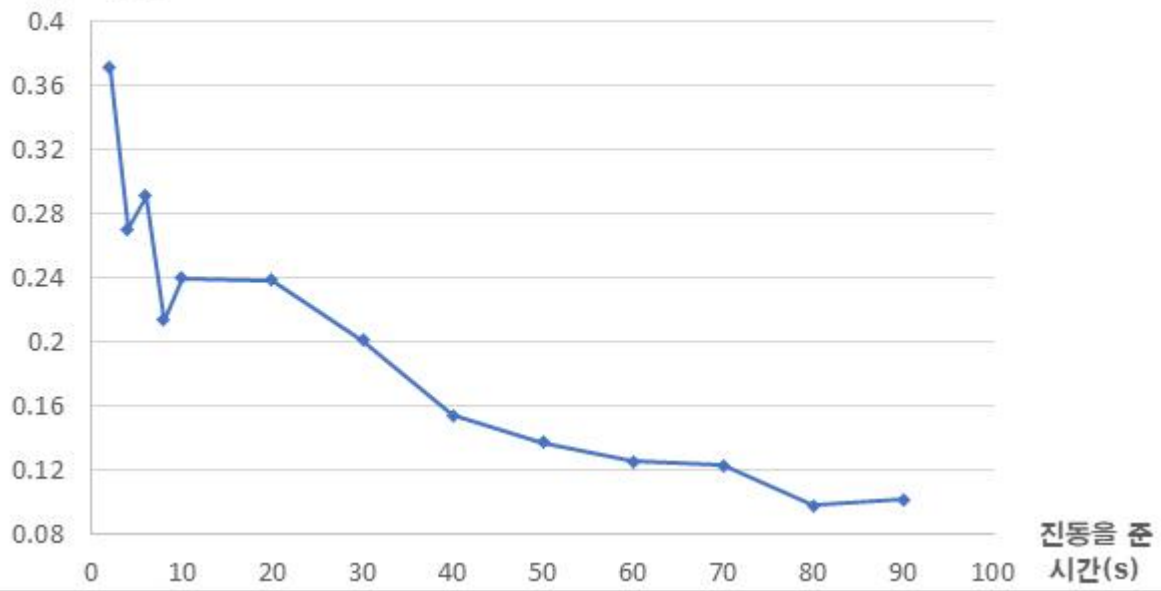
진동 시간(s)	2	4	6	8	10
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	546.02	549.85	550.45	562.12	548.94
실험 후 질량(g)	544.1	548.44	548.93	560.98	547.69
빠져나간 기체의 질량(g)	1.92	1.41	1.52	1.14	1.25
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.371	0.270	0.291	0.214	0.240
상온(C)	25.3	25.5	25.5	25.5	25.5
콜라 온도(C)	24.6	24.3	24.7	24.7	24.7
습도(%)	72.2	75.3	75.5	75.8	75.8

진동 시간(s)	20	30	40	50	60
터짐 여부	○	○	○	○	X
실험 전 질량(g)	544.46	541.33	546.79	551.47	547.53
실험 후 질량(g)	543.23	540.3	545.99	550.75	546.88
빠져나간 기체의 질량(g)	1.23	1.03	0.8	0.72	0.65
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.238	0.201	0.154	0.138	0.125
상온(C)	24	25.5	25.5	24	24
콜라 온도(C)	23.7	24.7	24.7	23.4	23.5
습도(%)	69	76.4	77	73.3	73.1

진동 시간(s)	70	80	90		
터짐 여부	X	X	X		
실험 전 질량(g)	548.96	548.7	550.64		
실험 후 질량(g)	548.32	548.19	550.11		
빠져나간 기체의 질량(g)	0.64	0.51	0.53		
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.123	0.098	0.101		
상온(C)	24	25	24.4		
콜라 온도(C)	22.8	23.8	23.8		
습도(%)	72.7	69.2	69.2		

빠져나간 기체의
질량 비(%)

[콜라에 진동을 가하는 실험 대조군 2]



사) 콜라에 진동을 가하지 않은 세 번째 실험

진동 시간(s)	2	4	6	8	10
터짐 여부	○	○	○	○	○
실험 전 질량(g)	545.08	549.36	549.8	551.92	552.56
실험 후 질량(g)	543.1	547.7	548.27	550.3	551.07
빠져나간 기체의 질량(g)	1.98	1.66	1.53	1.62	1.49
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.383	0.319	0.293	0.309	0.284
상온(C)	25.7	25.4	25.5	25.6	25.6
콜라 온도(C)	24.4	24.4	24.7	24.7	24.7
습도(%)	74.4	71.9	67.4	73.2	74

진동 시간(s)	20	30	40	50	60
터짐 여부	○	○	X	X	X
실험 전 질량(g)	544.91	552.49	548.09	539.3	544.86
실험 후 질량(g)	543.75	551.35	547.31	538.6	544.27
빠져나간 기체의 질량(g)	1.16	1.14	0.78	0.7	0.59
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.225	0.218	0.150	0.137	0.114
상온(C)	24	25.5	25.5	25.5	25.5
콜라 온도(C)	23.5	24.5	24.4	24.4	24.5
습도(%)	69.3	74.3	74.8	74.8	75.2

진동 시간(s)	70	80	90		
터짐 여부	X	X	X		
실험 전 질량(g)	544.98	552.08	547.1		
실험 후 질량(g)	544.3	551.58	546.53		
빠져나간 기체의 질량(g)	0.68	0.5	0.57		
빠져나간 기체의 질량 비(%)	0.132	0.095	0.110		
상온(C)	25.5	24.5	24.5		
콜라 온도(C)	24.4	23.6	23.5		
습도(%)	74.2	69.9	70.4		



아) 콜라에 진동을 가하지 않은 실험의 평균

진동 시간(s)	2	4	6	8	10
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.339	0.312	0.305	0.278	0.280
분산	0.0029	0.0010	0.0003	0.0021	0.0010
표준편차(%p)	0.054	0.031	0.017	0.046	0.031

진동 시간(s)	20	30	40	50	60
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.233	0.209	0.157	0.142	0.123
분산	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
표준편차(%p)	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006

진동 시간(s)	70	80	90		
빠져나간 기체의 질량 비 평균(%)	0.121	0.104	0.105		
분산	0.0001	0.0001	0.0000		
표준편차(%p)	0.009	0.010	0.003		



[그림 40] 콜라를 5초 흔들고 진동을 주지 않고 기다린 후 열었을 때 기체 방출량