실험 1: 자기적으로 활성인 유체의 정적 반응
예시 풀이

일반 참고: 이 풀이는 여러 부분에서 짧아 보인다. 그러나 학생들은 장비를 다루고 좋은 자료를 얻으려 애써야 하며, 이는 시간이 걸린다. 풀이는 몇 가지 요령을 보이려 한 것이다. 정량적인 값은 쓰인 유체의 양과 용기에 따라 달라짐에 유의하라 – 실험에 쓸 때에는 이들을 시험하고 다시 눈금을 맞추어야 한다.

A1: 시료 병으로 한 측정: $\Delta z = 0.061 \pm 0.004$ m, 잘 균형을 이룰 때. (좋은 z 에 0.5, 합리적인 불확도에 0.3) *만점을 받으려면 여러 번 시도한 것이 보여야 한다*

A2: 밀도 차가 알짜 부력을 주므로, 중력과 자기력의 균형: $\Delta\rho g = 3\,\chi B_r^2 a^4 l^2 / 8\mu_0 z^7$ (0.3)

g 로 나누어 ρ 를 구한 다음, 큰 자석의 값을 넣으면

$\Delta\rho = 15$ kg m^{-3} (0.3)

불확도의 원인: 주로 z – 재기 어렵지만 조절할 수 있다, 그리고 χ – 초상자성체에서는 실제로 일정하지 않다.
합리적인 불확도 방법이면 무엇이든 좋다. 위 자료를 쓰면 6 kg m^{-3}
(0.2) 정도로 어림할 수 있다. 학생들은 자기 오차가 어디에서 오는지 어느 정도 밝혀야 한다.

새 병으로 다시 측정할 것이다.

B1: $z_{crit} = 22 \pm 1$ mm (돌기가 나타나는 시점의 불확도에서) (0.2 + 0.1)

$\lambda = 6 \pm 1$ mm (유리를 지나는 각 때문에 처음 파장의 측정에 불확도가 생김) (0.2 + 0.1)

만점을 받으려면 여러 번 시도한 것이 보여야 한다

좋은 값에는 점수를 준다. 이 부분은 병을 옆으로 눕히면 가장 쉽지만, 병을 세운 채로도 할 수 있다.

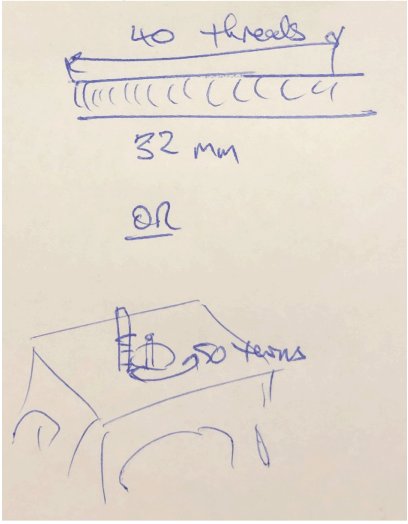
앞으로를 위한 참고: 실제 실험 장치로 값을 다시 얻어야 한다. 이들은 쓰이는 병과 자석에 민감하다.

B2: 여기서는 별것 아닌 것에 점수가 많아 보이지만, 이 점수는 질 좋은 자료를 얻는 실험 기술에 대한 것이다. 조심하면 꽤 정밀할 수 있고, 계산의 자세함과 마찬가지로 여기서도 보상한다..

표면장력은 위 관계식으로 계산할 수 있다. 또한 앞 부분에서 얻은 밀도 차가 필요하므로, 두 부분의 큰 불확도가 겹쳐 이 부분의 불확도가 불합리해지는 지점까지 이른다.

이 예시 풀이의 값에 대해 $\sigma = 1.3 \times 10^{-2}$, N m^{-1} (크기 차수 이내로 옳으면 0.3). 불확도 어림: 이 자료에서 $\Delta\sigma = 6 \times 10^{-3}$ N m^{-1} . (합리적인 방법으로 옳게 계산하면 0.2, 50% 미만이면 0.1 추가).

C1: 여러 가지 풀이 접근이 있다.. 모두 나사산을 세고 거리를 재야 한다. 쓸모 있는 장치의 그림에 **0.2**. 예를 들어:



0.2 는 측정과 계산에.

학생들은 다음을 얻어야 한다
$\Delta z = 0.80 \pm 0.02$ mm **(0.2)**

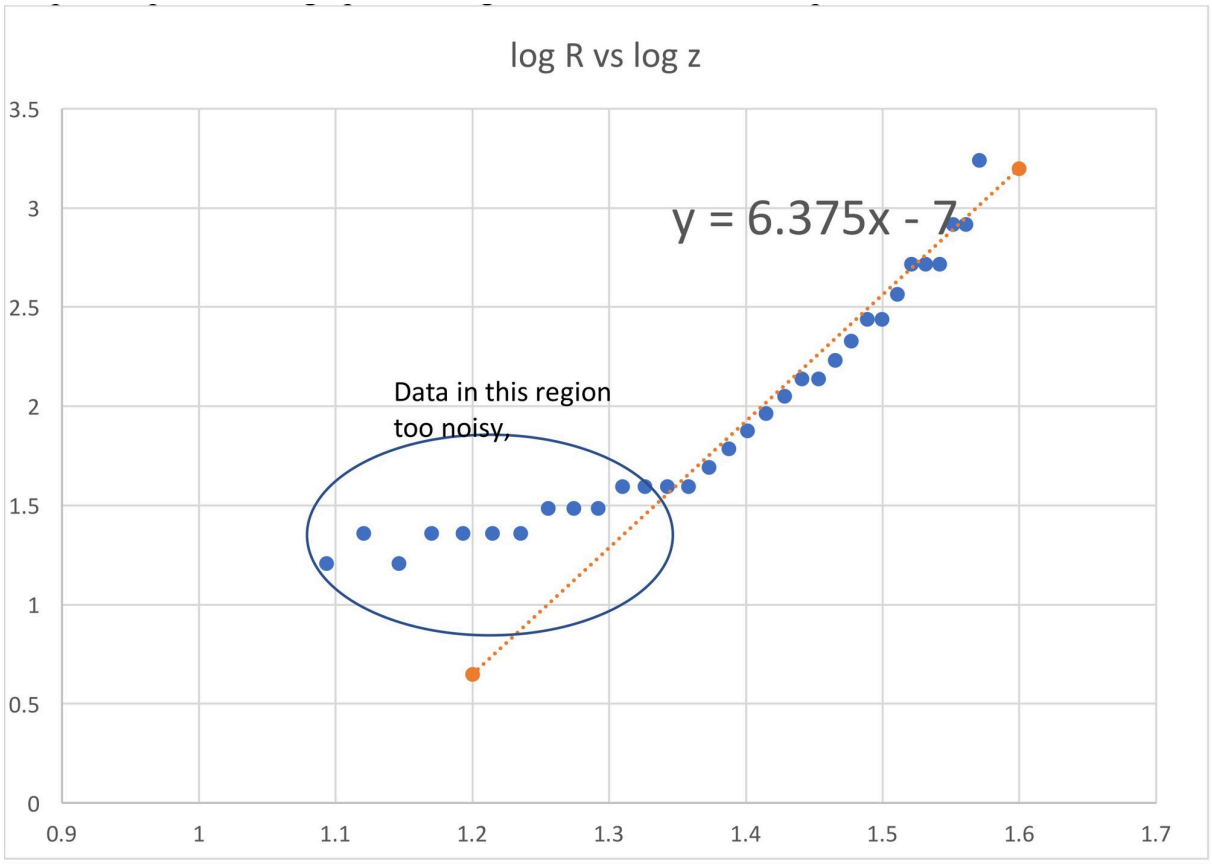
눈으로 세는 방법을 쓰면 최소 세 번의 측정이 필요하다. 한 바퀴씩 세는 방법이면 최소 세 가지 회전수에 대해 거리 측정을 해야 한다.

C2: 측정값의 표:

turns	length of ligh	z (has offset)	M	R	z (corrected)	log z	log R
32.50	20.00	26.00	1.00	#DIV/0!	38.00	1.58	#DIV/0!
31.50	19.00	25.20	0.95	1748.00	37.20	1.57	3.24
30.50	18.00	24.40	0.90	828.00	36.40	1.56	2.92
29.50	18.00	23.60	0.90	828.00	35.60	1.55	2.92
28.50	17.00	22.80	0.85	521.33	34.80	1.54	2.72
27.50	17.00	22.00	0.85	521.33	34.00	1.53	2.72
26.50	17.00	21.20	0.85	521.33	33.20	1.52	2.72
25.50	16.00	20.40	0.80	368.00	32.40	1.51	2.57
24.50	15.00	19.60	0.75	276.00	31.60	1.50	2.44
23.50	15.00	18.80	0.75	276.00	30.80	1.49	2.44
22.50	14.00	18.00	0.70	214.67	30.00	1.48	2.33
21.50	13.00	17.20	0.65	170.86	29.20	1.47	2.23
20.50	12.00	16.40	0.60	138.00	28.40	1.45	2.14
19.50	12.00	15.60	0.60	138.00	27.60	1.44	2.14
18.50	11.00	14.80	0.55	112.44	26.80	1.43	2.05
17.50	10.00	14.00	0.50	92.00	26.00	1.41	1.96
16.50	9.00	13.20	0.45	75.27	25.20	1.40	1.88
15.50	8.00	12.40	0.40	61.33	24.40	1.39	1.79
14.50	7.00	11.60	0.35	49.54	23.60	1.37	1.69
13.50	6.00	10.80	0.30	39.43	22.80	1.36	1.60
12.50	6.00	10.00	0.30	39.43	22.00	1.34	1.60
11.50	6.00	9.20	0.30	39.43	21.20	1.33	1.60
10.50	6.00	8.40	0.30	39.43	20.40	1.31	1.60
9.50	5.00	7.60	0.25	30.67	19.60	1.29	1.49
8.50	5.00	6.80	0.25	30.67	18.80	1.27	1.49
7.50	5.00	6.00	0.25	30.67	18.00	1.26	1.49
6.50	4.00	5.20	0.20	23.00	17.20	1.24	1.36
5.50	4.00	4.40	0.20	23.00	16.40	1.21	1.36
4.50	4.00	3.60	0.20	23.00	15.60	1.19	1.36
3.50	4.00	2.80	0.20	23.00	14.80	1.17	1.36
2.50	3.00	2.00	0.15	16.24	14.00	1.15	1.21
1.50	4.00	1.20	0.20	23.00	13.20	1.12	1.36
0.50	3.00	0.40	0.15	16.24	12.40	1.09	1.21

1.0 점은 회전수와 M 의 원측정값에.
0.5 점은 R 로의 옳은 변환에.

그래프: **1.0** 점은 지수를 계산할 수 있는 그래프에.



0.5 옳은 영역에 맞춤
0.5 합리적으로 어림한 불확도와 함께 n 이 $6 \sim 7$ 범위인 답.

참고: 학생이 스탠드의 면과 유체의 면 사이 거리를 고려하지 않으면, 로그-로그 그래프는 합리적인 거듭제곱 법칙을 따르지 않으므로 제대로 된 선형 영역을 갖지 않는다. 이 경우 변환, 맞춤, 답 어느 것에도 점수를 주지 않는다.

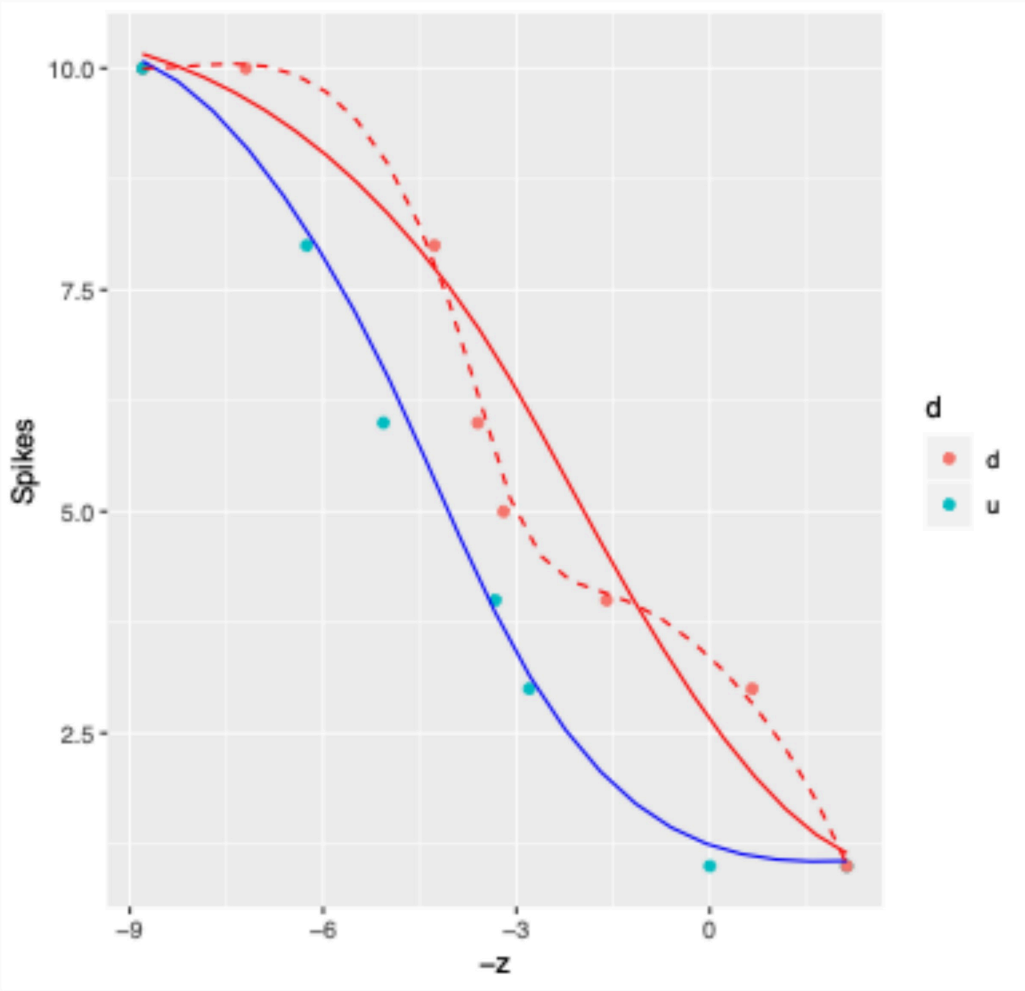
D1: 표면장력 $\sigma \cong 2.3 \times 10^{-2}\text{N m}^{-1}$. **0.5** 10% 이내이면, 20% 이내이면 0.3, 그 밖에는 0.

D2: 예시 측정값의 표:

Spikes	Turns	z
1	0	0
3	3.5	2.8
4	4.16	3.328
6	6.33	5.064
8	7.82	6.256
10	11	8.8
10	2	7.2
8	5.66	4.272
6	6.5	3.6
5	7	3.2
4	9	1.6
3	11.82	-0.656
1	13.66	-2.128

이 자료표에서 z 는 유체에 가까워질수록 커지도록 측정했다. 문제에서는 z 를 유체로부터의 거리로 정의한다. 학생들은 자기 변수를 어떻게 정의했는지 명시적으로 보이거나, 문제에 맞도록 z 로 변환해야 한다. 어느 쪽이든 D3의 그래프는 알맞은 방향이어야 하고, 따라서 z 는 문제에 맞도록 변환되어야 한다. 이 풀이에서는 오프셋이 이력 현상에 아무 영향을 주지 않으므로 단순히 z 를 뒤집어 썼다.
1.0 각 방향으로 최소 6회 측정, z 로의 변환과 합리적인 불확도 어림에.
참고: 여기에는 돌기의 생성점과 소멸점을 옳게 얻기 위한 시간과 주의가 필요하다. 값이 빠졌거나 돌기 수가 부정확하게 건너뛴 것은 엉성한 작업을 나타낸다. 눈금 맞춘 나사산을 쓰지 않고 (대신 자를 써서) 하면 결과가 훨씬 부정확해진다.

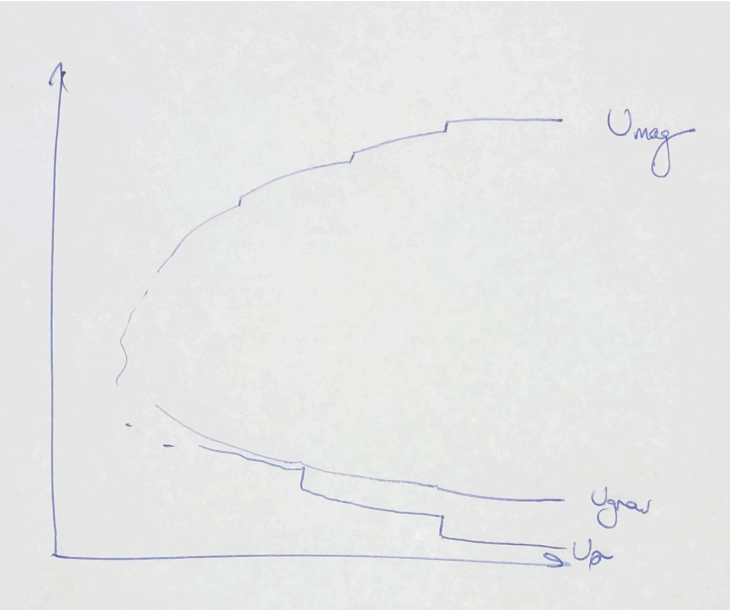
D3:



0.3 그래프를 옳게 그림. **0.2** 점들에 맞춘 매끄러운 곡선 각각. **0.3** 뚜렷한 이력 현상이 나타남: 올릴 때와 내릴 때의 측정 사이에 z 에서 최소 1.5 mm 간격.

자료가 양자화되어 있지만 여전히 합리적인 곡선을 따라야 한다. 위 곡선에서 파란색은 유체에 가까워질 때, 빨간색은 멀어질 때이다. 점선 곡선은 학생이 내려가는 쪽 점들을 이은 결과일 가능성이 크다 – 자료에 잘록한 부분이 있다. 실선 빨간 곡선은 APhO에서 본 전형적인 평균 곡선이다.

D4:



주요 특징:
자기 에너지는 자석이 가까워질수록 거듭제곱 법칙을 따라 빠르게 감소해야 한다 – 합리적으로 보이기만 하면 거듭제곱을 정하려 하지 않아도 점수를 준다. 새로운 불안정한 표면을 따라 유체가 끌려가면서 자기 퍼텐셜 에너지가 조금 방출되므로 돌기 생성에서 작은 계단이 있어야 한다.

표면 에너지는 돌기 생성점에서 뛰어야 하고, 나머지 시간 동안에는 훨씬 천천히, 그러나 꾸준히 변해야 한다.

전체 에너지가 감소하는 것이 중요하다. 강자성유체 방이 아래에서 자석을 끌어당기므로 학생들은 이를 알 수 있다 – 자기 퍼텐셜 에너지의 대부분은 강자성유체의 내부 구조에 갇히기보다 자석을 들어 올리는 데 쓰인다.

각 그래프에 0.2, 전체 에너지의 옳은 거동에 0.2.