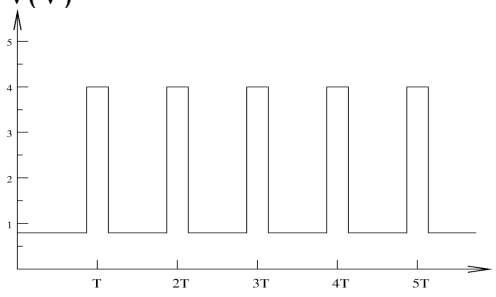
풍력과 그 계측 (20점)

A. 이론적 배경 (1.0점)

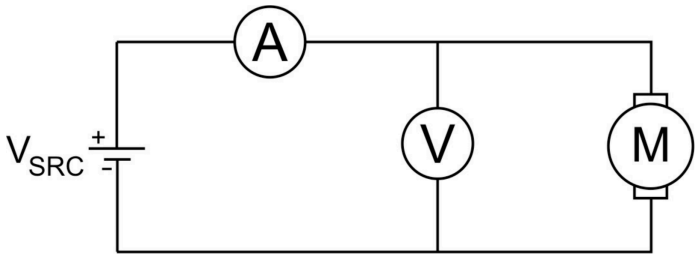
A.1 (0.4점)	$P_w = \frac{1}{2} v_0^2 \frac{dm}{dt}$ $P_w = \frac{1}{2} \rho A_0 v_0^3$ $n = 3$
A.2 (0.4점)	$P_R = \frac{1}{2} \rho A \frac{v_0^3}{2} (1+\lambda)\left(1-\lambda^2\right) = \frac{\rho A v_0^3}{4}(1+\lambda-\lambda^2-\lambda^3)$ $\frac{dP_R}{d\lambda} = 0 \rightarrow 1 - 2\lambda - 3\lambda^2 = 0$ $\lambda = \frac{1}{3}$
A.3 (0.2점)	베츠 효율: $C_P = \left.\frac{P_R}{P_W}\right\|_\lambda = \frac{16}{27} \sim 59.26\%$

B. 풍동 (3.2점)

B.1 (0.8점)	모터 발생기의 날개를 손으로 돌리면, 센서가 날개의 반사 스티커를 지날 때마다 광센서 신호의 전압이 높아진다. 이 신호가 측정기에 진동수 신호를 준다. V(V) 
B.2 (2.4점)	$\eta_M = \frac{P_W}{P_M} = \frac{\rho_A A_0 v_0^n}{2P_M} \rightarrow P_M = \frac{\rho_A A_0 v_0^n}{2\eta_M}$ 풍동 지름: $D_T = 13.5$ cm. $A_0 = \pi R_T^2 = 0.0143\,\mathrm{m}^2$. $\ln P_M = \ln \frac{\rho_A A_0}{2\eta_M} + n \ln v \rightarrow y = a + bx$ 아래 그래프와 선형 회귀로 지수 $n = 3.0$을 얻는다. 이는 *이론과 잘 일치하며*, 따라서 바람의 일률이

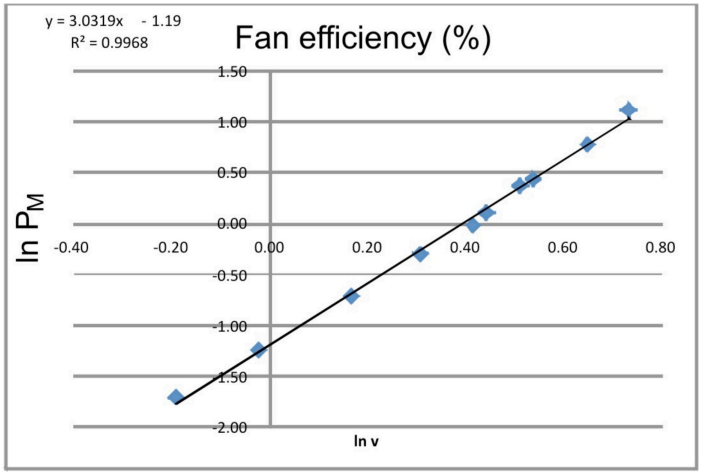
	$P_W \sim v^3$임을 보여 준다. $\eta_M = \frac{\rho_A A_0}{2e^a} = 2.8\%$ 만점 결과 / 채점 기준(여러 장치에서 표본 추출): $\eta_M = (3 \pm 2)\%$. 모터 품질의 차이가 클 것을 예상한 값이다.

연결도:



가장 좋은 결과를 얻으려면 전류계 양단의 전압 강하가 더해지지 않도록 전압계를 모터 바로 양단에 연결해야 한다는 점에 주의하라.

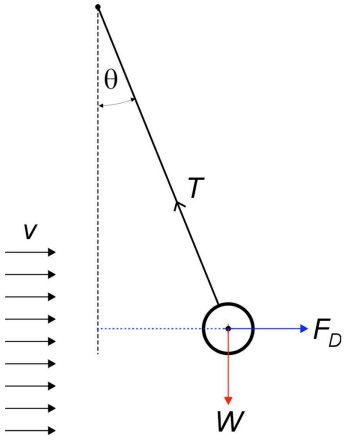
f (Hz)	v (m/s)	V (V)	I (A)	P_M (W)	$ln\ v$	$ln\ P_M$
27.2	2.38	15.920	0.350	5.57	0.87	1.72
26.0	2.27	14.910	0.330	4.92	0.82	1.59
25.0	2.18	13.410	0.300	4.02	0.78	1.39
23.8	2.08	11.830	0.260	3.08	0.73	1.12
21.9	1.91	9.880	0.220	2.17	0.65	0.78
19.6	1.71	8.100	0.190	1.54	0.54	0.43
17.3	1.51	6.540	0.150	0.98	0.41	-0.02
19.1	1.66	7.370	0.196	1.44	0.51	0.37
17.8	1.55	6.490	0.172	1.12	0.44	0.11
15.6	1.36	5.240	0.142	0.74	0.31	-0.30
13.5	1.18	4.210	0.116	0.49	0.16	-0.72
11.2	0.98	3.240	0.089	0.29	-0.02	-1.25
9.5	0.82	2.630	0.068	0.18	-0.19	-1.72
6.8	0.59	2.390	0.044	0.10	-0.52	-2.26



C. 탁구공 풍속계 (3.5점)

C.1 (0.7점)

정적 평형에서의 힘 그림:



$$\tan\theta = \frac{F_D}{W_B} = \frac{C_D\,\rho_A\,A_B\,v^m}{2\,m_B\,g}$$

$$v = \sqrt[m]{\frac{2m_Bg}{C_D\rho_A A}\tan\theta}$$

C.2 (2.8점)

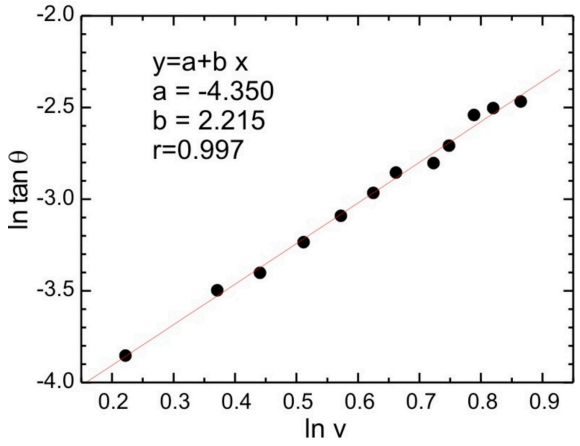
$$\ln\tan\theta = \ln\frac{C_D\rho_A A_B}{2m_Bg} + m\ln v \rightarrow y = a + bx$$

기울어진 각은 $\tan\theta = \Delta x/h$로 계산할 수 있다. 여기서 Δx는 변위이고 h는 자로부터의 높이이다. 공의 단면적은 $A_B = \pi d_B^2/4$이며 $d_B = 0.0395\,\mathrm{m}$이다. 풍동 속 풍속은 (식 4) $v = c_1 f_M$로 주어지며 $c_1 = 0.0873\,\mathrm{m}$이다.

이 예에서는 다음과 같다.

$m = b = 2.2$

	$C_D = \frac{2m_B g}{\rho_A A_B} e^a = 0.40$ 만점 결과 / 채점 기준(여러 장치에서 표본 추출): $m = 2.0 \pm 0.3$ $C_D = 0.42 \pm 0.05$



f	*tan θ*	*V*	*ln v*	*ln tan θ*
27.2	0.0848	2.3746	0.8648	-2.47
26.0	0.0818	2.2698	0.8197	-2.50
25.2	0.0788	2.2	0.7884	-2.54
24.2	0.0667	2.1127	0.7479	-2.71
23.6	0.0606	2.0603	0.7228	-2.80
22.2	0.0576	1.9381	0.6617	-2.85
21.4	0.0515	1.8682	0.625	-2.97
20.3	0.0455	1.7722	0.5722	-3.09
19.1	0.0394	1.6674	0.5113	-3.23
17.8	0.0333	1.5539	0.4408	-3.40
16.6	0.0303	1.4492	0.371	-3.50
14.3	0.0212	1.2484	0.2219	-3.85

주:

이 값들은 이론적으로 확립된 값 $n = 2$와 아주 잘 일치한다. 즉 끌림힘은 속도의 제곱에 비례한다.

끌림 계수 C_D는 아래처럼 입자 레이놀즈 수 Re ~ 10^3 – 10^5인 매끄러운 공의 알려진 이상값 $C_D = 0.47$에 가깝다. 이 실험에서 최대 레이놀즈 수는

$$\mathrm{Re}_B = \frac{\rho_A v D_B}{\mu_A} = \frac{1.2 \times 2.5 \times 0.038}{18.3 \times 10^{-6}} = 6240 \quad (1)$$

우리 C_D 값의 차이는 풍동의 경계가 유한하기 때문일 수 있다.

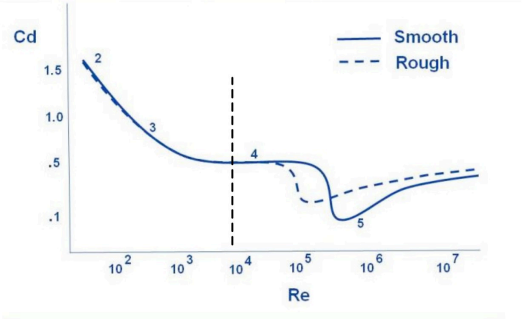


그림 1. 입자 레이놀즈 수에 대한 끌림 계수 (Smooth: 매끄러움, Rough: 거침)

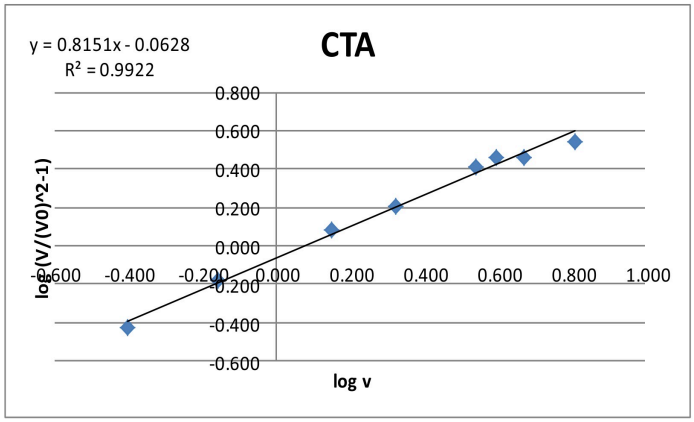
D. 열선 풍속계(HWA) (6.7점)

[D.1] 정온도 (3.2점)

D.1.1 (0.4점)	휘트스톤 브리지에서 $V_W = V_{INP}\frac{R_W}{R_W + R_B} = c_1 V_{INP}$ $\frac{V_W^2}{R_W} = (a + bv^c)A_w(T_w - T_0) \rightarrow V_{INP}^2 = \frac{R_W}{c_1^2}A_W(T_W - T_0)(a + b\,v^c)$ $V_{INP}^2 = \frac{(R_W + R_B)^2}{R_W}A_W(T_W - T_0)(a + b\,v^c) = c_2(a + b\,v^c)$ 여기서 $c_2 = \frac{(R_W + R_B)^2}{R_W}A_W(T_W - T_0)$는 상수이다. $A = c_2\,a$ $B = c_2\,b$
D.1.2 (0.3점)	$y = \left(\frac{V_{INP}}{V_0}\right)^2 - 1$. 여기서 $V_0 = \sqrt{A}$는 바람이 없을 때의 입력 전위차이다.
D.1.3 (2.5점)	$c = 0.7 \pm 0.2$

	$\frac{b}{a} = 1.5 \pm 0.6$

f_M	V_{INPUT}	v	$ln\ v$	$ln((V/V_0)^2-1)$
25.70	1.785	2.244	0.808	0.546
22.40	1.740	1.956	0.671	0.464
20.80	1.737	1.816	0.597	0.459
19.70	1.710	1.720	0.542	0.407
15.83	1.615	1.382	0.324	0.209
13.30	1.560	1.161	0.149	0.079
9.76	1.464	0.852	-0.160	-0.181
7.65	1.390	0.668	-0.404	-0.426



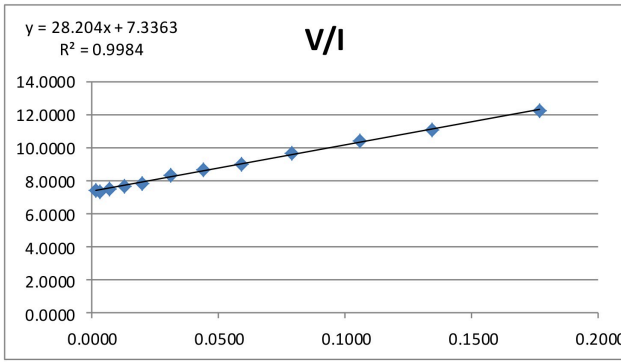
[D.2] 정전류 (3.5점)

먼저 k와 R_0를 구해야 한다.

D.2.1 (0.2점)	$k = \frac{aA_w}{\alpha}$
D.2.2 (1.2점)	$R_0 = (7.0 \pm 1.5)\ \Omega$

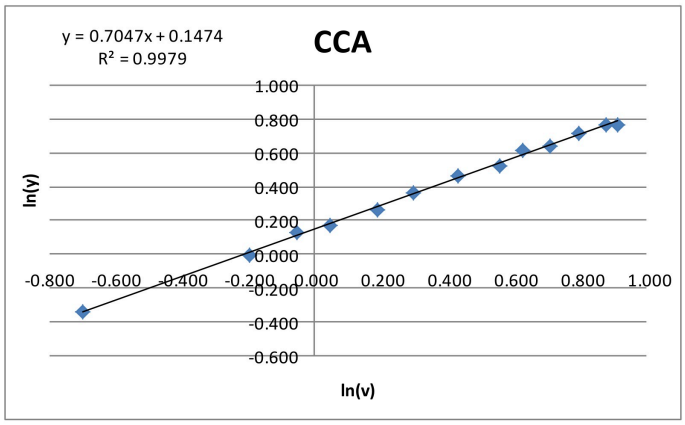
V_W	I_W	P_W	R_W
0.109	14.7	0.0016	7.4150
0.153	20.8	0.0032	7.3558
0.225	30.1	0.0068	7.4751
0.308	40.3	0.0124	7.6427

0.395	50.4	0.0199	7.8373
0.509	61.2	0.0312	8.3170
0.615	71.4	0.0439	8.6134
0.730	81.0	0.0591	9.0123
0.870	90.5	0.0787	9.6133
1.048	100.7	0.1055	10.4071
1.220	110.0	0.1342	11.0909
1.470	120.1	0.1765	12.2398



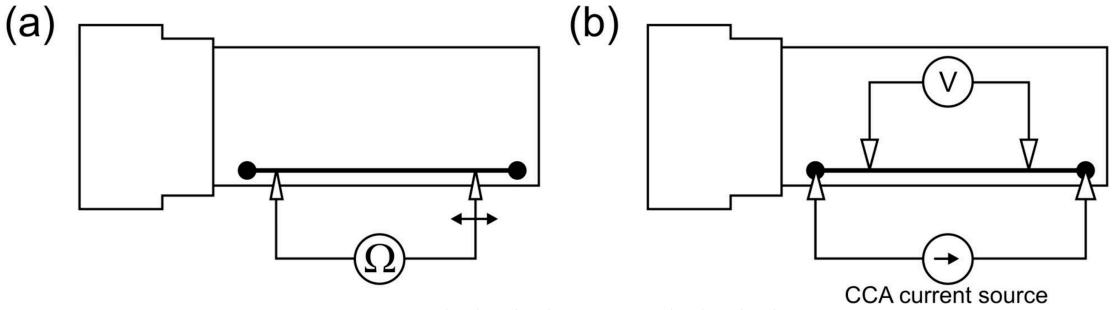
D.2.3 (0.2점)	$y = \dfrac{V_W I_W R_0}{k\left(\dfrac{V_W}{I_W} - R_0\right)} - 1$
D.2.4 (1.9점)	$\dfrac{b}{a} = 1.5 \pm 0.4$ $c = 0.77 \pm 0.07$

V_W	f	v	y	$ln(v)$	$ln(y)$
1.41		0.498	0.711	-0.698	-0.342
1.33		0.821	0.991	-0.198	-0.009
1.30		0.945	1.134	-0.056	0.125
1.29		1.048	1.187	0.047	0.172
1.27		1.206	1.306	0.188	0.267
1.25		1.344	1.443	0.295	0.367
1.23		1.542	1.586	0.433	0.461
1.22		1.746	1.684	0.557	0.521
1.20		1.873	1.855	0.627	0.618
1.20		2.032	1.899	0.709	0.642
1.19		2.211	2.056	0.794	0.721
1.18		2.406	2.148	0.878	0.765
1.18		2.492	2.162	0.913	0.771



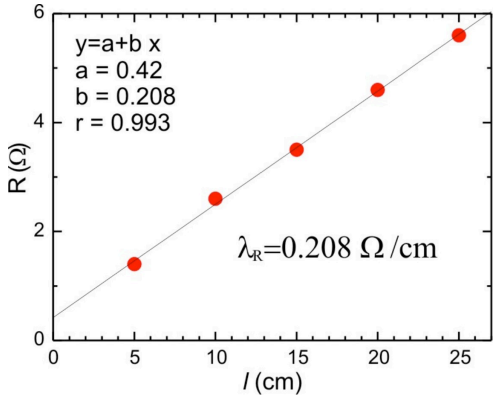
E. 풍력 터빈 (5.6점)

E.1 (0.4점)	DMM을 저항계 모드로 쓴다. 먼저 저항계 케이블을 단락시켜 도선 저항을 잰다. $R_{DMM,0} \sim 0.2\ \Omega$ 그다음 DMM으로 모터의 저항을 직접 여러 번 재어 그 최솟값을 찾고, 도선 저항 $R_{DMM,0}$을 뺀다. 결과: $R_M = (0.8 \pm 0.2)\Omega$
E.2 (1.2점)	접촉 저항이나 도선 저항을 없애려면 다음을 할 수 있다. (1) 여러 길이에서 2단자 저항 측정. (2) 전류원(CCA 상자 사용), 전류계, 전압계로 아래처럼 4단자 저항 측정. 결과: $\lambda_R = (0.21 \pm 0.02)\Omega/\mathrm{cm}$



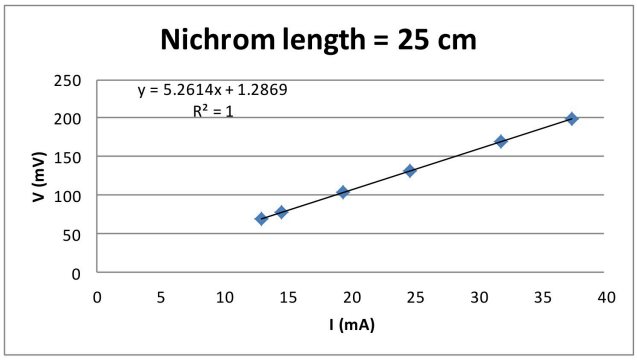
(a) 2단자 방법 (b) 4단자 방법

방법 1: 2단자 측정



방법 2: l = 250 mm에서 4단자 방법.

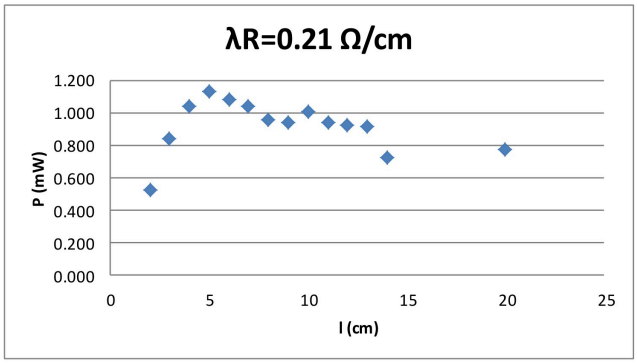
V (mV)	*I (mA)*
198.5	37.5
169.2	31.9
131.2	24.7
103.5	19.4
78.3	14.6
69.4	13



E.3 (2.4점)	니크롬 선의 길이를 바꾸며 출력 전력을 계산하면 $R_L = 1.0\Omega$에서 봉우리를 얻는다.

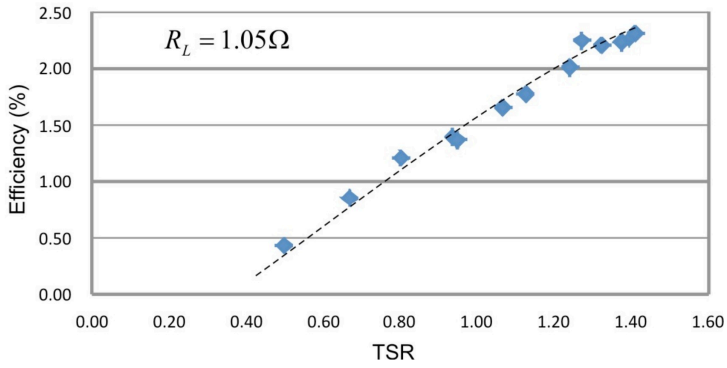
	만점 결과 / 채점 기준(여러 장치에서 표본 추출): $R_L = (1.0 \pm 0.4)\Omega$ $R_{L,theor} = R_M$

V (mV)	*l (cm)*	*R (ohm)*	*P (mW)*
14.8	2	0.42	0.522
23.0	3	0.63	0.840
29.5	4	0.84	1.036
34.5	5	1.05	1.134
36.9	6	1.26	1.081
39.0	7	1.47	1.035
40.1	8	1.68	0.957
42.1	9	1.89	0.938
45.9	10	2.10	1.003
46.5	11	2.31	0.936
48.2	12	2.52	0.922
49.9	13	2.73	0.912
46.0	14	2.94	0.720
57.0	20	4.20	0.774



E.4 (1.6점)	최적 부하로 $R_L = 1.05\ \Omega$, 즉 니크롬 선의 길이를 $l = 5$ cm로 둔다. 풍력 터빈 효율: $\eta_{WT} = \frac{P_T}{P_W} = \frac{V_T^2/R_L}{\frac{1}{2}\rho_A A_{WT} v^3}$ 여기서 $A_{WT} = \pi R^2$은 $R = 55$ mm인 풍력 터빈의 단면적이고, $v = c_1 f_M$ (식 4)이며 $c_1 = 0.0873$ m, f_M은 모터 발생기의 진동수이다. $TSR = \frac{2\pi f_T R}{c_1 f_M}$

f_M	f_T	V_T	TSR	P_T	P_W	η_{WT}
27.8	9.8	44.0	1.40	1.84	81.48	2.26
27.9	9.7	44.0	1.38	1.84	82.36	2.24
27.2	9.7	43.0	1.41	1.76	76.32	2.31
26.3	8.8	40.0	1.32	1.52	68.99	2.21
25.5	8.2	38.5	1.27	1.41	62.88	2.24
24.6	7.7	34.5	1.24	1.13	56.46	2.01
23.6	6.7	30.5	1.12	0.89	49.85	1.78
22.3	6.0	27.0	1.07	0.69	42.06	1.65
21.2	5.0	23.0	0.93	0.50	36.13	1.39
21.3	5.1	22.9	0.95	0.50	36.65	1.36
19.8	4.0	19.3	0.80	0.35	29.44	1.20
18.4	3.1	14.5	0.67	0.20	23.62	0.85
16.8	2.1	9.0	0.49	0.08	17.98	0.43



우리 터빈의 효율 범위는 <2.5%이며, 터빈이 빨리 돌수록(TSR이 클수록) 효율이 커지는 경향이 있다. 어느 지점에서는 이 효율이 떨어질 것이지만, 안타깝게도 이는 우리 바람 발생기 팬의 능력을 넘어선다.