풍력과 그 계측

I. 장치

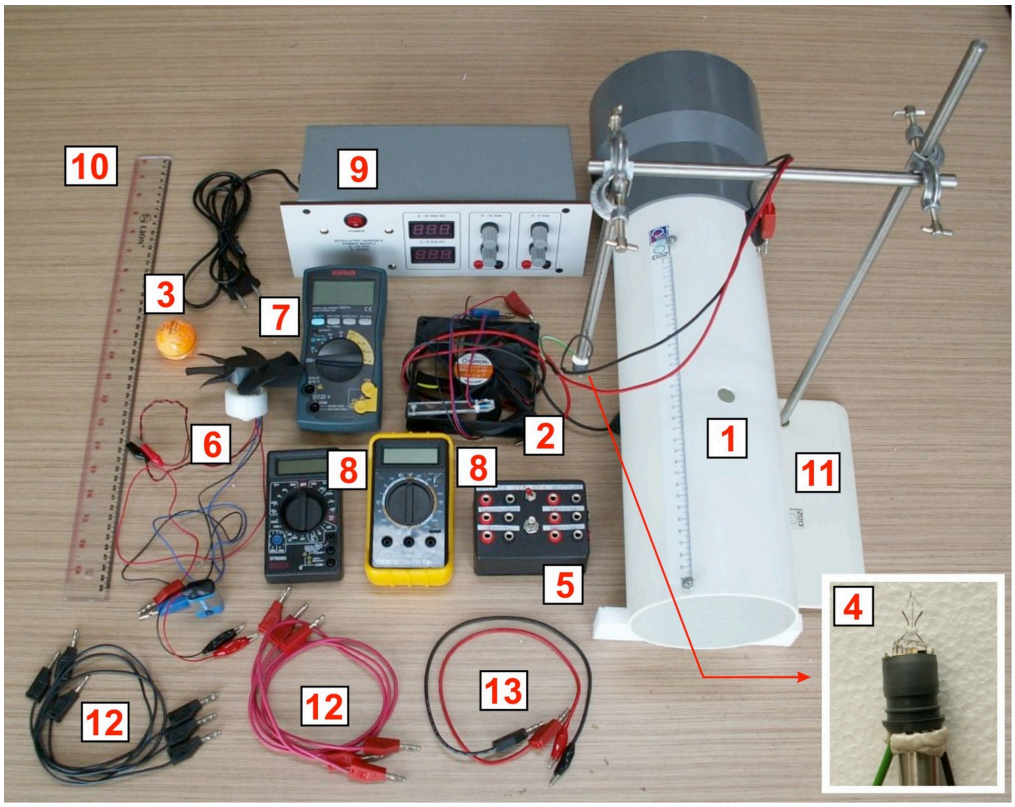


그림 1. 전체 장치

1. 니크롬(니켈-크로뮴) 선이 달린 풍동
2. 컴퓨터 팬: 진동수 센서 포함
3. 탁구공
4. 열선 필라멘트: **필라멘트를 건드리지 않도록 조심하십시오**
5. 열선용 전자 상자
6. 터빈: 진동수 센서 포함
7. 디지털 멀티미터(DMM) #1: 진동수 측정용
8. DMM #2와 #3
9. 전원 장치: 출력 조절 가능, 최대 15 V와 최대 9 V
10. 자(50 cm)
11. 스탠드
12. 양 끝에 바나나 잭이 달린 케이블(3쌍)
13. 한쪽 끝에 바나나 잭, 다른 끝에 악어 잭이 달린 케이블(1쌍)

상수와 자료:

중력 가속도	:	$g = 9.81$ m/s²
공기의 밀도	:	$\rho_A = 1.2$ kg/m³
탁구공의 지름	:	$d_B = (39.5 \pm 0.1)$ mm

오차 분석은 필요 없다

II. 서론

풍력은 빠르게 늘어나고 있는 재생 가능하고 깨끗한 에너지원으로, 늘어나는 인구에 전력을 공급하는 데 점점 더 중요해지고 있다. 풍력은 그림 2와 같은 풍력 터빈으로 쓸모 있는 전력으로 바꿀 수 있다.

풍력과 풍력 터빈의 물리 및 관련 계측을 탐구한다. 풍속을 재는 두 가지 방법, 즉 탁구공 풍속계와 열선 풍속계를 조사한다. 끝으로 풍력 터빈의 물리와 전력 변환 효율도 탐구한다. 한쪽 끝에 흡입 팬이 달려 층류(난류가 아닌) 바람을 만드는 풍동을 쓴다.[1]

이 실험은 다섯 부분으로 나뉜다.

A. 이론적 배경
B. 풍동
C. 탁구공 풍속계
D. 열선 풍속계:
   (1) 정온도법
   (2) 정전류법
E. 풍력 터빈



그림 2. 풍력 발전 단지의 풍력 터빈 배열

III. 실험과 문제

[A] 이론적 배경 [1.0점]

풍력과 풍력 터빈의 전력 변환 효율에 대한 기본적인 이론을 탐구한다.

[1] 반대로, 팬이 풍동 안으로 바람을 불어 넣는 풍동은 바람의 흐름이 더 난류적이다.

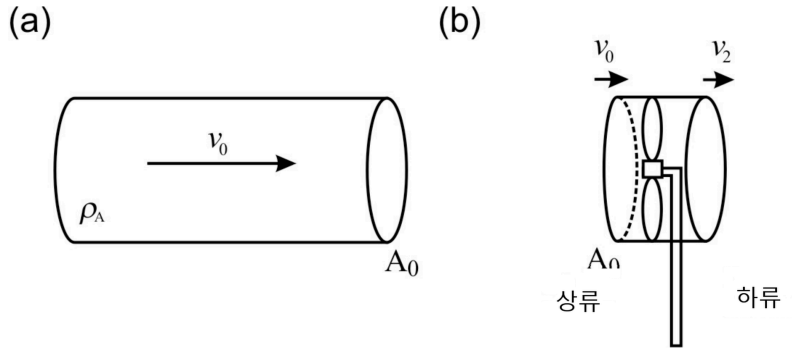


그림 3. (a) 관 모양의 바람 덩어리 (b) 바람의 흐름을 가로막는 풍력 터빈

[A.1] 밀도 ρ_A인 공기 덩어리가 그림 3(a)처럼 단면적 A_0인 관을 지나 흐른다고 하자. 바람이 가진 일률이 다음과 같음을 보이시오.

$$P_W = \frac{1}{2}\rho_A A_0 v_0^n \tag{1}$$

n의 값은 얼마인가? n은 파트 B.2에서 실험으로도 구할 것이다.

[0.4점]

[A.2] 이제 회전자 면적이 A_0인 풍력 터빈이 그림 3(b)처럼 같은 단면적을 가진 관 모양의 바람을 가로막는다고 하자. 회전자에서의 속력은 $(v_0 + v_2)/2$라고 볼 수 있다. 풍력 터빈이 뽑아낼 수 있는 최대 일률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_R = \tfrac{1}{4}\rho_A A_0 (v_0 + v_2)(v_0^2 - v_2^2) \tag{2}$$

하류의 바람은 인수 λ만큼 느려진다. 여기서 $\lambda = v_2/v_0$이다. 터빈이 최대 일률을 뽑아내려면 λ는 너무 작아서도 안 되고(바람의 흐름이 멈추므로) 너무 커서도 안 된다(터빈이 바람에서 일률을 아주 조금만 얻는다는 뜻이므로). 풍력 터빈의 일률을 최대로 만드는 λ의 최적값을 구하시오.

[0.4점]

[A.3] 회전자 효율(또는 일률 계수) C_P를, 풍력 터빈의 회전자가 뽑아낼 수 있는 일률 P_R를 이용 가능한 바람의 일률 P_W로 나눈 값으로 정의한다.

$$C_P = \frac{P_R}{P_W}. \tag{3}$$

문제 A.2의 답을 바탕으로 C_P의 최댓값을 구하시오. 이 값을 베츠 효율[2]이라고 하며, 풍력 터빈의 전력 변환 효율의 이론적 한계를 정한다.

[0.2점]

[B] 풍동 [3.2점]

[2] 1919년에 이 공식을 유도한 독일의 물리학자 알베르트 베츠.

컴퓨터 팬이 달린 풍동을 *바람 발생기*로 쓰는데, 팬이 풍동 밖으로 바람을 불어 내어(흡입식 풍동)[1] 더 층류에 가까운 바람의 흐름을 얻는다.

모터나 풍력 터빈의 회전 속력을 재는 것은 풍력 공학에서 중요하다. 아래와 같은 간단한 광전자 센서 회로로 모터의 회전 진동수를 잰다. 광센서는 적외선 발광부와 수광부 한 쌍으로 이루어져 있으며, 모터가 돌 때 날개에 붙은 반사 띠를 감지한다(그림 4).

지침과 경고:

(a) 그림 4처럼 광센서 회로를 연결하시오.
(b) **경고:** ***광센서용 배터리의 악어 잭은 꽤 약하니 조심하십시오.***
(c) **경고:** ***모터 진동수를 읽을 필요가 없으면 배터리가 닳지 않도록 연결을 끊으십시오.***
(d) **경고:** 전원 장치의 전압을 읽어야 하면 DMM(디지털 멀티미터)을 써서 유효 숫자를 더 많이 얻으십시오.
(e) **경고:** DMM을 전류계로 쓸 때에는 측정 범위의 한계에 주의하십시오. DMM 퓨즈를 끊어 먹으면 교체품은 하나만 지급됩니다.

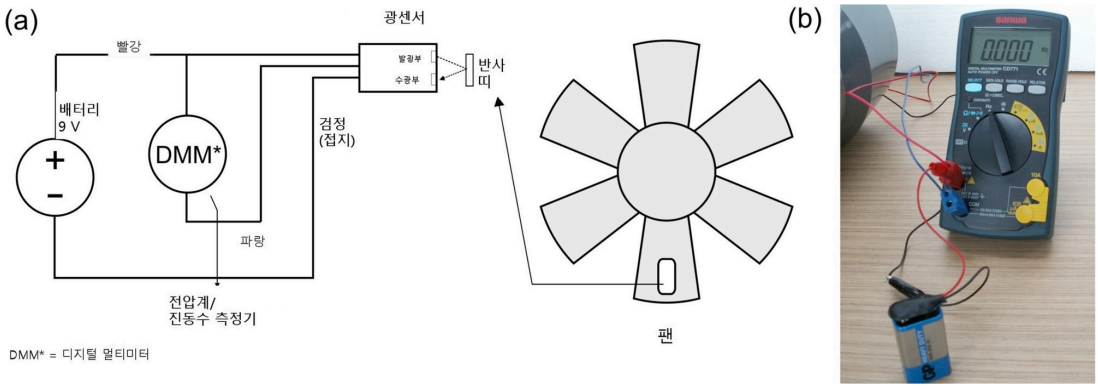


그림 4. 전압계 또는 진동수 측정기로 쓰는 DMM #1에 광센서 출력을 연결하는 방법.

[B.1] *모터에 전원을 넣지 않은 채로* DMM #1을 전압계 모드(DMM의 **V**)로 바꾸고 *팬을 손으로 천천히 돌리면* 전압이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 광센서 신호를 날개 회전(또는 시간)의 함수로 대략 그리시오. 신호의 주기를 표시하시오.

[0.8점]

풍동 속 풍속은 주로 바람 발생기 모터의 회전 진동수(f_M)로 정해진다. 풍속(풍동 가운데에서 잰 값)과 모터 진동수의 관계를 측정한 결과는 아래 그림 5와 같으며, 다음과 같은 간단한 선형 관계를 따른다.

$$v = 0.0873\,\text{meter} \times f_M \tag{4}$$

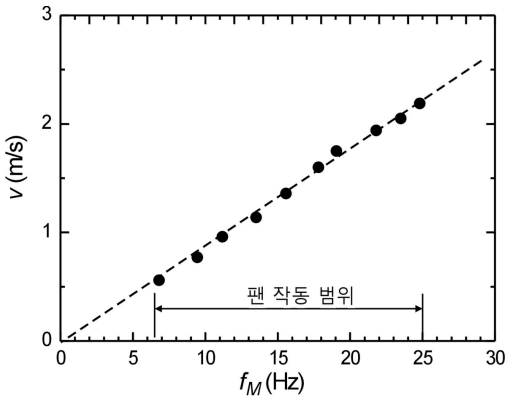


그림 5. 풍속(풍동 가운데에서) 대 모터 팬 회전 진동수.

[B.2] 모터 팬은 정격 전압 3 V < V_M < 12 V에서 꽤 일정한 기계 효율(만들어진 바람의 일률 P_W를 모터 팬에 넣은 전력 P_M으로 나눈 비)을 가진다. 이 기계 효율은 $\eta_M = P_W/P_M$으로 주어진다. 실험을 하여 기계 효율 η_M과 식 1의 바람의 일률 P_W에 대한 지수 n을 구하시오. 연결도를 그리시오.

[2.4점]

[C] 탁구공 풍속계 [3.5점]

풍속 측정은 풍력 공학의 기본적인 계측 활동이다. 그림 6처럼 탁구공 진자를 써서 풍속을 재는 아주 간단한 방법을 조사한다.

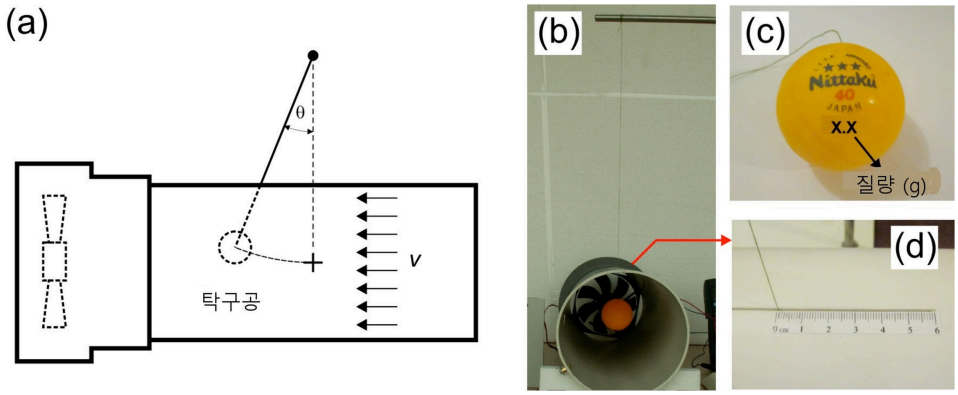


그림 6. 탁구공 풍속계 실험.

작동 원리는 아주 간단하다. 바람이 끌림힘을 주어 탁구공 진자를 각 θ만큼 기울인다. 이 끌림힘은 다음과 같다.

$$F_D = \tfrac{1}{2} C_D \rho_A A_B v^m, \tag{5}$$

여기서 C_D는 물체의 끌림 계수, ρ_A는 유체(공기)의 밀도, A_B는 탁구공의 단면적, v는 유체에 대한 공의 속도, m은 지수이다. 탁구공의 질량 m_B(그램 단위)는 그림 6(c)처럼 공에 적혀 있다. 다른 자료는 2쪽의 **상수와 자료**를 보라.

지침과 경고:

(a) 그림 6(d)처럼 진자 실을 눈금이 인쇄된 홈에 끼우시오. 탁구공을 풍동 가운데에 두시오. 인쇄된 눈금으로 기울어진 각 θ를 계산할 수 있습니다.
(b) **경고:** 실과 탁구공의 이음매는 약합니다. 살살 다루십시오.
(c) **경고:** 탁구공 진자가 자유롭게 움직이는지 확인하십시오.
(d) **경고:** 모터 진동수를 읽을 필요가 없으면 9 V 배터리가 닳지 않도록 연결을 끊으십시오.

[C.1] 풍속 v를 기울어진 각 θ의 함수로 나타내시오. 힘 그림을 그리시오. 답을 공기의 밀도(ρ_A)와 탁구공 질량(m_B) 등으로 나타내시오.

[0.7점]

[C.2] 실험을 하여 C_D와 m을 구하시오.

[2.8점]

[D] 열선 풍속계 [6.7점]

방금 살펴본 탁구공 풍속계는 보통 전기적 출력이 필요한 실제 응용에는 그다지 알맞지 않다. 그래서 풍속을 재는 다른 방법인 열선 풍속계(HWA)를 조사한다. HWA는 전류가 흐르면 뜨거워지는 필라멘트를 쓴다. 바람이 불면 강제 대류가 필라멘트에서 열을 빼앗아 가므로, (전력을 늘려 보상하지 않는 한) 그림 7처럼 필라멘트의 온도가(따라서 저항이) 떨어진다. 이 현상을 풍속 측정에 이용할 수 있다. 이 실험에서는 풍속에 따른 열선의 특성을 조사한다.

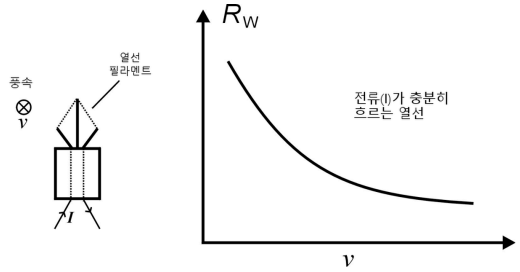


그림 7. 종이면 안쪽으로 바람이 부는 열선 풍속계

보통 전구의 금속(텅스텐) 필라멘트를 쓰는데, 필라멘트가 드러나도록 전구를 일부러 깨뜨린 것이다. 온도 변화가 작을 때 필라멘트의 저항은 다음 선형 관계를 따른다.

$$R_w = R_0[1 + \alpha(T_w - T_0)], \tag{6}$$

여기서 R_w는 온도 T_w에서 필라멘트의 저항, R_0는 온도 T_0에서의 저항, α는 저항의 온도 계수이다. 텅스텐의 값은 $\alpha = 4.5 \times 10^{-3}/^{\circ}\mathrm{C}$이다.

이제 필라멘트와 주위 사이의 열전달을 생각하자. 열전달은 자연 대류(바람/유체 운동의 외부 원인 없이), 강제 대류(외부 교란이 있을 때), 전도(주로 필라멘트의 받침과 밑동으로), 복사로 일어날 수 있다.

필라멘트가 전류 같은 외부 전력으로 가열되고, 위의 모든 과정으로 주위에 열을 전달하는 경우를 생각하자. 계가 평형에 이르면 전력 균형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{\text{input}} &= Q_{\text{강제 대류}} + Q_{\text{자연 대류}} + Q_{\text{전도}} + Q_{\text{복사}}, \\ V_W \cdot I_W &= h' A_W (T_W - T_0) + Q_{\text{nc}} + Q_{\text{conduction}} + A_W \sigma \varepsilon (T_W^4 - T_0^4) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 A_w는 필라멘트의 표면적, T_0는 실내/주위 온도(필라멘트의 원래 온도로 본다), σ는 슈테판-볼츠만 상수, ε은 방출률, h'은 강제 대류 열전달 계수이다.

열선 필라멘트의 강제 대류 과정은 킹의 법칙 $h' = a' + b\,v^c$로 나타낼 수 있다. 여기서 a'과 b는 상수이고 c는 풍속의 지수이다. 필라멘트의 길이가 너비보다 훨씬 크므로 전도에 의한 열전달은 무시할 수 있다. 온도 차가 작을 때($T_w \sim T_0$), $T_w^4 - T_0^4 \sim T_0^3(T_w - T_0)$이므로 복사 열전달은 $4A_W\sigma\varepsilon T_0^3(T_W - T_0) \to k(T_W - T_0)$로 쓸 수 있고 Q_{nc}는 일정하다고 볼 수 있다. 이 모두를 고려하면 식 (6)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V_W \cdot I_W = (a + bv^c) A_w (T_w - T_0), \tag{8}$$

단 $a = a' + Q_{\text{nc}}/(T_w - T_0) + 4A_W\sigma\varepsilon T_0^3$.

이제 두 가지 방법, 즉 온도를 일정하게 둔 열선과 일정한 전류를 흘리는 열선으로 b/a와 c의 값을 구하는 실험을 한다.

그림 8(a)처럼 열선 필라멘트를 강철 막대에 달고 구멍을 통해 풍동 안에 넣으시오(풍동은 돌려도 된다). 열선을 풍동에 넣을 때 방향이 올바른지 확인하시오. 그림 8(b)처럼 열선 필라멘트의 가장 넓은 단면이 바람의 흐름에 수직이어야 한다.
경고: 필라멘트를 건드리지 마십시오.

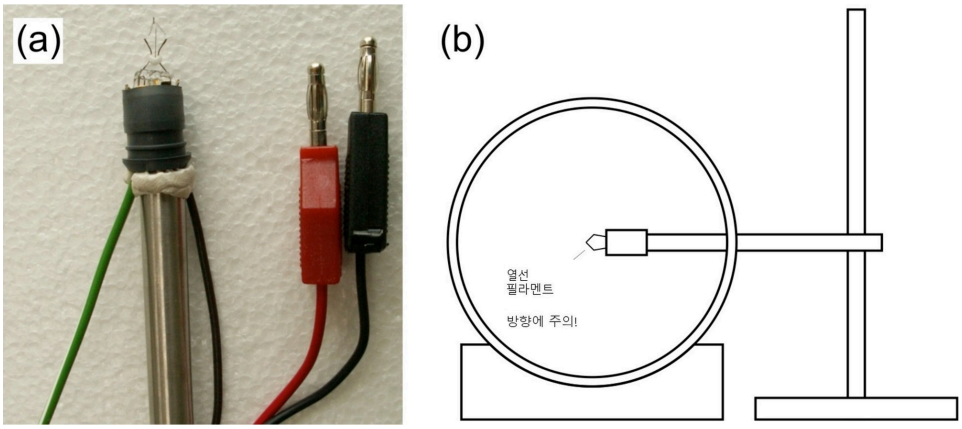


그림 8. (a) 열선 필라멘트 (b) 풍동 속 열선 필라멘트

두 실험에는 전자 회로가 필요한데, 이를 아래 그림 9의 전자 상자로 제공한다. 각 실험에는 회로의 한쪽만 필요하다. 상자 위의 작은 스위치로 둘 사이를 바꾸며, 스위치에는 CTA(정온도 풍속계)와 CCA(정전류 풍속계)라고 적혀 있다.

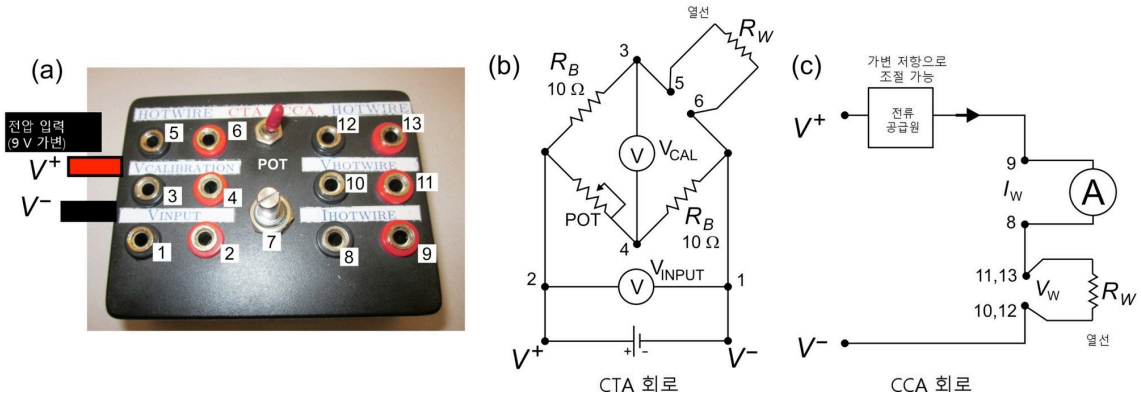


그림 9. (a) 열선 전자 상자 (b) 정온도 풍속계(CTA) 회로 (c) 정전류 풍속계(CCA) 회로.

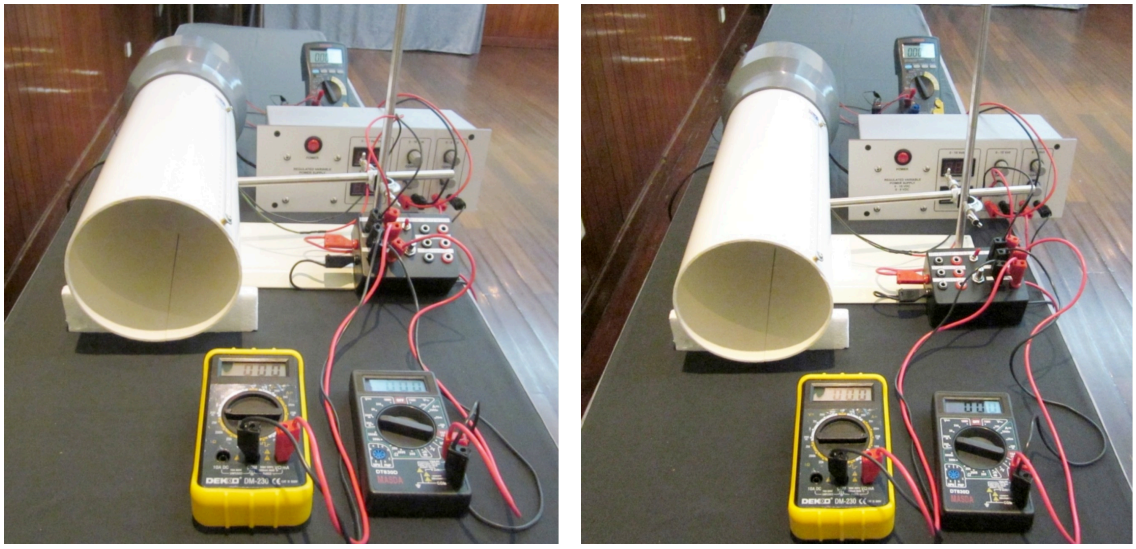


그림 10. (a) 왼쪽: 정온도 풍속계(CTA) 장치. (b) 오른쪽: 정전류 풍속계 (CCA) 장치.

[D.1] 정온도법 [3.2점]

정온도법은 풍속이 달라져도 열선의 온도(따라서 저항)를 일정하게 유지하는 방법이다. 이를 위해 그림 9(b)처럼 열선과 함께 가변(POT) 저항기가 들어 있는 휘트스톤 브리지로 브리지의 균형을 맞춘다.

먼저 전위차계(POT)를 조정하여 $V_{CALIBRATION}$을 0으로 맞춰 브리지의 균형을 잡는다. 풍속이 커지면 R_W가 줄어 브리지의 균형이 깨진다. R_W를 되돌려 브리지의 균형을 다시 잡으려면 V_W를 (V_{INPUT}을 높여서) 높여 소모 전력을 늘려야 한다.

정온도 실험에는 다음 공식을 쓴다.

$$\frac{V_W^2}{R_W} = (a + bv^c)A_w(T_w - T_0), \tag{9}$$

여기서 V_W와 R_W는 열선 양단의 전위차와 저항이다. 열선의 전위차는 재지 않고, 대신 휘트스톤 브리지 양단의 전위 강하(V_{INPUT})를 잰다. 이렇게 바꾸면 위 식 9는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V_{INPUT}^2 = A + Bv^c. \tag{10}$$

[D.1.1] A와 B의 식을 구하시오. [0.4점]

식 10은 선형 회귀에 쓸 수 있는 선형 꼴로 다시 쓸 수 있다.

$$\ln y = \ln \frac{b}{a} + c \ln v. \tag{11}$$

[D.1.2] y는 무엇인가?

[0.3점]

[D.1.3] 실험을 하여 b/a와 c를 구하시오!

[2.5점]

지침과 경고:

(a) 전자 상자를 정온도(CTA) 모드로 바꾸십시오.

(b) 그림 9(b)와 그림 10(a)에 따라 도선과 잭을 연결하십시오. 열선 전자 상자에는 전원 장치의 9 V 가변 전압원을 쓰십시오.

(c) **경고: 열선 필라멘트를 건드리지 않도록, 그리고 망가뜨리지 않도록 조심하십시오.** 열선을 망가뜨리면 **실험 전체에서 교체 열선은 1개만** 지급됩니다.

(d) 연결이 모두 올바른지 꼼꼼히 살피고, 전원 장치를 켜기 전에 전원 장치의 모든 손잡이가 끝까지(왼쪽으로) 내려가 있는지 확인하십시오.

(e) 전원 장치를 켜고 전자 상자의 전압을 약 1 V까지 천천히 높이십시오. 그 다음 V_{CALIB}가 0이 되도록 휘트스톤 브리지의 전위차계를 조정해야 합니다. 바람이 불기 전에 V_{CALIB}가 0이 되도록 전위차계를 조정하십시오. 이 상태를 브리지가 균형을 이루었다고 합니다.

(f) 한 번 균형을 잡으면 이후 측정에서는 전위차계로 저항을 바꿀 필요가 없습니다.

(g) **경고: 바람이 없을 때 2 V보다 높은 전압을 쓰지 마십시오. 열선이 망가질 수 있습니다.** 열선이 빛나면 망가진 것입니다. 기억하십시오: **실험 전체에서 교체 열선은 1개만 허용됩니다**.

(h) 풍속을 높이고 브리지가 다시 균형을 이루도록, 즉 열선 저항이 처음 값으로 돌아오도록 V_{INPUT}을 조정하십시오.

(i) 자료가 충분할 때까지 단계 (h)를 되풀이하십시오. 자료를 답안지에 기록하고 그래프를 그려 b/a와 c를 구하십시오.

(j) **경고: 열선의 전원을 끄기 전에 모터의 전원을 줄이지 마십시오**. 그러면 열선이 지나치게 뜨거워져 망가질 수 있습니다. 기억하십시오: **실험 전체에서 교체 열선은 1개만 허용됩니다**.

[D.2] 정전류법 [3.5점]

정전류 실험은 정전류원 역할을 하는 전자 상자로 열선에 흐르는 전류를 일정하게 유지하며 한다. 전류는 상자의 전위차계를 조정하여 바꿀 수 있다.

정전류 실험에는 다음 공식을 쓴다.

$$V_W \cdot I_W = (a + bv^c)\frac{A_w}{\alpha R_0}(R_w - R_0), \tag{12}$$

이는 식 8에 $T_w - T_0 = \dfrac{R_w - R_0}{\alpha R_0}$를 대입하여 얻는다.

이 실험에서는 먼저 바람이 없을 때(v=0) R_0를 재야 한다. 식 (12)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{V_W}{I_W} = \frac{R_0}{k}V_W \cdot I_W + R_0. \tag{13}$$

[D.2.1] k의 식을 구하시오.

[0.2점]

[D.2.2] 실험을 하여 R_0의 값을 구하시오.

[1.2점]

지침과 경고:

(a) 전자 상자를 정전류(CCA) 모드로 바꾸십시오.
(b) 그림 9(c)와 그림 10(b)에 따라 도선과 잭을 연결하십시오. **연결이 올바른지 꼼꼼히 살피고** 전원 장치를 켜기 전에 전원 장치의 모든 손잡이가 끝까지(왼쪽으로) 내려가 있는지 확인하십시오.
(c) **경고: 180 mA보다 큰 전류를 쓰지 마십시오. 열선이 망가질 수 있습니다.** 열선이 빛나면 망가진 것입니다. 기억하십시오: **교체 열선은 1개만 허용됩니다**.
(d) 전원 장치를 켜고 열선의 전압이나 전류를 천천히 높이십시오.
(e) 상자의 전위차계를 조정하여 열선 전류를 제한할 수 있다는 점에 주의하십시오(즉 전원 장치의 전압을 높여도 열선의 전류와 전압이 커지지 않습니다). 전자 상자의 작동 전압이 안정되도록 전원 장치의 전압을 7.5 V로 맞추기를 권합니다.
(f) 전류를 재는 DMM이 제대로 작동하는지, 즉 읽은 값이 0이 아닌지 확인하십시오. DMM의 전류 측정 회로는 퓨즈로 보호됩니다. 퓨즈가 끊어지면 DMM이 작동하는 것처럼 보여도 전류 측정값은 늘 0입니다.
(g) 열선의 전류와 전압을 기록하십시오.
(h) 자료가 충분할 때까지 단계 (g)를 되풀이하십시오. 자료를 답안지에 기록하고 그래프를 그려 k와 R_0를 구하십시오.

이제 정온도의 경우처럼 b/a와 c를 구할 준비가 되었다. 식 12를 다음 꼴로 다시 쓰시오.

$$\ln y = \ln \frac{b}{a} + c \ln v. \tag{14}$$

[D.2.3] 이 경우 y는 무엇인가?

[0.2점]

[D.2.4] 실험을 하여 b/a와 c를 구하시오.

[1.9점]

지침과 경고:

(a) 전원 장치를 켜기 전에 모든 손잡이가 끝까지(왼쪽으로) 내려가 있는지 확인하십시오. 전원 장치를 켜고 열선의 전압/전류를 천천히 높이십시오.
(b) 원하는 작동 전류가 되도록 전위차계를 조정하십시오.
경고: 180 mA보다 큰 전류를 쓰지 마십시오. 열선이 망가질 수 있습니다. 열선이 빛나면 망가진 것입니다. 기억하십시오: **교체 열선은 1개만 허용됩니다**.
(c) 모터 바람 발생기의 전압을 높여 바람을 만드십시오.
(d) 이 풍속에서 열선의 전류와 전압을 기록하십시오.
(e) 풍속을 다시 맞추고 자료가 충분할 때까지 단계 (d)를 되풀이하십시오.
(f) 자료를 답안지에 기록하고 그래프를 그려 b/a와 c를 구하십시오.

[E] 풍력 터빈 [5.6점]

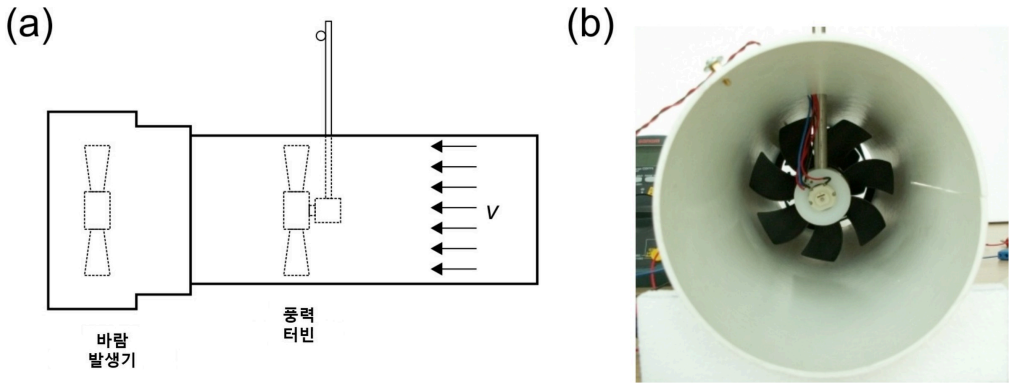


그림 11. 풍력 터빈 실험 장치

풍력 터빈의 물리를 탐구하고 그 전력 변환 효율을 조사한다. 이 실험에서는 회전자의 역학적 일률을 전력으로 바꾸는 풍력 터빈으로 간단한 직류 모터를 쓴다.

풍력 터빈의 효율을 정하는 한 요인은 외부 부하이다. 이 실험에서는 저항성 니켈-크로뮴(니크롬) 선으로 작은 저항 부하($< 2\ \Omega$)를 흉내 내어, 풍력 터빈의 효율을 최대로 만드는 부하를 조사한다. 이 부하는 선의 길이를 바꿔 바꿀 수 있다. 악어 클립으로 선에 접촉하시오.

풍력 터빈 효율에 영향을 주는 핵심 매개변수 하나는 날개 끝 속력비(TSR)로, 다음과 같이 정의한다.

$$TSR = \frac{\Omega R}{v}, \tag{15}$$

여기서 Ω는 날개의 각속력, R는 날개가 쓸고 지나가는 면적의 반지름, v는 날개 끝에서 회전자에 불어오는 풍속이다. 풍속은 풍동 단면에서 고르다고 가정한다.

모터 터빈은 아래와 같은 등가 내부 회로를 가진다. 모터가 돌면 회전하는 코일이 기전력(emf)을 낸다. 모터 안 회전자 코일 저항의 합인 실효 직렬 저항 R_M이 있다. R_M*은 작지만 무시할 수 없다(< 2 Ω).* 따라서 실제 모터는 아래처럼 이상적인 모터(코일에 저항이 없는)에 직렬 저항 R_M을 더한 것으로 모형화할 수 있다.

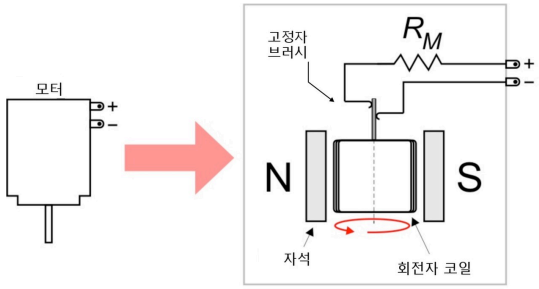


그림 12. 모터(풍력 터빈)의 등가 회로

[E.1] 모터 터빈의 내부 직렬 저항 R_M을 구하시오. 직류 모터의 회전자와 고정자 브러시 사이의 미끄럼 접촉(그림 12 참조)이 터빈 날개의 위치에 따라 변하는 추가 저항을 더할 수 있다는 점에 주의하시오.

[0.4점]

[E.2] 니크롬 선의 단위 길이당 저항 λ_R(Ω/m 단위)를 구하시오. 니크롬 선의 저항 범위는 작아서(< 7 Ω) 디지털 멀티미터(DMM) 케이블의 저항과 비슷하다는 점에 주의하시오.

[1.2점]

정전류원이 필요하면 열선 전자 상자를 정전류 풍속계(CCA) 모드로 쓸 수 있다. 전류계가 필요하면 DMM #2나 #3을 쓰고, 정격을 넘거나 퓨즈를 끊어 먹지 않도록 조심하십시오.

지침:

(a) 터빈을 풍동 안에 놓으시오. 먼저 터빈의 바나나 잭과 악어 잭을 풍동 안쪽에서 풍동 위의 작은 구멍으로 빼내십시오. 그다음 (열선에 썼던) 강철 막대를 구멍에 끼우고 그 끝에 터빈을 다십시오. 그림 11을 보십시오.

(b) 이 실험에서는 두 진동수, 즉 (풍속을 얻기 위한) 바람 발생기 진동수와 풍력 터빈 진동수를 재야 합니다. 그림 13(a)처럼 연결을 합치면 됩니다. 검은 악어 클립으로 바람 발생기와 풍력 터빈 읽기를 바꿀 수 있습니다.

(c) 악어 클립으로 니크롬 선을 모터 터빈의 부하로 연결하십시오. 그림 13(b)처럼 전압계를 니크롬 선 양 끝에 연결하기만 하면 선 구간의 전압을 *따로* 잴 수 있습니다.

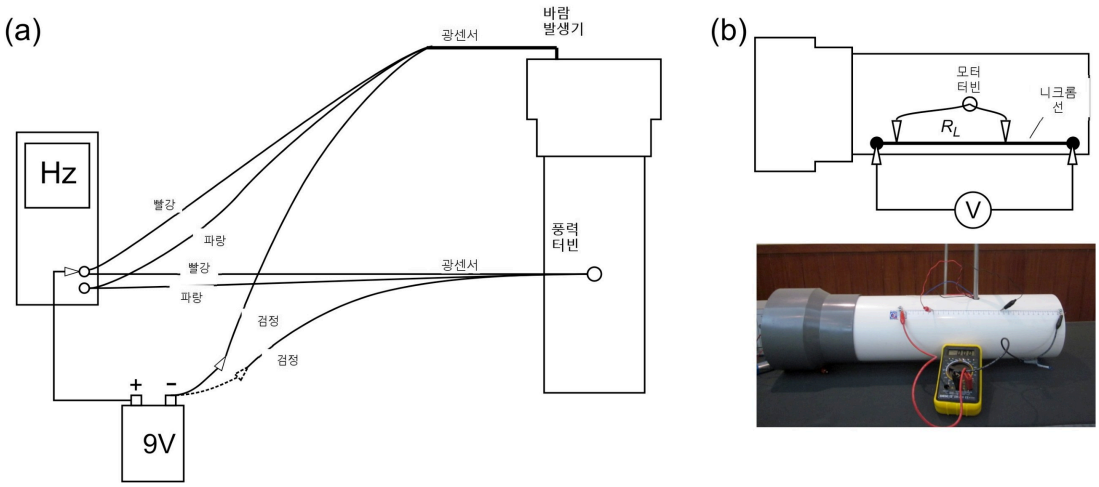


그림 13(a) 두 진동수를 읽는 연결. (b) 니크롬 선을 부하로 연결하는 방법. 전압계는 니크롬 선의 양 끝에 연결한다는 점에 주의하라.

[E.3] 최대 전력 전달을 위한 최적 부하 R_L를 구하는 실험을 하시오. R_L에 전달된 전력을 R_L 또는 니크롬 길이 l에 대해 그리시오. 이론적으로 R_L는 어떻게 될 것으로 기대하는가?

[2.4점]

풍력 터빈 효율 η_{WT}는 부하 R_L에 전달된 전력을 이용 가능한 바람의 일률 P_W로 나눈 비로 정의한다.

[E.4] E.3에서 실험으로 구한 최적 부하 R_L를 써서 η_{WT}를 TSR에 대해 그리시오.

[1.6점]