

바람을 거슬러 가는 모형풍력차의 제작 및 효율 계산

현 광 호* · 현 남 규

*한국과학영재학교, 제주대학교 자연과학대학 물리학과

요 약

바람의 방향에 거슬러 직진할 수 있는 프로펠러와 터빈을 회전자로 하는 모형풍력차 2종류를 제작하여 그 효율을 계산하였다. 낮은 풍속 대에서 운행하는 모형풍력차인 경우 프로펠러를 회전자로 사용하는 것이 터빈을 사용하는 것보다 효율이 높았다. 하지만, 6m/s 이상의 높은 풍속 대에서는 터빈을 사용하는 모형풍력차가 프로펠러 사용하는 모형풍력차보다 효율이 높았다.

1. 서론

환경오염이 심각해진 요즘 대체에너지를 어떻게 이용하느냐 하는 문제는 에너지 관점에서 보면 매우 중요시 되는 문제이다. 여러 가지의 대체에너지 중에서도 풍력에너지는 바람의 방향과 세기 등의 조건이 자주 바뀐다는 점에서 그 활용이 간단하지 않다고 볼 수 있겠다. 이 논문에서는 바람의 방향에 거슬러 가는 모형풍력차와 터빈을 각각 두 종류씩 제작하고 그것에 대한 효율을 구하여 서로 비교하자 한다.

우선 바람이 회전자(rotor)에 미치는 힘에 관한 이론적인 고찰을 생략한 대신에, 랭킨-프루드 발전기 디스크 이론을 소개한 다음 제작하려는 모형풍력차 시스템의 효율을 계산하는 공식을 유도하고자 한다. 그리고 모형풍력차에 대한 구체적인 실험 설계를 하기 전에, 바람이 불어오는 방향으로 직진하는 풍력차가 가능한지를 확인하기 위한 모형풍력차의 제작과 기초실험 내용을 먼저 소개하고, 풍차(회전자:rotor)의 선정과 풍동의 원리 및 모형풍력차의 제작과 실험 방법 및 효율 계산 등을 순차적으로 기술하려 한다.

2. 이론적 배경

2.1 랭킨-프루드(RANKINE-FROUDE) 발전기 디스크 이론

바람에 의해서 회전하는 풍차의 역학을 이해하기 위해서, 간단한 일차원 모델을 가정해서 시작해보자. 터빈 대신에 발전기 원판을 사용할 것이다. 발전기 원판에 의하여 바람의 압력이 감소하게 된다.

랭킨과 프루드가 전개한 발전기 디스크 이론[1]은 다음과 같은 가설을 기초로 하고 있다.

첫째, 일정하고 고른 바람이 분다.

둘째, 위쪽이나 아래쪽 바람 흐름 어느 곳이라도 그 흐름에 방해물이 없어야 된다.

셋째, 디스크에 일정한 흐름 속도가 주어진다.

넷째, 디스크를 통한 바람의 흐름은 잘 정의되었으며 흐름 튜브 외의 나머지 흐름과 분리된다.

다섯째, 바람의 흐름은 압축이 되지 말아야 한다.

여섯째, 디스크에 의해서 생성된 흐름은 회전하

면 안 된다.

위의 세 번째 가설 즉 디스크가 그 평면 전체에 대하여 바람 속도를 똑 같이 느리게 해야 한다는 것은 디스크 평면 전체에 가해지는 미는 힘이 균일하다는 가정과 같다.

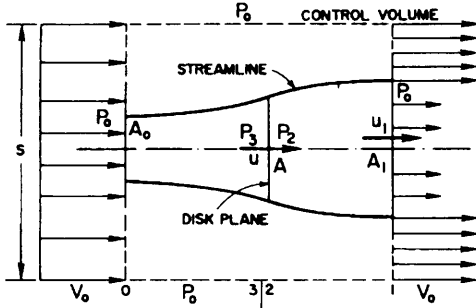


그림 1. 공기 흐름도

그림 1의 단면도에서 왼쪽에 보여주는 영역 S로 표시된 원통 내부의 단면 0, 3, 2와 1를 각각 주목해 보자. 주위 공기 압력은 P_0 이고 단면 0의 왼쪽에서 오른쪽으로 속도 V_0 인 바람이 회전자(rotor)인 디스크에 접근한다. 디스크가 에너지를 뽑아내기 때문에 속도가 줄어들어서 디스크 뒤쪽인 오른쪽의 흐름선이 팽창 된다. 회전자의 속도 감소를 야기시키는 양을 v 라 했을 때, 디스크에서의 바람의 속도는 $V_0 - v = u$ 가 된다. 한편, 단면 2에서부터 시작하여 오른쪽으로 흘러서 단면 1에 도달하는 바람은 속도가 u_1 까지 느려지나, 압력은 P_0 로 된다. A 를 회전자인 디스크의 면적, ρ 를 공기 밀도라고 하자. 이때, 흐름은 유체의 운동량 손실은 회전자가 흐름에 대항해서 돌아가는 미는 힘 T 가 야기시킨 결과이다.

흐름 튜브 안에 질량의 연속성이 있으려면 $V_0 A_0 = u A = u_1 A_1$ 이 되어야 한다. 연속방정식을 고려하면, 단면 0과 1사이의 흐름 튜브 밖에서

이 흐름에 더해지는 순수 흐름이 있어야 한다는 것을 알 수 있다. 이 순수 흐름인 ΔQ 는 이 튜브 바깥에서 이 흐름에 합류하며, 다음 식으로 나타내어진다.

$$\Delta Q = V_0[(S - A_0) - (S - A_1)] = V_0(A_1 - A_0) \quad (1)$$

주어진 원통에 대하여 운동량 정리를 적용하면, 다음 식을 얻는다.

$$\rho V_0^2 S - T = \rho V_0^2 (S - A_1) + \rho u_1^2 A_1 + \rho \Delta Q V_0 \quad (2)$$

(1) 식의 ΔQ 와 $V_0 A_0 = u_1 A_1$ 을 (2) 식에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$T = \rho A_1 u_1 (V_0 - u_1) \quad (3)$$

베르누이 정리를 0과 3 단면에 적용하고, 다시 2와 1사이의 단면에 이것을 다시 적용하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho V_0^2 + P_0 &= \frac{1}{2} \rho u^2 + P_3 \\ \frac{1}{2} \rho u^2 + P_2 &= \frac{1}{2} \rho u_1^2 + P_0 \end{aligned} \quad (4)$$

이때 회전자(rotor)를 미는 힘은

$$T = A (P_3 - P_2) \quad (5)$$

이 된다. (5) 식에서 압력차에 대한 식을 풀면 다음 식이 성립한다.

$$T = \rho A (V_0^2 - u_1^2) / 2 \quad (6)$$

(3) 식과 (6) 식을 같게 두고 $Au = A_1 u_1$ 을 사용하면 다음 식을 얻는다.

$$u = (V_0 + u_1) / 2 \quad (7)$$

따라서 원판에서의 속도는 흐름 튜브 내 원판

의 왼쪽 시작점과 오른쪽 끝점 사이의 속도들의 평균이다. 축 방향의 간섭에 관한 상수 a 를 다음식과 같이 정의 하면

$$a = v/V_0, \quad (8)$$

다음 식을 얻는다.

$$u = V_0(1 - a) \quad (9)$$

또한

$$u_1 = V_0(1 - 2a) \quad (10)$$

이다. $a = 0$ 에 대해서는 $u_1 = V_0$ 이어서 들어 온 바람이 그대로 빠져나가므로 풍력을 얻을 수 없고, $a = 0.5$ 인 경우에는 $u_1 = 0$ 이어서 바람이 뒤로 빠져나가지 않으므로 풍력을 얻을 수 없다. 따라서 단위 시간 동안에 회전자에 의해서 옮겨진 에너지는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2}\rho V_0^2 Au - \frac{1}{2}\rho u_1^2 Au \\ &= \frac{1}{2}\rho Au (V_0^2 - u_1^2) \quad (11) \\ &= \frac{1}{2}\rho Au (V_0 + u_1)(V_0 - u_1) \end{aligned}$$

(9) 식의 u , (10) 식의 u_1 을 위식에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$P = \frac{1}{2}\rho A V_0^3 4a(1 - a)^2 \quad (12)$$

힘의 계수를 $C_p = P/(\frac{1}{2}\rho A V_0^3)$ 이라 정의하면 다음 식이 성립한다.

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (13)$$

$a = 1/3$ 일 때에 C_p 가 최대값을 갖는다는 것이 알려졌다으므로 다음 식들이 성립한다.

$$\begin{aligned} C_{Pmax} &= \frac{16}{27} = 0.593 \\ u &= \frac{2}{3} V_0 \\ u_1 &= \frac{1}{3} V_0 \end{aligned} \quad (14)$$

바람의 운동량을 흡수하여 회전력을 전기에너지로 변환시키는 것이 풍력발전 시스템인데, 풍력 터빈이 바람으로부터 많은 운동에너지를 얻으면 얻을수록, 터빈의 오른쪽 면을 떠나는 바람의 운동량은 줄어들어 속도는 더 느려지게 된다. 만일 바람으로부터 모든 에너지를 추출한다면 공기는 "0"의 속도를 가지게 되는데 이는 공기가 터빈을 떠날 수 없다는 것을 의미하며, 당연히 다른 공기도 터빈의 회전 날개를 향해 들어올 수 없다. 다른 극단적인 경우에, 바람이 아무런 방해도 받지 않고 터빈(원반)을 지나간다면, 이것은 바람으로부터 아무런 에너지도 뽑아내지 못했다는 것을 의미하게 된다. 그러므로 이 두 극단적인 경우 사이에 바람의 동역학적 에너지를 유용한 기계적인 에너지로 바꿀 수 있는 효율적인 방법이 있다고 가정할 수 있다. 이상적인 풍력 터빈은 바람의 속도를 원래 속도의 2/3 로 감속시키고 바람이 가지고 있는 운동에너지의 16/27(또는 59%) 만을 기계적인 에너지로 바꿀 수 있음이 이 이론에서 증명된 것이다.

2.2 에너지 차에 의한 효율 계산

풍력 자동차의 효율 계산에 필요한 에너지는 풍력에너지와 자동차의 에너지이다. 이 두 에너지 모두 운동에너지 공식을 사용하여 구했다. 자동차를 지나는 풍력 에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_w = \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{1}{2} (\rho V_0) V_0^3 = \frac{1}{2} \rho V_0^3 [J/s] \quad (15)$$

$$W_w = (\frac{1}{2} \rho V_0^3) A t = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho t V_0^3 [J] \quad (16)$$

한편, 자동차의 에너지는 운동에너지 공식을 사용하여 구할 수 있으므로,

$$W_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (17)$$

풍력에너지를 동력원으로 하는 자동차 전체의

효율을 구하기 위해서는 차체 내부의 동력 전달 방식도 중요하다. 풍력차의 터빈의 효율, 동력 전달 효율 등을 알면 차 내부 각각의 효율은 구할 수 있으나, 풍력차 전체의 효율을 아는데 필요한 값들은 아니다. 다음 식에서 풍력차의 효율은 풍력에너지와 자동차의 운동에너지 값만 갖고 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$\eta = \frac{W_p}{W_w} \times \frac{W_g}{W_p} \times \frac{W_c}{W_g} = \frac{2Mx^2}{t^2} = \frac{4Mx^2}{\pi R^2 \rho t^3 V_0^3} \quad (18)$$

3. 실험

3.1 실험 장치

바람이 부는 방향을 마주보고 곧장 나아가는 모형풍력차를 만들기 위해서는 우선 풍차의 종류를 잘 선정해야 한다. 그림 2에서 볼 수 있

는 것과 같이 수평형 풍차는 수직형 풍차에 비해 회전수도 많으며 바람 부는 방향에 영향을 받는다. 그러나 수직형 풍차는 회전수도 수평형 풍차에 비해 상대적으로 적으며 바람 방향의 영향도 받지 않는다. 따라서 바람 부는 방향을 향해서 직진할 수 있는 모형풍력차의 제작을 위해서는 수평형 풍차를 선택하는 것이 바람직하다.

3.1.1 풍차의 종류

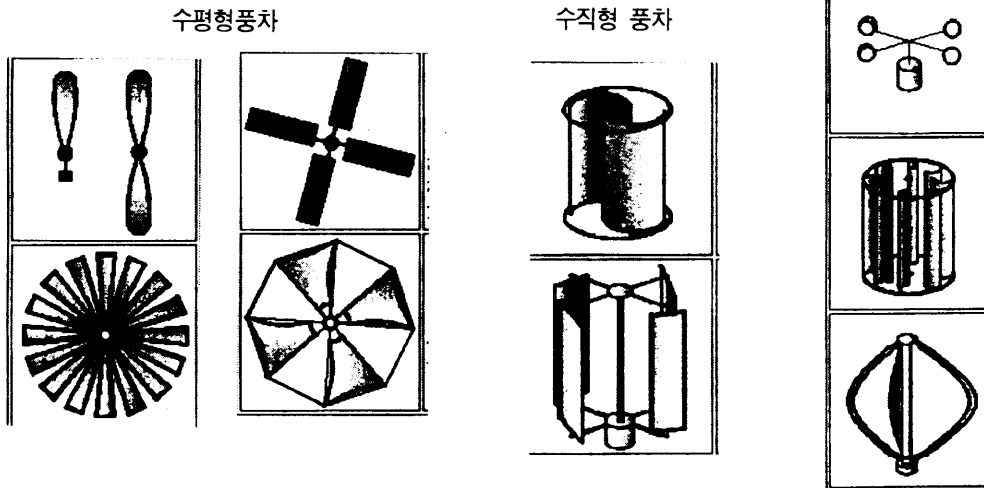


그림 2 수평형 풍차는 수직형 풍차에 비해 회전수는 많으나 바람 부는 방향에 영향을 받는다. 그러나 수직형 풍차는 바람 부는 방향의 영향을 받지 않는다[2].

3.1.2. 토출식 풍동(Open Type Wind Tunnel)

풍동은 기계, 항공, 우주, 조선, 건축, 토목 등 유체에 관련된 기초 실험에서는 꼭 필요한 장비이다. 풍동의 주요 부분은 각종 측정을 실시하는 시험부, 바람을 불어 넣어주기 위한 송풍기, 시험부에 균일한 공기 흐름을 만들어 주기 위한 정체실과 수축부(또는 노즐), 제어계통으로 구성된다. 또 풍동은 형태에 따라 순환형(Close type), 토출형(Open type), 흡입형 풍동(Suction type)이 있다.

그런데 바람이 부는 방향으로 직진할 수 있는 모형풍력차의 성능과 효율을 시험하기 위한 목적으로는 직선형이며 저속인 토출형 풍동을 사용하는 것이 적합하다.



그림 3. 이 토출식 풍동은 송풍기에서 송압된 바람을 몸체를 통해서 대기에 균일한 유속 분포를 얻는 형식으로 간단하며, 저속용이고 시험부가 사각이다.

3.2 모형풍력차의 제작

풍력 에너지를 기계에너지로 전환시키는 것이 모형풍력차를 만들 때 고려해야할 주요 개념이다. 그런데 모형풍력차를 만들기 위해서는 몇 가지 사항들을 고려해야 한다.

우선 맞바람 힘을 사용하는 것이다. 모형풍

력차의 차체에 돛을 단다. 형태는 요트와 비슷하다. 그리고 차체에 바퀴도 있어야 한다. 이렇게 하면 바람이 뒤쪽에서 불 때, 모형풍력차는 최고로 효율이 좋을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 차가 맞바람을 맞으며 직진할 때는 이 테크닉은 먹히지 않는다. 차가 맞바람을 타고 가려면 z 모양처럼 움직여야 한다. 혹 z자로 가지 않더라도 돛에 가해지는 알짜 힘이 뒤쪽으로 작용하기 때문에, 돛 혹은 차체가 앞으로 가는데 필요한 가속도는 얻을 수가 없다. 따라서 이런 방식은 효율성에서는 그리 좋은 편이 아니다.

둘째로는 풍력 터빈을 사용하는 것이다. 이 테크닉의 장점은 차가 바람 속으로 직진해 들어갈 수 있다는 것이다. 만약에 바람이 차로 불어오면 터빈이 돌게 되고 그래서 바퀴가 돌게 되는 것이다. 공기 저항이 동력보다 더 작기 때문에 차는 바람 쪽으로 움직이게 된다.

셋째로 모형풍력차 전후의 압력차를 이용할 수 있다. 전방의 공기압이 후방의 공기압보다 더 낮으면 차는 전방으로 움직일 것이다. 하지만 이 방법은 공기속도가 충분히 빠를 때만 가능하다. 실제적으로 이 방법은 쉽게 이용되지 않는다.

따라서 바람이 부는 방향으로 직진할 수 있는 모형풍력차를 만들기 위해서는 둘째 방식을 택해야 한다. 그런데 모형풍력차가 바람 부는 방향으로 직진해 나가야 하고 또 그 효율도 계산해야 하며, 실험하는 기간 중에 모형풍력차를 향하여 일정한 바람을 계속 불어 넣어줘야 하므로, 야외에서 실험하기는 힘들고 풍동을 사용하여 실험해야 한다.

3.2.1 프로펠러 모형풍력차 : A형

프로펠러 모형풍력차는 0.967Kg의 차체에 기

어비 1:10 을 가진 자동차이다. 이때의 기어비란 모형풍력차 바퀴가 1회전 하기위해서 프로펠러가 10회전해야 한다는 의미이다. 풍속은 3.5m/s에서 6.01 m/s 까지 단계적으로 변화를 주며 차속을 잴다. 그 결과 차속은 풍속이 4.11m/s일때 가장 높게 나왔다.



그림 4. 프로펠러 모형풍력차 : A형

이 모형풍력차의 동작 원리를 살펴보자. 바람이 앞에서 불 면 프로펠러는 돌아간다. 그러면 프로펠러에 연결된 중심축도 자동적으로 돈다. 이 축에 고정된 톱니바퀴에 물려 있는 체인은 네 개의 바퀴가 연결되어 있는 모형풍력차 아래쪽 평면의 중심부에 있는 톱니바퀴를 돌게 하므로, 이 체인은 밑에 있는 축에 풍력 에너지를 전달한다. 이 톱니바퀴가 돌면, 이것과 연결된 평면의 전방에 있는 기어는 풍력 에너지를 다시 앞바퀴에 전달하게 된다. 그런데 앞에서 부는 바람은 프로펠러를 돌릴 뿐만 아니라, 프로펠러가 달린 모형풍력차 전체를 뒤로 미는 힘도 동시에 작용하므로, 프로펠러에 연결된 톱니바퀴와 아래에 장치된 그것을 같은 크기의 것으로 사용했을 때에는 이 모형풍력차는 앞으로 나가지 못하고 뒤로 밀렸다. 그것은 앞으로 나가게 하는 모형풍력차의 추진력이 뒤로 가게 하는 바람의 합력보다 작았기 때문

이다. 그러나 아래의 톱니바퀴를 위의 것보다 큰 것으로 바꾸었더니 모형풍력차는 바람 부는 방향으로 천천히 나아갔다. 이는 프로펠러가 받는 공기의 저항에 비해 추진력이 컸기 때문이다.

$$\frac{1}{2} \rho A V_0^2 < \frac{I\alpha}{R} < \mu mg \quad (19)$$

3.2.2 터빈 모형풍력차 : B형

터빈 모형풍력차 B형의 무게는 1.472Kg이다. 기어비는 1:4와 1:8로 변화를 주며 실험을 하였다. 이 모형풍력차는 A형 모형풍력차의 차체에 기어비와 터빈을 바꿔서 만든 차이다. 차체 앞부분을 보면 차체에 의한 저항이 최소화 되도록 알루미늄 판으로 차체를 덮은 것을 볼 수 있다. 터빈과 기어들은 체인으로 연결되어 동력이 먼 거리를 전달되는 동안 손실 되는 것을 최소한으로 줄였다. 바람을 불기 시작했을 때 처음부터 프로펠러 모형풍력차와 같이 쉽게 가지는 않았다. 하지만 1Kg이 넘는 차체가 있어 바퀴에 충분한 수직항력을 제공할 수 있었기 때문에 터빈의 효율이 낮더라도 바람을 향해 전진 할 수 있었다.

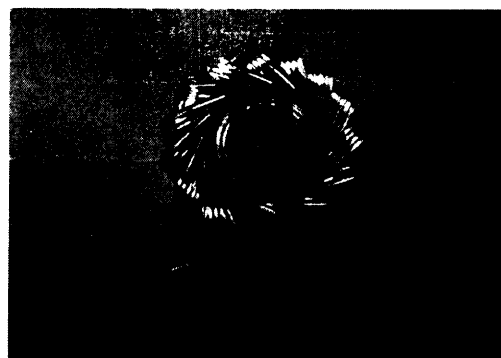


그림 5. 터빈 모형풍력차 : B형

3.2.3 터빈 모형풍력차 : C형



그림 6. 터빈 모형풍력차 : C형

터빈 모형풍력차 C형의 무게는 1.459Kg이다. 기어비는 각각 1:14.5 와 1:27로 변화를 주어 실험을 하였다. 이번에는 터빈을 수직축으로

세웠다. 차체는 그 전과 같은 것을 사용하지 않고 새로 제작했다. 그림 6에서와 같이 터빈을 차체 뒤쪽에 놓았다. 때문에 무게중심이 뒷바퀴와 가까운 쪽에 위치하게 되었다. 이 차는 B형 모형풍력차와 마찬가지로 저속의 풍속에서 쉽게 가지 않았다. 그러다가 풍속을 7m/s 이상으로 올리자 차가 움직였는데, 차체가 낮았기 때문에 터빈 쪽에 가해지는 풍력에 의해 차체가 뒤쪽으로 기울어지는 현상이 발생하였다. 그래서 앞쪽에 무게를 갖는 상자를 설치해 빠른 풍속에서도 차체가 안정적으로 유지될 수 있도록 제작하였다. 덕분에 10m/s 이상의 풍속에서도 차는 바람을 향해 전진할 수 있었다. 최대차속은 기어비가 1:14.5이고 풍속이 12.5m/s 일 때 나왔다. 이러한 A, B, C형의 모형풍력차에 대한 상세한 자료들을 표1에 제시하였다.

표 1. 여러 가지 모형풍력차들에 대한 기본 자료. 여기서 기어비는 모형풍력차 바퀴의 회전수와 프로펠러(또는 터빈)의 회전수의 비이다.

	A형	B형	C형
회전자 형	프로펠러	터빈	터빈
회전자 단면적에 대한 지름 = R(cm), 장반경 = a(cm), 단반경 = b(cm)	R = 17	a = 12.8, b = 7	a = 12.8, b = 7
무게 (Kg)	0.967	1.472	1.459
기어비	1:10	B1형 = 1:4 B2형 = 1:8	C1형 = 1:14.5, C2형 = 1:27

4. 실험 결과 및 효율계산

실제 실험에서 사용된 모형풍력차의 회전자는 프로펠러와 터빈 두 종류이다. 실험은 제주대학교 기계공학과에 설치된 토출식 풍동을 사용하여 했다. 풍속은 휴대용 풍속측정기를 사

용하여 측정하였으며, 바람을 향하여 풍력차가 풍동속에서 70cm 거리를 달린 시간을 컴퓨터 프로그램을 사용하여 측정하였다. 즉, 풍동 시험부의 바닥에 10cm간격으로 7개의 금을 그은 35cm*100cm*1cm(가로*세로*높이)의 규격의 고무판을 깔고, 모형풍력차가 그 금을 통과할 때

마다 시간을 측정하였으며, 차가 70cm 경과 후에는 실험을 중단시켰다. 같은 풍속하에서 동일한 유형의 실험을 5회 반복하였으며 이로부터 평균차속을 구했다. 그리고 모형풍력차의 효율을 구하기 위해 필요한 변수들은 차체와 터빈의 규격, 공기의 밀도, 풍속과 바람을 거스르는 차의 속력등이다. 여기서 공기의 밀도는 실험실에서 사용하고 있던 값인 1.293 Kg/m^3 을 사용하였다.

표2에서는 프로펠러 모형풍력차(A형)의 풍속에 따른 평균 차속에 관한 데이터를 보여 준다. 무게 0.967Kg, 프로펠러 지름 34cm인 모형풍력차가 풍동 시험부 바닥에 그어진 금을 통

과할 때마다 시간을 측정하여 평균차속을 구했다. 표 3와 4에는 터빈 모형풍력차(C형)의 베벨기어와 바퀴에 연결된 기어의 톱니수의 비가 1:2, 1:1 일 때 풍속에 대한 평균차속에 관한 데이터가 각각에 나타나 있다. 즉 무게 1.459Kg, 터빈 지름이 25.5cm인 수직형 모형풍력차가 이 고무판 위에 그어진 금들을 통과할 때마다 시간을 측정하여 평균 차속을 구했다. 수평형 터빈 모형풍력차(B형)에 대한 표는 생략하였는데, 뒤에 그린 그림7을 참조하면 이 값들을 알 수 있기 때문이다. 표5에는 (18)식에 의하여 계산한 모형풍력차의 효율들이 나타나 있다. 풍속에 따른 평균차속과 효율들을 그림 7 에 함께 나타냈다.

표 2 무게 0.967Kg, 프로펠러 지름 34cm인 프로펠레 모형풍력차(A형)의 풍속에 따른 평균차속.

풍속(m/s)	3.5	4.11	4.54	5.05	5.51	5.71	6.01
차속 (m/s)	실험1	0.0504	0.0760	0.0699	0.0717	0.0553	0.0244
	실험2	0.0560	0.0741	0.0681	0.0676	0.0459	0.0271
	실험3	0.0604	0.0717	0.0679	0.0595	0.0517	0.0265
	실험4	0.0586	0.0641	0.0682	0.0561	0.0399	0.0331
	실험5	0.0593	0.0623	0.0673	0.0566	0.0426	0.0219
평균차속(m/s)	0.0569	0.0698	0.0683	0.0623	0.0471	0.0266	0.0126

표 3 무게 1.459Kg, 터빈 지름이 25.5cm인 터빈 모형풍력차(C1형)의 풍속에 대한 평균차속. 이 모형풍력차의 베벨기어와 바퀴에 각각 연결된 기어의 톱니수의 비는 1:2이다.

풍속(m/s)	7.1	7.8	8.4	8.75	9.2	9.5	9.9
차속 (m/s)	실험1	0.0163	0.0266	0.0277	0.0274	0.0313	0.0328
	실험2	0.0184	0.0244	0.0269	0.0276	0.0336	0.0358
	실험3	0.0182	0.0255	0.0272	0.0274	0.0301	0.0386
	실험4	0.0170	0.0257	0.0245	0.0257	0.0312	0.0366
	실험5	0.0188	0.0221	0.0253	0.0273	0.0299	0.0361
평균차속(m/s)	0.01778	0.0244	0.0263	0.0271	0.0312	0.0360	0.0401
풍속(m/s)	10.4	11	11.7	12.3	12.85	13.45	13.6
차속 (m/s)	실험1	0.0462	0.0482	0.0492	0.0549	0.0560	0.0482
	실험2	0.0427	0.0473	0.0515	0.0548	0.0515	0.0500
	실험3	0.0435	0.0480	0.0523	0.0535	0.0549	0.0512
	실험4	0.0431	0.0481	0.0519	0.0524	0.0504	0.0488
	실험5	0.0432	0.0488	0.0520	0.0511	0.0500	0.0523
평균차속(m/s)	0.0437	0.0481	0.0514	0.0534	0.0526	0.0501	0.0508

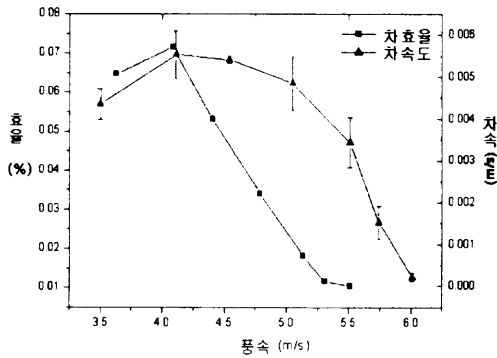
표 4 표 4 무게 1.459Kg, 터빈 지름이 25.5cm인 터빈 모형풍력차(C2 형)의 풍속에 대한 평균차속. 모형풍력차의 베벨기어와 바퀴에 각각 연결된 기어의 톱니수의 비는 1:1이다.

풍속(m/s)		6.5	6.75	7.1	7.8	8.4	8.75
차속 (m/s)	실험1	0.0192	0.0172	0.0208	0.0219	0.0233	0.0219
	실험2	0.0191	0.017	0.0206	0.021	0.0229	0.0226
	실험3	0.0168	0.0179	0.0206	0.0213	0.0226	0.0221
	실험4	0.0172	0.0179	0.021	0.0211	0.0224	0.0219
	실험5	0.0170	0.0180	0.021	0.0207	0.0228	0.0219
평균차속(m/s)		0.0178	0.0177	0.0210	0.0213	0.0228	0.0221
풍속(m/s)		9.2	9.5	9.9	10.4	11	11.7
차속 (m/s)	실험1	0.0242	0.0249	0.0274	0.0250	0.0322	0.0306
	실험2	0.0242	0.0252	0.0272	0.0273	0.0303	0.0305
	실험3	0.0235	0.0257	0.0268	0.0294	0.0297	0.0304
	실험4	0.0231	0.0257	0.0265	0.0287	0.0303	0.0313
	실험5	0.0233	0.0253	0.0269	0.0294	0.0314	0.0306
평균차속(m/s)		0.0237	0.0254	0.0270	0.0280	0.0308	0.0307

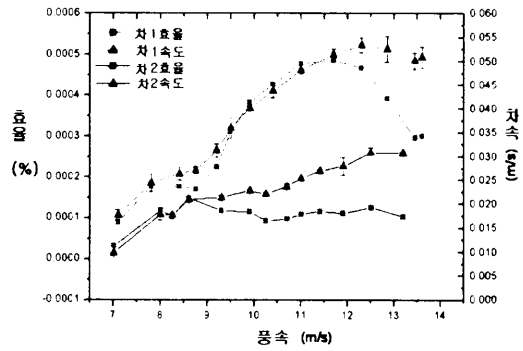
표 5 여러 가지 모형풍력차의 효율

풍속(m/s)	모형풍력차의 효율 (%)				
	프로펠러:A	터빈: B1	터빈: B2	터빈:C1	터빈:C2
3.5	0.00507				
4.11	0.00573				
4.54	0.004				
5.05	0.00221				
5.51	7.36E-04				
5.74	1.18E-04				
6.01	1.09E-05				
6.5	0.00E+00		1.97E-04	1.19E-04	
6.75	0.00E+00		8.08E-04	1.04E-04	
7.1		6.19E-04	1.56E-04	1.49E-04	8.98E-05
7.8		6.29E-04	2.05E-04	1.18E-04	1.76E-04
8.4		9.93E-04	3.22E-04	1.15E-04	1.77E-04
8.75		0.00145	3.91E-04	9.26E-05	1.70E-04
9.2		0.00203	4.00E-04	9.77E-05	2.24E-04
9.5		0.0028	4.44E-04	1.09E-04	3.12E-04
9.9		0.00288	3.57E-04	1.16E-04	3.82E-04
10.4		0.00337	2.54E-04	1.12E-04	4.27E-04
11		0.00231	1.08E-04	1.26E-04	4.79E-04
11.7		0.00129	3.87E-05	1.04E-04	4.86E-04
12.3		0.00145		0.00E+00	4.68E-04
12.85					3.93E-04
13.45					2.96E-04
13.6					3.00E-04

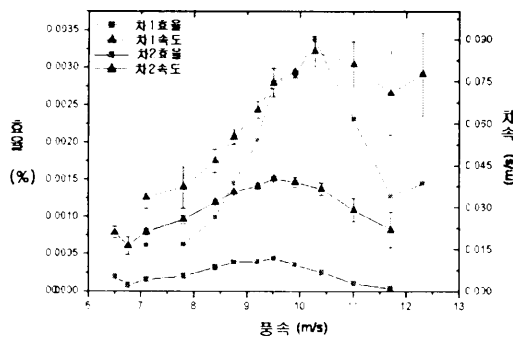
프로펠러풍력차 : A형



터빈풍력차 : C형



터빈풍력차 : B형



풍력차의 효율 : A, B, C형

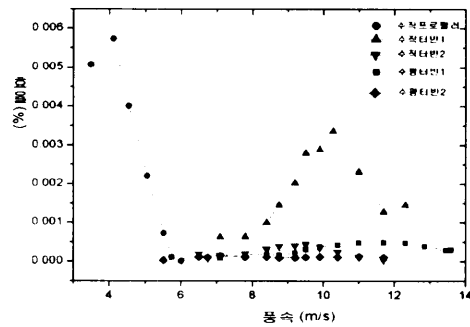


그림 7. 풍력차의 속도 및 효율

표 2.3.4 및 5와 그림 7에 나타난 수치들과 도표에서 알 수 있듯이, 모형풍력차 각각의 속도와 효율을 보면, 프로펠러 모형풍력차(A형)와 터빈 모형풍력차(B형)는 최고 속력과 최고 효율이 같은 풍속 값에서 나왔다. 즉, A형 모형풍력차는 약 4.11m/s에서, B형 모형풍력차는 기어비가 1:4인 것(B1형)은 10.4m/s에서, 기어비가 1:8인 것(B2형)은 9.5m/s에서 최대 효율과 최대 속도가 나왔다. 반면에 C형 모형풍력차인 경우, 최고속도와 최고효율은 일치하지 않았다. 기어비가 1:14.5인 것(C1형)은 풍속이 12.3m/s일때 최대속도를 보였으나 풍속이 11.0m/s일때 최대 효율을 보였다. 기어비가

1:27인 것(C2형)은 풍속이 높아질수록 속도가 높아졌으나 풍속이 11.7m/s일때 최대효율을 보였다.

각각의 모형풍력차는 특정한 풍속에서 효율이 좋았다. 프로펠러 모형풍력차는 최대효율이 풍속 4.11m/s일 때 나왔다. 하지만 풍속이 6.01m/s 보다 높을 때에는 앞으로 나아가지 않았다. 터빈 모형풍력차 B, C형은 풍속이 높을 때에도 작동하였다. B1, B2형은 각각 풍속 10.4m/s 와 9.5m/s에서 최대효율이 나왔고, C1, C2 형은 각각 풍속11.0m/s, 11.7m/s에서 최대효율이 나왔다. 터빈 모형풍력차들도 풍속이 14m/s보다 클 경우에는 앞으로 나가지 않았다.

이와 같이 저속에서는 프로펠러 모형풍력차

의 효율이 높고, 고속에서는 터빈을 단 모형 풍력차의 효율이 높았다. 그리고 터빈 모형 풍력차의 경우에는 기어비가 높을수록 높은 풍속대에서 그 효율이 높은 것은 아님을 알 수 있다.

5. 결론

이 논문에서는 바람의 방향에 거슬러 가는 프로펠러 및 터빈 모형 풍력차를 제작하였고(터빈 모형 풍력차의 경우는 각각 2종류씩 제작함), 그것에 대한 효율을 각각 계산하여 비교하였다.

낮은 풍속대에서 운행하는 모형 풍력차인 경우 회전자로 프로펠러를 사용하는 것이 효율이 높았다. 하지만 6m/s 이상의 높은 풍속대에서는 터빈을 사용하는 모형 풍력차가 효율이 더 높았다. 기어비를 바꿔가며 실험한 결과 기어비와 효율은 일정한 관계를 보여주지 못했다. 따라서 높은 풍속에서는 변속기능을 가진 차체에

터빈형의 회전자를 달면 고효율의 모형 풍력차를 만들 수 있을 것이다. 직접 제작한 모형 풍력차로 실험한 결과, 효율의 절대치는 0.01% 미만으로 매우 낮게 나왔다. 하지만 회전자를 개량하고 차체의 효율을 좀 더 높인다면 바람을 마주보는 방향일 지라도 풍력 에너지를 충분히 활용 할 수 있을 것이다.

이와 같이 바람을 거슬러 가는 경우에도 풍력 에너지를 효과적으로 이용할 수 있다면 앞으로 풍력 에너지를 더 많은 곳에 활용 할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] D. M. Eggleston, and F S. Stoddard, *Wind Turbine Engineering Design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987, pp.20-23.
- [2] <http://www.rmkoebou.mce.uec.ac.jp/contents/Report/windcar/column-1.htm>