

# 수평면 회전식 풍력발전기에 대한 유체역학적 검토

이상무\* · 김성근\*\*

\*동양대학교 기계설계학과 · \*\*제주대학교 해양연구소

## A Discussion on the Fluid Dynamics of the Horizontally Rotating Power Generator

SANG-MOO LEE\* and SEOUNG-GUN KIM\*\*

\*Dep't of Mechanical Engineering, DongYang University, Kyungbuk 750-711, Korea

\*\*Marine Engineering Lab. Cheju University, Cheju 690-756, Korea

**KEY WORDS:** wind power 풍력, horizontal rotating rotor 수평회전식 로터, quasi-static analysis 준정적 해석, power efficiency 출력 효율

**ABSTRACT:** This paper discusses the horizontally rotating wind power generator. Quasi static analysis are applied to performance. Translational velocity, which varies on the distance from the rotation center, is assumed constant to apply dynamic lift and drag coefficients. The analysis shows that the horizontally rotating wind power generator is effective in speed. In high rotation, the reverse torque reduces the total effective torque. It is recommended to give efforts to reduce torque for the acceptable performance of the horizontally rotating type generator.

### 1. 서 론

풍력발전은 대체에너지로서 쉽게 생각할 수 있는 방법이었다. 그로 인하여 현재 실용적으로 쓰이는데까지 발전되었고, 국내에서도 일부 시험적으로 설치 가동되고 있다. 그러나 풍력발전에 쓰이는 방식은 바람에 의해 프로펠러 단면에 유기되는 양력을 토오크로 얻고 프로펠러의 회전 운동에 의해 동력을 얻는 것이다. 이런 방법은 유체역학적으로 우수한 성능을 나타내는 것으로 나타나지만, 풍향에 따라 프로펠러의 회전면을 바꾸어주어야하고, 아울러 풍속에 따라 날개 피치각을 바꾸어 주어야 하는 두가지 운동부위가 수반되어야 한다. 이는 발전기의 유지관리 문제가 중요한 항목으로 대두되게 하는 요소이며, 또 이 발전방식의 단점으로 작용하는 요소이다.

본 연구에서 시도되는 방법은 프로펠러 회전처럼 바람방향의 수직면에 회전하는 것과는 달리, 돛단배에 작용하는 힘을 좀더 확장하여 수평으로 회전하도록 회전력을 유도하고 이를 이용하여 발전을 시도하는 방법이다. 이 방법은 두 개의 반원통을 수직 회전축을 중심으로 회전대칭으로 배치한다. 바람을 받는 반원통은 큰 항력을 받고 움직이며, 다른 반원통은 바람의 반대방향으로 적은 항력을 받고 움직여 그 차이에서 생기는 회전토크가 발전기의 수평회전을 일으키고, 그 회전에 의해 발전한다. 이는 기존의 수직면 회전 방식이 양력을 이용하는 것과는 달리 유체역학적으로 항력을 이용하는 발전방식에 가깝다. 수평회전식이므로 풍향에 관계없고, 구조형식이 단순하다. 이 수평회전식은 한 회전에 토오크의 변화가 급격하다는

단점이 있었으나, 회전 반원통의 바깥에 무거운 축을 설치함으로써 플라이휠의 역할을 도입하였고, 발전기에서는 평활화된 토오크가 가해지도록 보완되었다. 또 아직 유체역학적으로 분석이 보고되지 않으나, 바람의 방향에 역으로 움직이는 반원통의 전두부에 난류를 활성화시키는 방안이 마련되어 역토크를 줄이는 방안이 시도되고 있다. 이 수평회전식 발전방식은 몰타이브에서 개발되고 있는 것으로 국내에 도입할 가능성을 검토하고 있으나, 이에 대한 이론적 실험적 분석이 뒷받침되지 못하였다. 본 논문은 이 수평회전식 풍력발전 방식에 대한 유체역학적 특성을 분석하고 이의 가능성을 제시한다.

해석은 일정한 속도로 바람이 들어오고 발전장치의 날개는 일정한 회전수로 회전할 때, 준 정적 상태에서 바람 방향과 임의의 각도를 갖는 반원통 단면의 양력과 항력을 추정하고 이로부터 회전토크를 계산하였다. 회전토크는 반원통이 바람과 이루는 각도에 따라 다르므로, 10도 간격으로 토오크를 계산하고, 이를 한 회전에 대하여 평균함으로써 평균토크를 얻었다. 평균토크와 회전수로부터 동력을 얻어, 회전수에 따른 최대 동력을 제시하였다.

### 2. 준 정적 해석

반원통 단면이 회전할 때, 단면상의 임의점에서 선속도는 회전축에서 떨어진 거리에 따라 다르다. 준 정적 해석에서는 그 달라지는 속도를 반영하지 않고, 대표점에서 속도를 취하여 날개의 선속으로 삼고, 여기에 바람이 입사하고 날개의 선속과 바

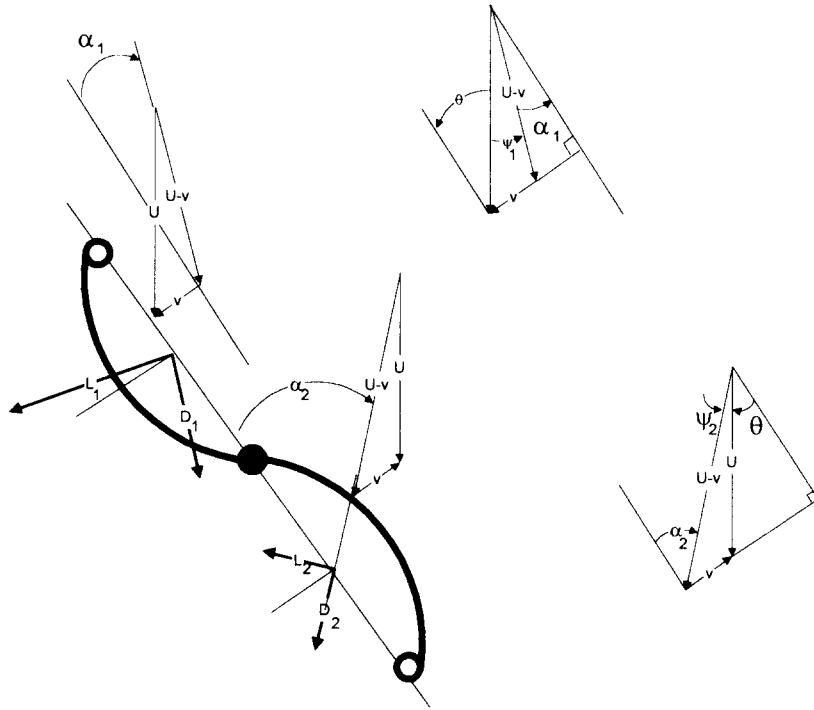


Fig. 1 Wind forces and definition of the parameters

람 속도가 상대속도를 이루어 반원통 단면에 들어오는 것으로 한다. 반원통 단면에 양력과 항력이 발생하고 이것이 토오크로 바뀐다. 바람방향은 일정하고 회전에 의한 선속은 항상 바뀌고 있으므로 유체유동은 정상상태가 아니라 정상상태 가정하고 준정적 상태로 해석한다. 또한 점대칭을 배치된 두 반원통 주위의 유동은 서로 영향을 주고받음이 없다고 본다.

날개가 풍속이 U인 바람의 방향과 평행하게 썼을 때를 영도로 해서 바람에 밀리는 쪽으로 각도를 정의하고, 날개의 반경을 R, 회전각속도를 w, 그리고 공기의 밀도와 점성을 각각  $\rho$  와  $\mu$ 라 하자. 날개 각도가 180도 이하일 경우와 180이상 360사이 에 놓여있을 경우에 대하여 그림 1과 같이 날개의 받음각을 정의한다.

그림에서 삼각형에 사인 법칙을 적용하면,

$$\frac{U}{\sin \Psi_1} = \frac{|U-v|}{\sin(90-\theta)}$$

그리고 코사인 법칙에 의해,

$$|U-v| = \sqrt{U^2 + v^2 - 2Uv \cos(90-\theta)}$$

따라서 받음각은

$$\Psi_1 = \sin^{-1} \left( \frac{v}{|U-v|} \sin(90-\theta) \right)$$

$$\alpha_1 = \theta - \Psi_1$$

와 같이 유도된다. 이때 이 반원통에 대한 토오크 기여분은

$$\tau_1(\theta) = a (L_1 \cos \alpha_1 + D_1 \sin \alpha_1)$$

이다. 여기에 양력  $L_1$  과 항력  $D_1$  은

$$L_1 = C_{L1}(\theta) \frac{1}{2} \rho S |U-v|^2$$

$$D_1 = C_{D1}(\theta) \frac{1}{2} \rho S |U-v|^2$$

이고, a는 유효 토오크 암이고, S는 단면적으로 반폭과 높이의 곱이다.

반원통이 바람에 따라 움직일 경우에 양력과 항력이 동력을 발생하는 토오크로 얻어진다. 이 식에 의하면, 회전에 의한 선속  $v = R\omega$  는 회전이 빠를수록 커지게 됨으로, 상대속도는 줄어들어서 양력과 항력이 떨어지게 된다. 이는 수평회전식이 고회전에서 토오크가 떨어지게 된다는 것을 의미한다.

유사한 방법으로 날개면이 바람에 거스리는 방향으로 움직이는 부분에 대한 토오크를 계산할 수 있으며, 이때

$$|U-v| = \sqrt{U^2 + v^2 - 2Uv \cos(90+\theta)}$$

$$\frac{v}{\sin \Psi_2} = \frac{|U-v|}{\sin(90+\theta)}$$

$$\Psi_2 = \sin^{-1} \left( \frac{v}{|U-v|} \sin(90+\theta) \right)$$

이므로 이로부터, 반원통 단면의 받음각

$$\alpha_2 = \theta + \Psi_2$$

는 와 같이 되고, 회전 토오크는

$$\tau_2(\theta) = a (-L_2 \cos \alpha_2 - D_2 \sin \alpha_2)$$

으로 얻어지게 된다. 여기서

$$L_2 = C_{L2}(\theta) \frac{1}{2} \rho S |U-v|^2$$

$$D_2 = C_{D2}(\theta) \frac{1}{2} \rho S |U-v|^2$$

바람을 거스르는 방향에 반원통이 놓여 있을 경우에는 날개의 선속  $v = R\omega$  는 일반적으로 회전방향과 반대방향을 이루게 된다. 따라서 상대속도는 오히려 커지는 쪽으로 나타나게 된다. 결과적으로 역방향 토크는 회전이 빠를수록 커지고 순방향 토크는 감소하는 결과가 일어나게 된다.

이 두 가지 원통에 대한 토크는 회전각에 따라 다르며, 한 회전에 동안에 얻어지는 동력을 구하기 위해서, 평균토크를 정의할 필요가 있다. 평균토크는 두 원통면이 쌍을 이루어 반회전 하는 경우에 대한 평균으로

$$\bar{T} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (T_1(\theta) + T_2(\theta)) d\theta$$

와 같이 구할 수 있다. 풍력에 의한 동력은 결국

$$P = \omega * \bar{T}$$

로 주어진다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

위에서 정의된 준정적 해석은 반원통 단면에 대한 양력과 항력의 계수를 모두 알고 있다는 가정에서 구축된다. 따라서 반원통 단면에 대한 양력과 항력계수를 받음각이 0도에서 360도 달라지는 경우 모두에서 측정할 것을 요구한다.

반원통 단면에 대한 기존 자료가 미비함으로, 본 논문에서는 반구형 단면에 대한 자료를 확장해서 활용하였다. 반구형 단면에 대한 항력과 양력 자료는 안테나에 관련한 것과, 낙하산에 관련한 자료로서 참고문헌에서 쉽게 찾을 수 있다. 여기서 반원통에 대한 항력계수와 양력계수는 반구에 비해 크므로 이를

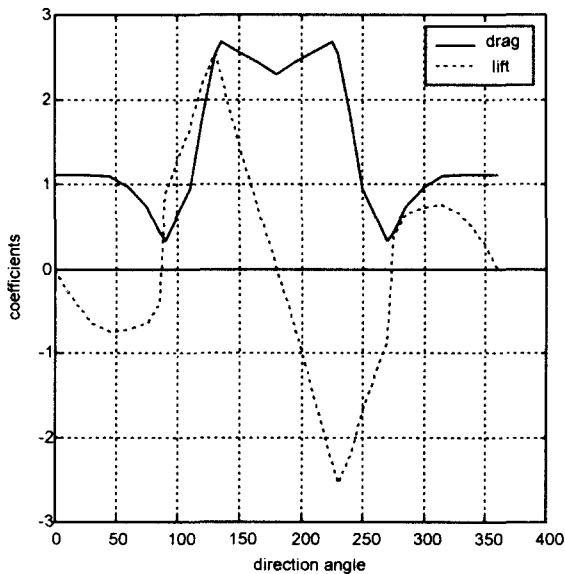


Fig. 2 Drag and lift coefficients of the half cylinder

Table 1 Calculation condition

항 목	규 격
반원통의 폭(m)	1.4
반원통의 높이(m)	7.5
풍속(m/sec)	16

선형 내삽하는 방식으로 확장하여 그 경향만을 반영하였다. 반구에 대한 최대 최소값을 반원통의 최대 최소값에 대응시키고 나머지 값은 같은 비율로 증감하여 사용하였다.

이렇게 반영한 양력 및 항력계수는 그림 2와 같다. 이 항력계수에서 보면, 항력계수값이 최대가 2.3에 이르고 있다. 이는 수직면 회전식의 양력계수(1.2정도)보다 큰 값이다. 계수 면에서 보면 수평회전식이 큰 값의 계수를 이용한다.

계산조건은 현재 시험 제작 중에 있는 수평회전식 회전자를 대상으로 설정하였으며, 표1과 같다. 이로부터 회전수가 분당 20회전일 때, 계산된 회전토크는 임의의 회전각에 대하여 그림 3과 같은 경향으로 나타났다. 최대토크는 반원통이 바람에 밀리면서 사각을 이룰 때 일어나므로, 반원에 걸리는 양력의 효과와 항력이 효과가 합성되는 점에서 얻어지는 것이라고 볼 수 있다. 이는 낙하산이 바라 아래로 떨어지는 것보다 옆으로 움직이며 떨어질 때 양력의 효과를 받아 더 천천히 떨어지게 되는 원리와 같다.

수직회전식과 비교하면, 바람에 밀리는 동안 상대속도가 감소하여 순방향 토크가 떨어지게 된다. 수직회전식에서는 회전 속도에 의한 단면의 선속이 풍속과 벡터합이 이루어져 속도가 커지게 되는 것에 비하면, 수평회전식은 이러한 관점에서 불리하다. 상대속도의 감소가 출력 토크의 감소에 제곱비례로 영

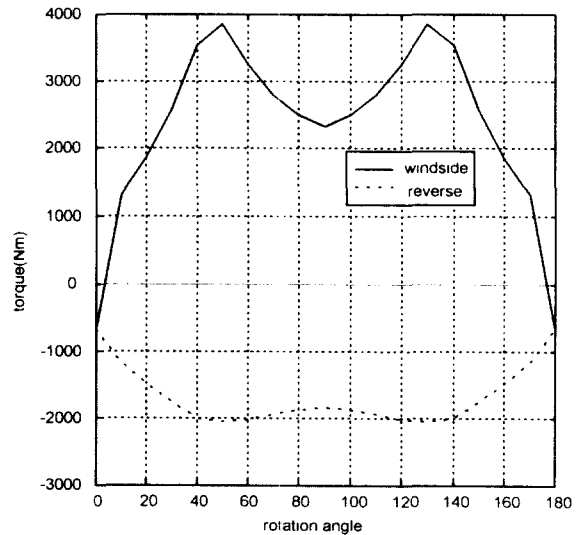


Fig. 3 Wind induced torques

향을 받기 때문이다.

아울러 수직회전식과 비교하면, 수직 회전식은 한 회전동안 토오르크의 변화가 거의 없으나, 수평면 회전식은 그것이 음과 양을 변화하는 큰 기복이 수반된다.

순방향 토오르크는 0도에서 180되는 각도에서 일어나며, 이 회전 토오르크는 나머지 반회전 동안 역토오르크에 의해 감소된다. 따라서 수평회전식의 출력을 향상시키려면 이 역토오르크에 대한 개선이 필요하다.

회전수를 달리하면서 동력을 계산한 결과는 그림 4와 같다. 동력면에서 최대 동력은 회전수와 평균토오르크의 곱으로써 표현되며, 무부하 상태에서 회전하는 최대회전수에 비해 절반에 가까운 값에서 최대동력이 얻어지는 것으로 추정된다.

위와 같은 계산결과를 볼 때, 수평회전식 풍력발전기의 설계는 회전자의 폭과 높이, 그리고 적정회전속도는 바람의 속도를 고려하여 결정되어야 하는 것으로 결론지을 수 있다. 폭이 넓으면 상대적으로 적은 회전속도에서 팁의 선속이 빨라져 동력출력이 줄어들게 되며, 폭이 적으면 상대적으로 빠른 회전을 시킬 수 있다. 이는 동력을 증가시키는 요인으로 작용하나 토오르크를 줄이게 됨으로 다시 동력이 줄어들게 된다. 따라서 설계풍속에 대한 회전수와 회전날개 폭은 서로 적정한 고려가 이루어져 설계되어야 한다.

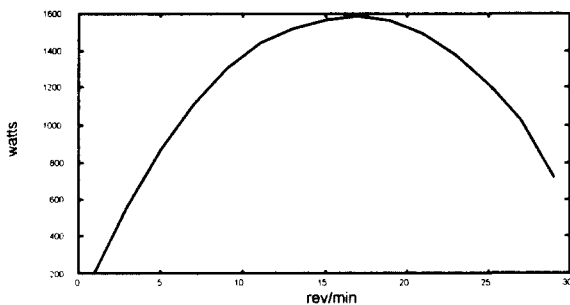


Fig 4 Extracted power from the wind power generator

#### 4. 결 론

수평회전식에 대한 준 정적해석을 제안하였다. 이 방법은 회전자의 임의 방향에 대한 양력계수와 항력계수 자료가 있을 경우 풍력발전기의 출력동력을 추정할 수 있다. 이러한 풍력발전기는 회전자가 바람에 따라 움직일 때 항력과 양력에 의해 토오르크가 주로 발생되며, 바람과 사각이 이루어질 때 최대 토오르크가 발생한다. 회전자가 반대로 바람에 거슬러 움직이면 역토오르크가 발생하며, 이 역 토오르크는 회전속도의 제곱에 비례한다. 그러므로 수평회전식의 발전기는 저회전에서 큰 토오르크가 얻어지며, 회전속도가 빠르면 역토오르크가 커져 출력동력이 줄게 된다. 수평 회전식의 성능을 높히려면 역토오르크 개선에 대한 연구가 추천된다. 아울러 순방향 토오르크가 상대속도가 줄어들어 작아지게 되는데, 이를 막기 위해서 수평회전식은 저속에서 설계되는 것이 요구된다.

본 해석에서는 반구의 양력계수와 항력계수가 바람의 입사각에 따라 달라지는 경향을 반영하여 해석을 확장하였다. 앞으로 회전자에 대한 항력계수와 양력계수가 먼저 조사되어야 본 방법을 실제 설계에 활용할 수 있을 것으로 본다.

#### 후 기

본 연구는 윈드택(주)의 자료지원을 받아 연구되었다.

#### 참 고 문 헌

- Hoerner, S. F.(1965)., "Fluid-Dynamic Drag Theore Experimental and Statistical Information", Hoerner Dynamics.
- Hoerner, S. F.(1975), "Fluid-Dynamic Lift Information on Lift its Derivatives, in Air and in Water", Hoerner Fluid Dynam
- Gipe, P.(1995), "Wind Energy Comes of Age", John Wiley & ns, Inc.