

저락차관로식횡류타빈의 준정상류체동력학적동작특성을 예측하기 위한 한가지 근사적계산방법

래기훈, 박영철

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 전력생산에서 신비주의를 깨뜨리고 수력, 화력, 풍력, 조수력 등 온갖 동력원천을 적극 리용하여 중소규모의 발전소들을 대대적으로 건설하여야 하겠습니다.》《김일성전집》 제 23 권 42 페이지)

해류와 조류, 강하천의 흐름 등 저락차수력자원을 리용하기 위한 타빈들의 구조형식과 동작원리는 풍차와 매우 유사하다.

선행연구[1]에서는 높이에 따르는 바람속도의 분포를 고려하여 수직풍차(다리우스형)의 준정상류체력학적동작특성을 결정하였으며 선행연구[2]에서는 동작특성예측과 류체동력학적특성에 중점을 두고 횡류바다타빈(직선날개다리우스형)의 수값모의를 하였다.

본문에서는 관로식횡류타빈의 리상동작특성저락차관로식횡류타빈에서 날개요소리론과 운동량작용원리론을 결합하여 준정상류체동력학적동작특성을 예측한다.

1. 관로식횡류타빈의 리상동작특성

그림 1과 같은 관로식횡류타빈흐름에 대하여 비압축성, 리상류체, 1차원정상흐름이라고 가정하며 날개수는 무한대이고 회전자에 작용하는 흐름방향의 힘은 균일하게 분포되어있다고 본다.

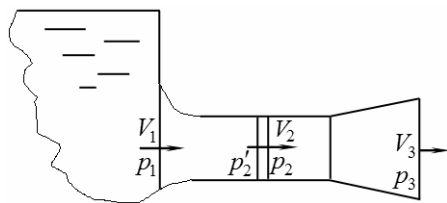


그림 1. 관로식횡류타빈류통부

회전자를 충동원판으로 보고 원판의 앞과 뒤에서 압력차 Δp 를 다음과 같이 놓자.

$$\Delta p = p'_2 - p_2 = \beta(p_0 - p_3), \quad p_0 = p_1 + \rho V_1^2 / 2 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도, p_0 은 전압, p_i ($i=1, 2, 3$) 는 해당한 자름면에서의 정압이다.

충동원판을 지나가는 흐름속도와 흐름량, 타빈회전자의 출력, 밀림힘은 각각

$$V = \sqrt{2(p_0 - p'_2) / \rho}, \quad Q = SV, \quad P = (p'_2 - p_2)SV = \beta(p_0 - p_3)Q, \quad T = (p'_2 - p_2)S = \beta(p_0 - p_3)S \quad (2)$$

와 같다. 여기서 S 는 타빈회전자의 자름면의 면적이다.

베르누이방정식(자름면 1과 자름면 2사이, 자름면 2와 자름면 3사이)들로부터

$$p_0 - p'_2 = (1 - \beta)k^2(p_0 - p_3). \quad (3)$$

여기서 k 는 확대결수(자름면 3과 자름면 2사이의 면적비)이다.

식 (3)을 고려하면 식 (2)는 다음과 같이 표시된다.

$$V = \sqrt{1 - \beta} k \sqrt{2(p_0 - p_3)/\rho}, \quad Q = SV, \quad P = \beta \sqrt{1 - \beta} k S \sqrt{2(p_0 - p_3)/\rho}, \quad T = \beta(p_0 - p_3)S \quad (4)$$

회전자를 통과하는 물의 전에너지흐름과 운동량흐름은 다음과 같다.

$$E = (p_0 - p_3)Q = \rho S V^2 / (2k^2(1 - \beta)), \quad K = \rho V^2 S \quad (5)$$

$\beta = 0$ ($\Delta p = 0$) 인 경우에는

$$E_0 = (p_0 - p_3)SV_0 = \rho S V_0^2 / (2k^2), \quad K_0 = \rho V_0^2 S, \quad Q = SV_0, \quad V_0 = k \sqrt{2(p_0 - p_3)/\rho}, \quad (6)$$

$$V = \sqrt{1 - \beta} V_0. \quad (7)$$

식 (4)–(7)로부터 타빈회전자의 출력결수와 흐름량결수, 밀림힘결수, 효율은 각각 $C_P = P/E_0 = \beta \sqrt{1 - \beta}$, $C_Q = Q/Q_0 = \sqrt{1 - \beta}$, $C_T = T/K_0 = \beta/(2k^2)$, $\eta = P\beta/E$ 와 같다.

이로부터 출력결수의 최대값은 $dC_P/d\beta = 0$ 즉 $\beta = 2/3$ 일 때 얻어진다. 즉

$$C_{P\max} = \sqrt{4/27} \approx 0.385, \quad \eta = 2/3 \approx 0.667.$$

이와 같이 관로식횡류타빈의 출력결수한계는 38.5%이다. 이 값은 풍차에서 베즈의 한계 59.3%에 대응된다. 그러므로 관로식횡류타빈의 베즈의 한계는 38.5%이다. 다시말하여 관로식횡류타빈으로 얻을수 있는 최대출력은 타빈이 없을 때 같은 류통부를 통과하는 물의 전에너지흐름의 38.5%이고 이때 효율은 66.7%이다.

2. 관로식횡류타빈의 준정상류체동력학적동작특성

관로식횡류타빈에서 흐름은 매우 복잡하며 그것의 동작특성을 정확히 예측한다는것은 어려운 문제이다.

날개요소운동량리론과 운동량작용원판리론을 결합하여 관로식횡류타빈의 준정상류체동력학적특성을 결정하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

①(준정상성가정) 회전자의 매 날개에 작용하는 류체동력학적힘은 매 순간 상대흐름속도에만 관계되며 경계의 영향은 고려하지 않는다고 가정한다.

② 회전자를 지나는 흐름은 평면흐름이며 속도의 크기는 평균흐름속도로 평가한다.

③ 타빈의 출력과 밀림힘은 한 회전에서 평균값으로 평가한다.

④ 날개요소리론과 작용원판리론으로 계산된 밀림힘은 같다.

이러한 가정들에 의하여 계산되는 날개에 대한 상대흐름속도, 날개에 작용하는 힘의 접선방향성분과 흐름방향성분은 다음과 같다.(그림 2)

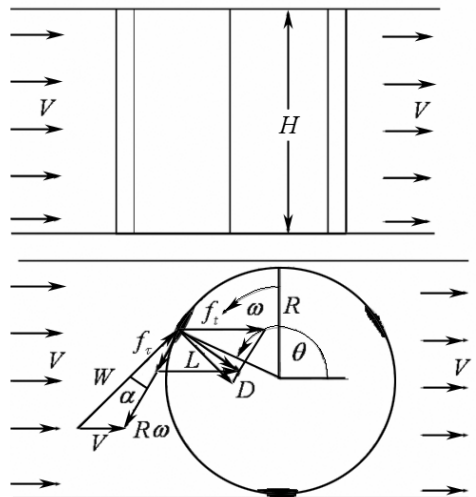


그림 2. 회전자날개에 작용하는 힘

$$W^2 = (R\omega + V \sin \theta)^2 + (V \cos \theta)^2, \quad \alpha = \arctan[V \cos \theta / (R\omega + V \sin \theta)]$$

$$f_t = \rho W^2 b (c_L \sin \alpha - c_D \cos \alpha) / 2 = \rho W^2 b c_t / 2$$

$$f_r = \rho W^2 b (c_L \cos(\alpha + \theta) - c_D \sin(\alpha + \theta)) / 2 = \rho W^2 b c_r / 2$$

가정 ③, ④에 따라 $T = \frac{NH}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho W^2 b c_t d\theta = \beta(p_0 - p_3)RH$ 가 성립된다.

이 식으로부터 회전자날개의 기하학적특성 (R, H, b, N)과 날개자름면의 항공력학적특성 $c_L(\alpha)$, $c_D(\alpha)$, 동작조건 $p_0 - p_3$, ω 가 주어지면 β 를 결정할수 있다.

회전자를 통과하는 흐름속도는 식 (7)로 결정되므로 타빈의 무차원동작특성은 다음과 같이 결정된다.

$$C_P(\sigma, \mu, k) = \frac{P}{\rho V_0^3 RH / (2k^2)} = \frac{\sigma \mu k^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V_0} \right)^2 c_t d\theta, \quad C_T = \frac{T}{\rho V_0^2 RH} = \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V_0} \right)^2 c_t d\theta, \quad \sigma = \frac{Nb}{R}, \quad \mu = \frac{R\omega}{V_0}$$

여기서 σ 는 막힘성, μ 는 끝속도비이다.

선행연구[1]에서와 유사하게 실제 속도비 $\mu' = \frac{R\omega}{V}$ 와

$$C'_T = \frac{T}{\rho V^2 RH} = \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V} \right)^2 c_t d\theta \quad (8)$$

를 도입하면 $\left(\frac{V}{V'} \right)^2 = 1 - \beta = \left(\frac{\mu}{\mu'} \right)^2$, $C_T = \frac{\beta}{2k^2} = C'_T \left(\frac{\mu}{\mu'} \right)^2$ 이므로(여기서 k 는 수차실과 출구

자름면의 면적비) $\frac{\mu}{\mu'} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2k^2 C'_T}}$ 이 성립된다.

마찬가지로

$$C'_P(\sigma, \mu', k) = \frac{P}{\rho V^3 RH / (2k^2)} = \frac{\sigma \mu' k^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V} \right)^2 c_t d\theta \quad (9)$$

를 도입하면 다음의 식들이 성립된다.

$$C_T(\sigma, \mu, k) = (\mu/\mu')^2 C'_T = C'_T / (1 + 2k^2 C'_T), \quad C_P(\sigma, \mu, k) = (\mu/\mu')^3 C'_P = C'_P / (1 + 2k^2 C'_T)^{3/2} \quad (10)$$

$$C_Q(\sigma, \mu, k) = 1 / (1 + 2k^2 C'_T), \quad \eta(\sigma, \mu, k) = C_P / C_Q$$

얻어진 관계식에 따라 관로식형류타빈의 무차원류체동력학적특성은 다음과 같이 계산할수 있다.

1) $\mu' = R\omega/V$ 을 변화시키면서 식 (8), (9)에 의하여 $C'_T(\sigma, \mu', k)$, $C'_P(\sigma, \mu', k)$ 를 계산한다.

2) 식 (10)에 의하여 $C_T(\sigma, \mu, k)$, $C_P(\sigma, \mu, k)$, $C_Q(\sigma, \mu, k)$, $\eta(\sigma, \mu, k)$ 를 계산한다.

무차원류체동력학적특성계산에 리용한 날개자름면은 NACA0012이다.

날개에 관한 상대흐름의 레이놀즈수는 위치각 θ 에 따라 변화된다.

계산에서는 이러한 변화를 무시하고 $Re = 10^6$ 일 때 양력, 저항력계수값을 리용하였다.

날개자름면의 $c_L(\alpha)$, $c_D(\alpha)$ 곡선은 그림 3과 같다.

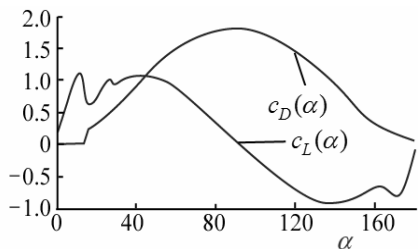


그림 3. 날개자름면의 $c_L(\alpha)$, $c_D(\alpha)$ 곡선

앞에서 얻어진 공식과 절차대로 σ 를 0.05로부터 0.05의 간격으로 0.5까지 변화시키면서 계산된 C_p , η 들은 그림 4, 5와 같다.

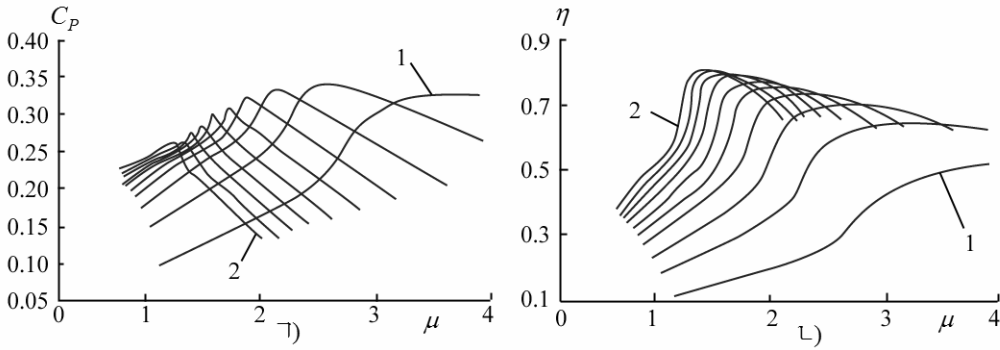


그림 4. $k=1.25$ 일 때의 무차원동작특성

ㄱ) 속도비 μ 에 따르는 C_p 의 변화, ㄴ) 속도비 μ 에 따르는 η 의 변화

1- $\sigma=0.05$ 일 때, 2- $\sigma=0.5$ 일 때

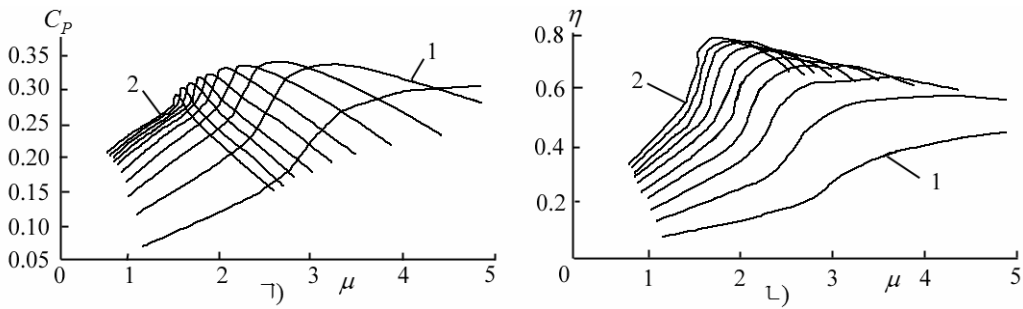


그림 5. $k=1.0$ 일 때의 무차원동작특성

ㄱ) 속도비 μ 에 따르는 C_p 의 변화, ㄴ) 속도비 μ 에 따르는 η 의 변화

1, 2는 그림 4에서와 같음.

막힘성 σ 가 커짐에 따라 C_p 의 최대값을 주는 속도비 μ 의 값은 감소한다.

이때 C_p 의 최대값은 증가하다가 감소한다. C_p 의 가장 큰 값을 주는 합리적인 σ 와 동작상태 μ 가 있다는것을 계산결과는 보여준다.

또한 효율 η 는 막힘성 σ 가 커짐에 따라 η 의 최대값을 주는 속도비 μ 의 값은 감소한다.

η 의 최대값은 C_p 와는 달리 계속 증가한다. 확대결수 k 는 출력결수보다 효율과 밀림힘결수에 더 큰 영향을 준다.

k 값이 커질 때 효율 η 는 증가하며 밀림힘결수 C_T 는 감소한다.

출력결수와 효율의 최대값을 주는 속도비는 막힘성이 증가할 때 감소하며 출력결수와 효율의 막힘성에 따르는 변화특성은 다르다.

막힘성이 증가할 때 출력결수는 최대값이 존재하지만 효율은 계속 증가한다.

날개와 레이놀즈수가 달라지면 출력결수와 효율의 변화특성은 류사하다.

그러나 C_p 의 가장 큰 값을 주는 합리적인 σ 와 동작상태 μ 는 달라진다는것을 계산 결과는 보여준다.

맺는 말

논문에서는 관로식횡류타빈의 넓은 작업상태에서 동작특성을 근사적으로 예측할수 있는 계산방법을 제기하였다. 그리고 계산실험을 진행하여 무차원파라미터 σ , μ , k 와 동작특성 C_P , C_T , C_Q , η 의 관계를 밝히고 출력결수가 최대인 합리적인 막힘성과 속도비가 존재한다는것을 보여주었다.

논문에서 제기한 준정상류체력학적동작특성의 결정방법은 저락차관로식횡류타빈의 설계의 초기단계에서 출력을 효과적으로 예측하여 합리적인 구조정수와 작업상태를 확정할수 있게 한다.

참고 문헌

[1] 김일성종합대학학보(자연과학편), 5, 44, 1982.

[2] S. Lain et al.; Journal of Scientific & Industrial Research, 69, 12, 906, 2010.

주체105(2016)년 3월 5일 원고접수

An Approximate Calculation Method to Estimate the Quasi-Steady Hydrodynamic Performance Characteristics of Low Head Pipe Cross Flow Turbine

Thae Ki Hun, Pak Yong Chol

We suggested an approximate calculation method to estimate quasi-steady hydrodynamic performance of low head pipe cross flow turbine. The results of this paper can estimate effectively the hydrodynamic performance of this turbine in the broad operation region.

Key words: cross-flow turbine, Darrieus type turbine, hydrodynamic performance