

파력발전용 새로운 공기터빈 개발에 관한 연구

김태호* · 瀬戸口俊明* · 김희동**

Study of a New Air Turbine for Wave Energy Conversion

Tae-Ho Kim, Toshiaki Setoguchi and Heuy-Dong Kim

Key Words : Air Turbine(공기터빈), Fluid Machinery(유체기계), Natural Energy(자연에너지), Ocean Energy(해양에너지), Wave Power Conversion(파력변환)

Abstract

In order to develop an efficient turbine for wave energy conversion suitable for actual ocean conditions, a new type of the air turbine with staggered blades has been investigated experimentally. Experiments have been carried out under steady flow conditions. Both the running and starting characteristics under sinusoidally oscillating flow conditions are simulated by a CFD method using a quasi-steady analysis. It is known that the air turbine with staggered blades gives a better performance compared with conventional Wells turbine, and a proper design factor of the air turbine is discussed for the setting angle of the rotor.

기호설명

- b : 동익길이
- C_A : 입력계수 {식(2)}
- C_T : 토크계수 {식(1)}
- f : 파의 진동수
- I : 동익의 관성모멘트
- l : 코드길이
- Q : 공기유량
- r_R : 평균반경
- S : 파의 무차원주파수 = fr_R / V
- t : 시간
- t^* : 무차원시간 = tf
- T : 파의 주기 = $1/f$
- T_o : 출력토크
- T_L : 부하(loading)토크
- U_R : 평균반경에서 동익의 원주속도 = $r_R \omega$
- v : 유로단면 평균축류속도
- v_i : 유출시 유로단면 평균축류속도
- v_o : 유입시 유로단면 평균축류속도
- V : 대표속도 = $(V_o + V_i)/2$
- V_i : v_i 의 최대값

- V_o : v_o 의 최대값
- X_I : 무차원 관성모멘트 = $I / (\pi \rho r_R^5)$
- X_L : 무차원부하토크 = $I / (\pi \rho r_R^3 V^2)$
- z : 동익수
- γ : 동익의 회전방향에 대한 스테저각
- Δp : 터빈 전후의 전압차
- $\underline{\eta}$: 정상효율 {식(3)}
- η : 평균효율 {식(5)}
- ρ : 공기밀도
- σ_R : 동익의 솔리디티(solidity) = $lz / (2\pi r_R)$
- ϕ : 유량계수 {식(4)}
- Φ : 유량계수 {식(6)}
- ω : 동익의 각속도
- ω^* : 동익의 무차원각속도 = ω / f

1. 서론

최근 에너지 부족현상을 극복하기 위한 연구의 일환으로, 많은 국가에서는 수십 년 전부터 자연 에너지를 유용하게 이용하는 기술에 관하여 관심을 가져왔다. 그 결과, 조력, 파력, 풍력, 태양열 발전기 등과 같은 새로운 대체에너지 장치로 수많은 장치들이 제안되어 현재 활용되고 있다.

이들 장치들 중에서 고효율의 에너지를 얻을 수 있는 장치로, 에너지 밀도가 높은 파에너지로부터

* 국립사가대학교

** 국립안동대학교

에너지를 이용하는 파력발전기가 유용하다는 것이 알려졌다⁽¹⁾. 이 장치는 파의 왕복운동(OWC, Oscillating Wave Column)을 이용하는 것으로, 3면이 바다로 둘러싸인 우리 나라에 있어서, 장래 에너지 부족현상을 해결하기 위한 유력 수단으로 될 것임에 틀림없다.

OWC로부터 얻어진 공기 역학적에너지는 공기터빈을 회전시킴으로서, 기계에너지로 변환되며, 발전기를 연결하여 전기를 발생시킨다. 지금까지 알려진 가장 단순한 형태의 공기터빈은 1976년 영국의 Wells에 의하여 개발된 웰즈터빈(Wells turbine)⁽²⁾이다. 그러나 웰즈터빈은 종래의 프란시스 터빈에 비하여, 효율이 낮으며, 공기역학적으로 고속회전이 가능하므로, 소음, 강도설계 및 보수에 문제점들이 있었다⁽³⁾. 따라서 현재 영국, 포르투갈, 일본, 인도, 중국 등에서는 새로운 형태의 파력발전용 터빈 개발에 국가적인 역량을 집중하고 있다.

고성능 파력발전 시스템을 실현하기 위하여, 현재의 웰즈터빈을 포함하여, 지금까지 제안된 여러 형태의 파력발전용 공기터빈을 적용한 실험이 실제 바다에서 수행되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 그 결과에 따르면, 대기로부터 터빈에 유입되는 공기의 축류속도 최대값은 공기실로부터 유출될 때의 유속에 비하여 작다는 것이 밝혀졌다^(7,8). 따라서 동익의 회전방향에 대하여 0° 의 스테저각(staggered angle) γ 를 갖는 웰즈터빈은 공기의 유출입에 따라 날개 주변의 유동장이 달라지기 때문에, 터빈 날개의 기하학적 상태가 회전중심 축에 대하여 대칭이 되지 않는다. 따라서 유입시에 비하여 에너지 입력량이 큰 유출시 고효율을 얻기 위하여, Fig.1과 같이 회전방향에 대한 스테저각 γ 를 갖는 공기터빈이 웰즈터빈보다 높은 효율을 실현할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 이와 같은 파력발전용 공기터빈에 대해서는 현재까지 상세하게 연구되지 않았으며, 이러한 터빈의 성능을 해명하는 것은 공학적으로 대단히 중요하다.

본 연구에서는 새로운 형태의 파력발전용 터빈의 개발을 위하여, 스테저각 γ 를 갖는 파력발전용 터빈의 성능을 정상유동 관점에서 실험을 수행하였다. 또 실험으로부터 얻어진 유동장을 수치해석적 방법으로 재현하기 위하여 준정상 수치기법으로 비정상유동에서의 터빈의 자기기동특성(self-starting characteristics)을 조사하였으며, 최적 스테저각도 제안하였다. 또 종래의 웰즈터빈과의 성능비교를 통하여 본 연구에서 시도한 공기터빈의 유용성을 제시하였다.

2. 제목실험장치 및 방법

본 연구에 이용된 파력발전용 공기터빈의 모식도를 Fig.1에 나타내었다. 실제 파력발전에서 사용되는 공기터빈은 파의 한 주기당 축류속도의 최대값은 일반적으로 유출시 보다 유입시가 작다. 예를 들면, 현재 일본해양과학기술센터(Japan Marine Science & Technical Center)에서 실험중인 Might whale과 인도의 실험장치에서 유입시의 최대속도는 유출시 최대값의 60% 정도이다^(7,8). 이것은 유출시 터빈에 대한 에너지 입력량이 유입시보다 크다는 것을 의미한다. 따라서 그림에서 나타낸 바와 같이 동익을 회전방향에 대하여 각 γ 만큼 회전시킨 후, 허브(hub)에 고정시키는 것으로부터, 에너지 입력량이 큰 유출시에 고효율의 에너지를 얻을 수 있으며, OWC에 의한 왕복기류하에서 터빈의 평균효율을 향상시킬 수 있다.

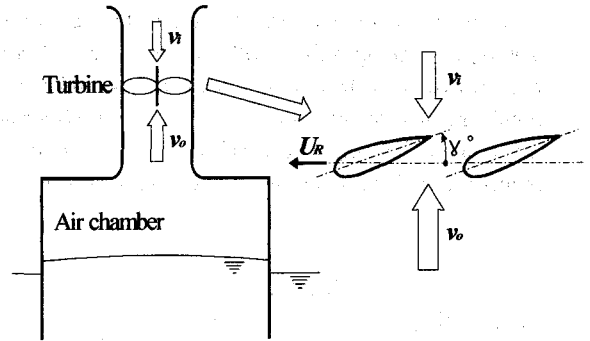
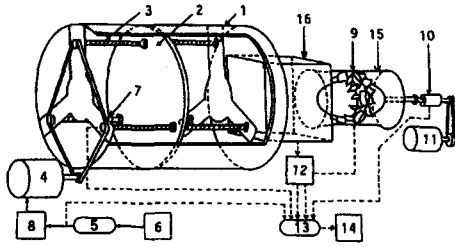


Fig. 1 Schematic view of air turbine

Fig.2에는 실험장치의 개략도를 나타내었다. 본 연구에 사용된 실험장치는 직경 1.4m, 길이 1.7m인 원통형 실린더에 컴퓨터 제어를 통하여 피스톤을 구동하는 왕복기류를 발생시키는 풍동으로, 공기터빈과 연결된다⁽⁹⁾. 실험에서는 정상유동을 발생시켜 터빈의 회전수를 일정하게 유지하면서 실험을 수행하였다. 실험동안 터빈의 각속도 ω (≤ 471 rad/s), 공기유량 Q (≤ 0.32 m³/s), 터빈 전후의 전압차 Δp (≤ 4.65 kPa) 및 토크 T_0 를 측정하였다. 본 실험에서 측정오차는 다음의 식(3)에 정의하는 터빈 효율 η 에서 약 $\pm 1\%$ 이다.

본 연구에 사용된 동익의 상에 체원을 Table 1에 상세하게 나타내었다. 스테저각 γ 가 터빈성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여, $\gamma = 0^\circ$ (웰즈터빈), $\pm 2^\circ$, $\pm 4^\circ$ 에서 실험을 수행하였다. 또 동익의 기하학적 형상은 전술한 Might whale에 적용된 웰즈터빈과 동일 형상으로 하였다.



- 1 Cylinder
- 2 Piston
- 3 Ball-screw
- 4 Servomotor
- 5 D/A converter
- 6 Micro-computer
- 7 Potentiometer
- 8 Servo-pack
- 9 Turbine
- 10 Torque transducer
- 11 Servomotor-generator
- 12 Pressure transducer
- 13 A/D converter
- 14 Micro-computer
- 15 Test section
- 16 Settling chamber

Fig. 2 Test rig

Table 1 Turbine blade model

Blade profile	NACA0021
Chord length l	75mm
Solidity σ_R	0.75
Number of blades z	8
Tip diameter	298mm
Hub-to-tip ratio	0.7
Aspect ratio	0.6
Setting angle γ	$0^\circ, \pm 2^\circ, \pm 4^\circ$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정상유동에서 터빈의 특성

정상유동에서 터빈의 특성을 다음의 식에서 정의하는 토크계수 C_T , 입력계수 C_A , 효율 η 및 유량계수 ϕ 와의 관계로부터 평가하였다.

$$C_T = T_o / \{ \rho(v^2 + U_R^2)blzr_R / 2 \} \quad (1)$$

$$C_A = \Delta p Q / \{ \rho(v^2 + U_R^2)blzv / 2 \} \quad (2)$$

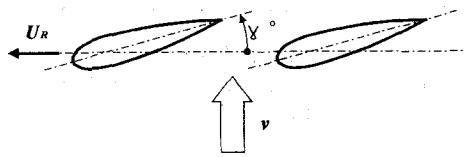
$$\eta = T_o \omega / (\Delta p Q) = C_T / (C_A \phi) \quad (3)$$

$$\phi = v / U_R \quad (4)$$

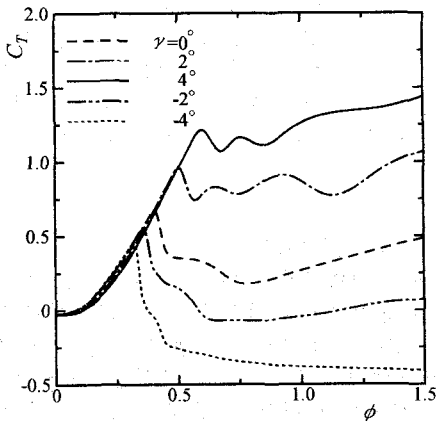
여기에서, ρ : 공기밀도, b : 동익길이, U_R : 평균반경에서 동익의 주속도, v : 유로의 평균단면적에서의 축류속도이다.

Fig.3 는 정상유동에서 터빈의 특성에 영향을 미치는 스테저각 γ 의 영향을 나타내었다. 여기에서, γ 는 Fig.3(a)에 나타난 바와 같이 유출사 축류속도 v 의 유동방향으로 후연(trailing edge)이 기울어지는 것을 '+'로 정의한다. Fig.3(b)에는 C_T 와 ϕ 의 관계를 γ 를 변수로 나타내었다. 그림에서 실속(stall)이 일어나지 않는 영역에서의 C_T 는 동일한 ϕ 값에 대하여 γ 의 영향이 거의 나타나지 않지만, 실속 이후의 영역에서는 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한 실속점(stall point)에서 C_T 와 ϕ 의 값은 γ 가 커짐에 따라 증가한다. 이것은 γ 가 커질수록, 동익에 대응하는 영각(attack angle)이 작아짐으로 인하여 동익의 배면(suction surface)에서 경계층의 박리가 지연되기 때문이다. 한편 $\gamma < 0^\circ$ 의 동익에서는 실속 이후의 C_T 값이 음이 되는 영역이 존재한다.

Fig.3(c)에 나타난 바와 같이 C_A 값은 실속 직후를 제외하면, 거의 모든 ϕ 에 대하여, γ 가 작아질수록 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 γ 가 작은 동익일수록, 반동도(degree of reaction)가 커짐에 따라 동익전후의 압력차가 증가하기 때문이다. 터빈의 효율 η 는 Fig.3(d)에 나타난 바와 같이 거의 모든 ϕ 의 영역에서 γ 가 커질수록 증가한다. 이것은 Fig.3(b)와 (c)로부터 얻어진 결과를 식(3)에 대입함으로써 얻어질 수 있다.



(a) Outline of rotor blade



(b) Torque coefficient

-Fig.3 continued-

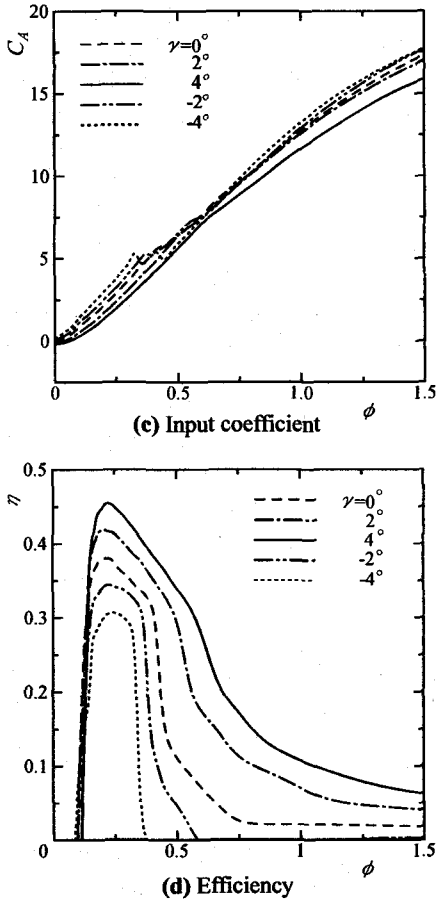


Fig. 3 Turbine characteristics under steady flow conditions

실제의 파력발전용 터빈은 왕복기류의 조건에서 작동하므로, 유출시 각 γ 를 갖는 동익은 유입시 $-\gamma$ 로 변하므로, Fig.3(d)에 나타낸 $\eta-\phi$ 의 특성에서는 본 터빈과 종래의 웰즈터빈과의 성능비교가 곤란하다. 따라서 본 터빈의 특성을 평가하기 위하여, 왕복기류하에서 터빈의 특성을 밝힐 필요가 있다.

3.2 터빈의 성능비교

동익의 회전방향에 대하여 스테거각을 갖는 파력발전용 공기터빈의 비정상특성을 조사하기 위하여, 3.1 절에서 얻어진 $C_T-\phi$ 및 $C_A-\phi$ 의 실험값을 이용하여, 준정상 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 비정상유동으로써, Fig.4에 나타나는 정현파 형태의 속도변화를 갖는 주기적 왕복유동을 채택하였다. 실제 파력발전에서 사용되는 왕복유동형 공기터빈은 한 주기에 대하여, 축류속

도의 최대값은 일반적으로 유출시보다 유입시가 작다. 따라서 본 수치해석에서는 유입시 유로단면 평균축류속도의 최대값 V_i 와 유출시 최대값 V_o 의 비, 즉 V_i/V_o (이후, 속도비라고 함)는 1.0, 0.8, 0.6의 세 종류를 선택하였다. 또한 한 주기 T 에 대하여 유출·입 되는 공기의 체적을 같도록 하기 위하여, 유출시 및 유입시의 반주기를 각각 $V_i T/(V_o + V_i)$ 및 $V_o T/(V_o + V_i)$ 로 정하였다.

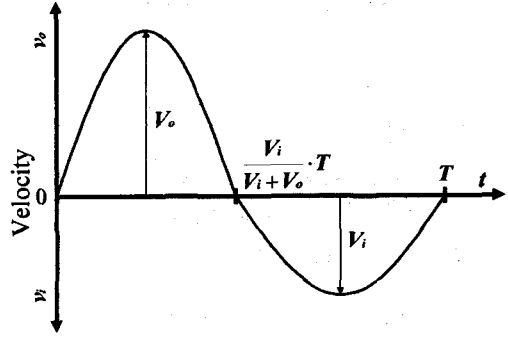


Fig. 4 Axial velocity distribution

한편 본 연구에 사용된 터빈은 회전방향에 대하여 스테거각 γ 를 갖고 있기 때문에, 왕복유동에서는 공기의 유동방향에 따라 터빈성능이 달라지게 된다. 따라서 유출시는 γ , 유입시는 $-\gamma$ 의 정상특성(Fig.2)을 이용하여 수치계산을 수행하였다. 주기적 왕복유동에서 터빈의 작동특성은 다음 식으로 계산되어지는 한 주기에 대한 평균효율 $\bar{\eta}$ 와 유량계수 Φ 의 관계로부터 평가한다.

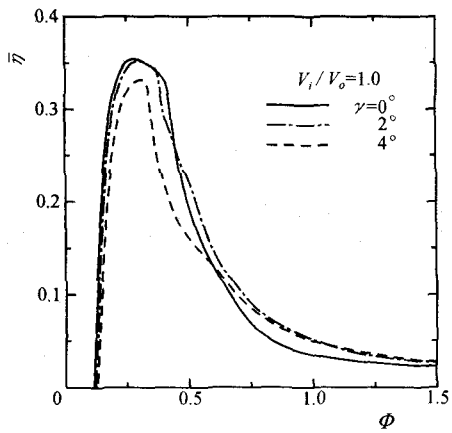
$$\bar{\eta} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T T_o \omega dt \right) / \left(\frac{1}{T} \int_0^T \Delta p Q dt \right) \quad (5)$$

$$\Phi = V/U_R \quad (6)$$

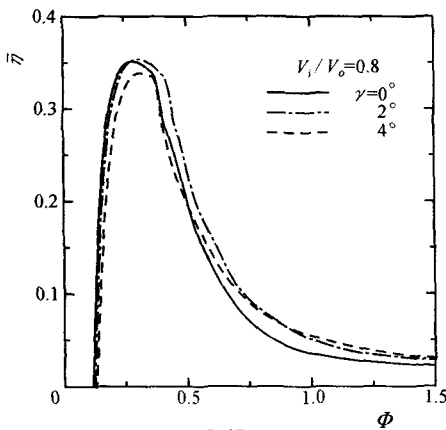
여기에서, T : 파의 주기, t : 시간, V : 대표속도이다.

터빈의 기동특성은, 주기적 왕복유동하에서 동익이 정시상태로부터 준정상 무구속 회전상태에 이를 때까지의 회전수의 변화를 이용하여 평가한다. 본 연구에 이용된 터빈의 거동을 조사하기 위하여, 다음의 각운동량식은 Runge-Kutta-Gill 방법을 이용하여 해석되었다.

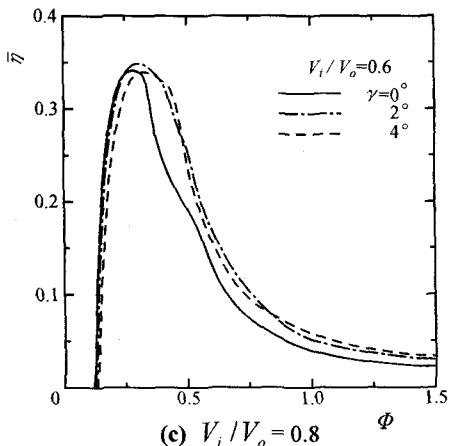
$$I d \frac{\omega}{dt} + T_L = T_o \quad (7)$$



(a) $V_i/V_o = 1.0$



(b) $V_i/V_o = 0.8$

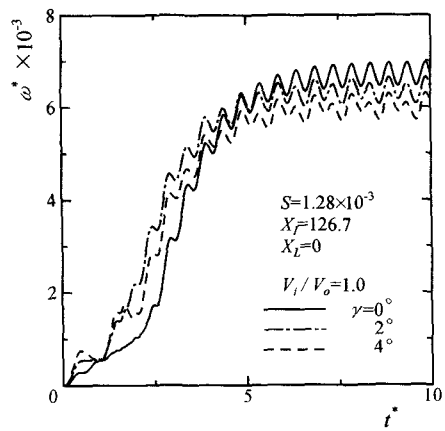


(c) $V_i/V_o = 0.6$

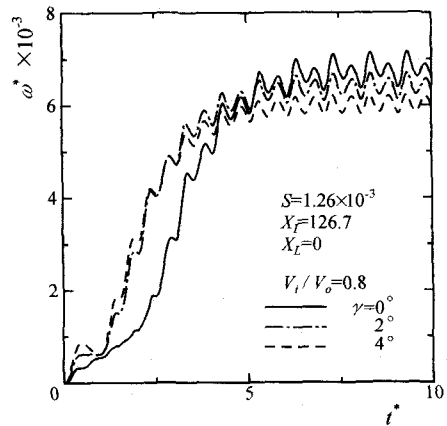
Fig. 5 Mean efficiency of turbine under sinusoidal flow conditions

Fig. 5 에서는 주기적인 왕복유동하에서 작동하는 터빈의 성능에 대하여 나타내었다. 그림으로부터 웰즈터빈($\gamma=0^\circ$)의 최대효율은 $V_i/V_o=1.0$ 의 경우(Fig. 5(a)) $\gamma=2^\circ$ 의 그것과 거의 같지만, 속

도비가 감소할수록 최대효율은 낮아진다. 반면에 $\gamma \neq 0^\circ$ 인 터빈의 최대효율은 속도비가 감소할수록 웰즈터빈의 그것에 비하여 상대적으로 높아진다. 한편 실속점의 유량계수는, 웰즈터빈의 경우 속도비가 감소할수록 작아지지만, $\gamma=0^\circ$ 인 터빈의 경우 속도비가 감소할수록 웰즈터빈에 비하여 상대적으로 커진다. 이런 사실들로부터, 본 연구에 사용된 왕복기류용 공기터빈들의 작동특성은 유출·입시의 속도차 $V_o - V_i$ 가 클수록, 유출시의 터빈성능에 매우 의존하는 것을 알 수 있다. 또한 속도비가 0.8 과 0.6 에서, $\gamma=2^\circ$ 인터빈의 최대효율이 세 종류의 터빈들 중에서 가장 크며, 이 터빈들의 작동특성으로부터 최적 스테거각은 $\gamma \approx 2^\circ$ 로 생각할 수 있다.

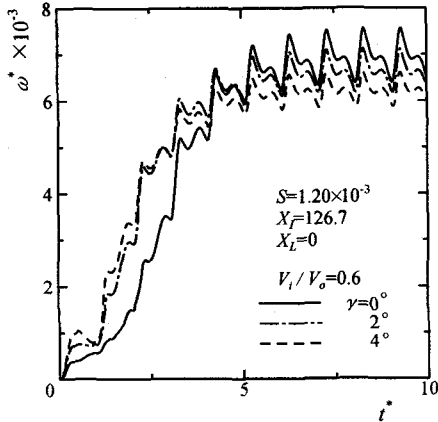


(a) $V_i/V_o = 1.0$



(b) $V_i/V_o = 0.8$

-Fig. 6 continued-



(c) $V_i/V_o = 0.8$
Fig. 6 Starting characteristics of turbine under sinusoidal flow conditions

Fig.6 에는 각 터빈의 자기기동특성(self-starting characteristics)의 계산 결과를 나타내었다. 여기서 종축 및 횡축은 각각 무차원각속도 ω^* 및 무차원시간 t^* 이다. 또 그림에서 S , X_T , X_L 은 각각 파의 무차원진동수, 무차원관성모멘트, 무차원부하토크이다. 그림으로부터 세 종류의 터빈 모두 단시간에 준정상 무구속 회전상태에 도달하지만, 웰즈터빈보다, $\gamma = 0^\circ$ 인 터빈의 자기기동특성이 우수하다. 이것은 Fig.3(b)에 나타낸 정상특성과 같이, 유량계수가 큰 영역에서 C_T 는 γ 가 커질수록 증가하기 때문이다. 또한 γ 가 커질수록 준정상 무구속회전수는 낮아진다.

한편 그림으로부터 무구속 회전상태에서 회전수의 변화는 세 종류의 터빈 모두 속도비가 감소할수록 커진다. 이것은 유출시에 비하여 상대적으로 유입시 축류속도의 감소와 $\gamma \neq 0^\circ$ 인 경우는 유입시 $\gamma < 0^\circ$ 로 되어 고풍력 토크를 얻는 것이 불가능하기 때문이라고 생각할 수 있다.

4. 결론

스태거각을 갖는 파력발전용 공기터빈의 성능을 정상유동을 이용하여 실험을 수행하였으며, 준정상 수치기법으로 비정상유동하에서 웰즈터빈을 포함한 세 종류의 터빈성능을 해명하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) $\gamma = 2^\circ$ 인 터빈의 최대효율이 세 종류의 터빈들 중에서 가장 크며, 작동특성이 우수하였다.
- (2) 세 종류의 터빈 모두 단시간에 준정상 무구속 회전상태에 도달하지만, 웰즈터빈보다 $\gamma \neq 0^\circ$ 인 터빈의 자기기동특성이 우수하였다. 따라서 스

태거각을 갖는 터빈의 작동 및 기동특성이 웰즈터빈보다 우수하며, 이 터빈의 최적 스태거각은 $\gamma \approx 2^\circ$ 인 것으로 제안하였다.

참고문헌

- (1) Raghunathan, S., Watterson, J.K., Whittaker, T.J.J., and Setoguchi, T., 1998, "Devices and Turbines for Wave Energy Conversion," 33rd Intersociety Engineering Conference on Energy Conversion, Colorado Springs, Co, 2-6 August.
- (2) Wells, A.A., 1976, Queen's University, Belfast, private communication.
- (3) 井上雅弘, 金子賢二, 瀬戸口俊明, 1984, "ウエルズター빈に関する研究(第2報, 定常性能試験によるロータ形状の選定)," 日本機械學會論文集 B, Vol. 459, pp. 2599-2605.
- (4) Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Fujii, F., Furuyama, H., Fujita, T., 2000, "The Offshore Floating Type Wave Power Device-Might Whale: Open Sea Tests-," Proc. of 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol. 1, pp. 373-380.
- (5) Santhakumar, S., Jayashankar, V., Atmanand, M.A., Pathak, A.G., Ravindran, M., Setoguchi, T., Takao, M., Kaneko, K., 1998, "Performance of an Impulse Turbine Based Wave Energy Plant," Proc. of 8th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol. 1, pp. 75-80.
- (6) Falcao, A.F.deO., Whittaker, T.J.T., Lewis, A.W., 1993, "JOULE II Preliminary Action: European Pilot Plant Study," European Wave Energy Symp., pp. 247-257.
- (7) 鷲尾幸久, 海洋科學技術センター, 私信.
- (8) Jayashankar, V., National Institute of Ocean Technology, India, Private Communication.
- (9) 瀬戸口俊明, 金子賢二, 松木 夫, 川洋充, 井上雅弘, 1990, "復葉式ウエルズター빈의性能改善," 日本機械學會論文集 B, Vol. 532, pp. 3763-3768.